DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS

Arica y Parinacota, XV Región

ANÁLISIS INTEGRAL DE SOLUCIONES A LA ESCASEZ HÍDRICA, REGIÓN DE ARICA Y PARINACOTA

S.I.T. N° 410

INFORME FINAL

REALIZADO POR:

ICASS LTDA

Arica, 2016

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS

Ministro de Obras Públicas
Ingeniero Comercial Sr. Alberto Undurraga Vicuña

Director General de Aguas
Abogado Sr. Carlos Estévez Valencia

Director Regional de Aguas
Ingeniero Civil Agrícola Sr. Héctor Flores Moraga

Inspector Fiscal
Ingeniero Civil Agrícola Sr. Héctor Flores Moraga

INGENIERÍA Y CONSULTORÍA EN AGUAS LTDA
Bernardo Capino Díaz
Jefe de Proyecto
Ingeniero Civil

Profesionales:
Ingeniera Civil Scarlett Vásquez Paulus
Hidrogeólogo Wolf von Igel Grisar
Hidrogeólogo Kirk Heatwole
Ingeniero Civil Gonzalo Jiménez
Hidrogeóloga Sonia Valdivielso Mijangos
Especialista SIG Andrea Zúñiga Yáñez
Antropóloga Social Kapris Tabilo
Profesora Intercultural Verónica Yucra
Abogada Claudia Craig
Ingeniera Agrónomo Marina Gil

Tabla de Contenido General

1. INTRODUCCIÓN 1
2. OBJETIVOS 3
3. LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO 5
4. PRESENTACIÓN A LAS COMUNIDADES 7
4.1 REUNIONES INFORMATIVAS PAC'S 11
4.1.1 Metodología de Trabajo de reuniones 12
4.1.2 Lugares de realización reuniones 13
4.1.3 Convocatoria 14
4.2 COORDINACIÓN INTERINSTITUCIONAL 15
4.3 PROCESO Y ESTRUCTURA DE LA DIFUSIÓN COMUNITARIA 16
5. RECOPILACIÓN Y REVISIÓN DE ANTECEDENTES 17
5.1 REGIONAL 19
5.2 CUENCA DE LA QUEBRADA LA CONCORDIA 25
5.3 CUENCA DEL RÍO LLUTA 29
5.4 CUENCA DEL RÍO SAN JOSÉ 37
5.5 CUENCA DE LA QUEBRADA CHACA-VÍTOR 43
5.6 CUENCA DEL RÍO CAMARONES 46
5.7 CUENCAS ALTIPLÁNICAS 51
5.7.1 Cuenca de los ríos Uchusuma y Caquena 54
5.7.2 Cuenca del lago Chungara 56
5.7.3 Cuenca del río Lauca 59
5.7.4 Cuenca del salar de Surire 65
6. LÍNEA BASE DE LA DEMANDA 69
6.1 SISTEMATIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN DE DERECHOS 70
6.1.1 Antecedentes Generales 70
6.1.2 Desarrollo del Trabajo 71
6.1.3 Análisis General 72
6.1.4 Análisis de la información por cuenca 77
6.1.5 Duplicidades 104
6.1.6 Perfeccionamiento 105
6.1.7 Organizaciones de Usuarios de Aguas (OUAS) 105
6.1.8 Dotaciones y sus fuentes en las provincias de la región 107
6.2 PLATAFORMA DE DERECHOS DE APROVECHAMIENTO DE AGUA 123
6.2.1 Fundamentos Teóricos 123
6.2.2 Descripción de la Plataforma 127
6.3 LEVANTAMIENTOS DE DEMANDAS Y CONSUMOS 132
6.3.1 Catastro de captaciones de agua 132

6.3.2 Demandas reales 145
6.4 MERCADO DEL AGUA 178
6.4.1 Contexto socio-económico de los mercados de agua 179
6.4.2 Modelo Económico 181
6.4.3 Modelo Conceptual y Modelo Econométrico 183
7. LÍNEA BASE DE LA OFERTA 207
7.1 ANÁLISIS REGIONAL 207
7.1.1 Geomorfología 207
7.1.2 Geología 212
7.1.3 Definición y caracterización de las cuencas de la región 224
7.1.4 Hidrometeorología 228
7.1.5 Hidroquímica 289
7.2 CUENCA DE LA QUEBRADA DE LA CONCORDIA 300
7.2.1 Caracterización Hidrológica 303
7.2.2 Marco geológico 319
7.2.3 Caracterización Hidrogeológica 323
7.2.4 Caracterización Hidroquímica 349
7.2.5 Modelo Conceptual 384
7.3 CUENCA DEL RÍO LLUTA 387
7.3.1 Caracterización Hidrológica 391
7.3.2 Marco geológico 432
7.3.3 Caracterización Hidrogeológica 439
7.3.4 Caracterización Hidroquímica 488
7.3.5 Modelo Conceptual 521
7.4 CUENCA DEL RÍO SAN JOSÉ 525
7.4.1 Caracterización Hidrológica 529
7.4.2 Marco geológico 567
7.4.3 Caracterización Hidrogeológica 573
7.4.4 Caracterización Hidroquímica 629
7.4.5 Modelo Conceptual 660
7.5 CUENCA DE LA QUEBRADA CHACA-VÍTOR 664
7.5.1 Caracterización Hidrológica 667
7.5.2 Marco geológico 700
7.5.3 Caracterización Hidrogeológica 705
7.5.4 Caracterización Hidroquímica 729
7.5.5 Modelo Conceptual 763
7.6 CUENCA DEL RÍO CAMARONES 767
7.6.1 Caracterización Hidrológica 771
7.6.2 Marco geológico 810
7.6.3 Caracterización Hidrogeológica 815
7.6.4 Caracterización Hidroquímica 833
7.6.5 Modelo Conceptual 870
7.7 CUENCA DE LOS RÍOS UCHUSUMA Y CAQUENA 874
7.7.1 Caracterización Hidrológica 877
7.7.2 Marco geológico 911

7.7.3 Caracterización Hidrogeológica 915
7.7.4 Caracterización Hidroquímica 931
7.7.5 Modelo Conceptual 958
7.8 CUENCA DEL LAGO CHUNGARA 962
7.8.1 Caracterización Hidrológica 965
7.8.2 Marco geológico 986
7.8.3 Caracterización Hidrogeológica 991
7.8.4 Caracterización Hidroquímica 1009
7.8.5 Modelo Conceptual 1035
7.9 CUENCA DEL RÍO LAUCA 1038
7.9.1 Caracterización Hidrológica 1041
7.9.2 Marco geológico 1083
7.9.3 Caracterización Hidrogeológica 1087
7.9.4 Caracterización Hidroquímica 1107
7.9.5 Modelo Conceptual 1136
7.10 CUENCA DEL SALAR DE SURIRE 1140
7.10.1 Caracterización Hidrológica 1143
7.10.2 Marco geológico 1168
7.10.3 Caracterización Hidrogeológica 1173
7.10.4 Caracterización Hidroquímica 1189
7.10.5 Modelo Conceptual 1216
8. BALANCES PRELIMINARES 1221
8.1 BALANCE HÍDRICO DEL SISTEMA REAL 1221
8.1.1 Cuenca de la Quebrada de La Concordia 1225
8.1.2 Cuenca del Río Lluta 1229
8.1.3 Cuenca del Río San José 1240
8.1.4 Cuenca de la Quebrada Chaca-Vítor 1248
8.1.5 Cuenca del Río Camarones 1252
8.1.6 Cuenca de los Ríos Uchusuma y Caquena 1259
8.1.7 Cuenca del Lago Chungara 1266
8.1.8 Cuenca del Río Lauca 1270
8.1.9 Cuenca del Salar de Surire 1275
8.1.10 Acuífero Cuenca del Río Lluta 1278
8.1.11 Acuífero Cuenca del Río San José 1282
8.1.12 Acuífero de la Quebrada Chaca-Vítor 1285
8.2 BALANCE LEGAL 1288
8.2.1 Cuenca de la Quebrada de La Concordia 1288
8.2.2 Cuenca del Río Lluta 1289
8.2.3 Cuenca del Río San José 1290
8.2.4 Cuenca de la Quebrada Chaca-Vítor 1291
8.2.5 Cuenca del Río Camarones 1292
8.2.6 Cuenca de los Ríos Uchusuma y Caquena 1293
8.2.7 Cuenca del Lago Chungara 1294
8.2.8 Cuenca del Río Lauca 1295
8.2.9 Cuenca del Salar de Surire 1296
9. TALLER FINAL DE PRESENTACIÓN DE RESULTADOS 1297
9.1 SOBRE LA PARTICIPACIÓN DE LA COMUNIDAD EN ESTA INSTANCIA 1297

9.2 PROCESO DE CONVOCATORIA Y DATOS REGIONALES DISPONIBLES 1298
10. CONCLUSIONES 1303
11. RECOMENDACIONES 1311
12. REFERENCIAS 1320
ANEXO I. FICHAS TALLERES DE DIFUSIÓN
ANEXO II. FICHAS DE REVISIÓN DE ANTECEDENTES
ANEXO III. LEVANTAMIENTO DE REGISTROS DE DAA DEL CBR DE ARICA
ANEXO IV. PLATAFORMA DE DAA
ANEXO V. DEMANDA
ANEXO VI. HIDROLOGÍA
ANEXO VII. HIDROGEOLOGÍA
ANEXO VIII. HIDROQUÍMICA E ISÓTOPOS
ANEXO IX. BALANCE HIDRICO
ANEXO X. PROYECTO SIG
ANEXO XI. PRESENTACIÓN FINAL A LAS COMUNIDADES
ANEXO XII. TABLAS

Índice de figuras

FIGURA 3.1 LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 6
FIGURA 4.1 FLUJO BÁSICO DEL PROCESO DE PRESENTACIÓN A LAS COMUNIDADES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 12
FIGURA 5.1 DISTRIBUCIÓN DEL NÚMERO DE INFORMES EXISTENTES EN CADA CUENCA RELACIONADOS CON LOS RECURSOS HÍDRICOS EN LA REGIÓN DE ARICA Y PARINACOTA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 18
FIGURA 5.2 REPRESENTACIÓN DE LA RELACIÓN Z=40HD EN CONDICIÓN ESTACIONARIA SIN EXPLOTACIÓN Y BAJO EXPLOTACIÓN DEL 100% DE LA DEMANDA DE AGUA. FUENTE: DGA (2011)..... 27
FIGURA 5.3 UBICACIÓN DE LOS PUNTOS DE LAS CAPTACIONES EXISTENTES EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA LA CONCORDIA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 28
FIGURA 5.4 UBICACIÓN DE LOS PUNTOS MUESTREADOS PARA EL ANÁLISIS HIDROQUÍMICO E ISOTÓPICO EN LA CUENCA DEL RÍO LLUTA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 35
FIGURA 5.5 UBICACIÓN DE LOS PUNTOS MUESTREADOS PARA EL ANÁLISIS HIDROQUÍMICO E ISOTÓPICO EN EL RÍO COLPITAS Y EN LA CONFLUENCIA ENTRE EL RÍO COLPITAS Y EL RÍO LLUTA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 36
FIGURA 5.6 UBICACIÓN DE LOS PUNTOS MUESTREADOS PARA EL ANÁLISIS HIDROQUÍMICO E ISOTÓPICO EN LA CUENCA DEL RÍO SAN JOSÉ. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 40
FIGURA 5.7 UBICACIÓN DE LOS PUNTOS MUESTREADOS PARA EL ANÁLISIS HIDROQUÍMICO E ISOTÓPICO EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA CHACA-VÍTOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 45
FIGURA 5.8 PERFIL HIDROGEOLÓGICO EMBALSE CARITAYA. FUENTE: GEOHIDROLOGÍA (2014). 48
FIGURA 5.9 UBICACIÓN DE LOS PUNTOS MUESTREADOS HIDROQUÍMICO, ISOTÓPICO Y AFOROS EN LA CUENCA DEL RÍO CAMARONES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 50
FIGURA 5.10 UBICACIÓN DE LOS PUNTOS DE AGUA MUESTREADOS PARA EL ANÁLISIS HIDROQUÍMICO POR DICTUC (2009) Y AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (1994A) EN LA CUENCA DEL RÍO CAQUENA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 56
FIGURA 5.11 GRÁFICO DEL ANÁLISIS ISOTÓPICO DE LA CONEXIÓN HIDRÁULICA ENTRE EL LAGO CHUNGARA Y LAS LAGUNAS DE COTACOTANI. FUENTE: HERRERA ET AL. (2006). 58
FIGURA 5.12 UBICACIÓN DE LOS PUNTOS MUESTREADOS DE HIDROQUÍMICA E ISOTOPOS, Y GEOFÍSICA REALIZADA EN LA CUENCA DEL LAGO CHUNGARA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 59
FIGURA 5.13 UBICACIÓN DE LOS PUNTOS MUESTREADOS HIDROQUÍMICO E ISOTÓPICO Y DE LA GEOFÍSICA REALIZADA EN LA CUENCA DEL RÍO LAUCA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 63

FIGURA 5.14 PERFIL HIDROGEOLÓGICO DEL SECTOR ALTO DE LA CUENCA DEL RÍO LAUCA. FUENTE: MATRAZ (2015). 64
FIGURA 5.15 UBICACIÓN DE LOS PUNTOS MUESTREADOS DE HIDROQUÍMICO E ISÓTOPOS Y GEOFÍSICA REALIZADA EN LA CUENCA DEL SALAR DE SURIRE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 67
FIGURA 6.1 DERECHOS DE APROVECHAMIENTO DE AGUAS ND CONCEDIDOS POR RESOLUCIÓN DGA Y SU % DE INSCRIPCIÓN EN EL REGISTRO DE AGUAS DEL CONSERVADOR. 75
FIGURA 6.2 DERECHOS DE APROVECHAMIENTO DE AGUAS NR DERIVADOS A TRIBUNALES Y SU % DE INSCRIPCIÓN EN EL REGISTRO DE AGUAS DEL CONSERVADOR. 76
FIGURA 6.3 CAUDALES OTORGADOS EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA DE LA CONCORDIA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 80
FIGURA 6.4 CAUDALES OTORGADOS EN LA CUENCA DEL RÍO LLUTA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. .. 85
FIGURA 6.5 CAUDALES OTORGADOS EN LA CUENCA DEL RÍO SAN JOSÉ. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 89
FIGURA 6.6 CAUDALES OTORGADOS EN LA CUENCA COSTERAS R. SAN JOSÉ- Q. CAMARONES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 93
FIGURA 6.7 CAUDALES OTORGADOS EN LA CUENCA DE LA Q. DEL RÍO CAMARONES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 97
FIGURA 6.8 CAUDALES OTORGADOS EN LAS CUENCAS ALTIPLÁNICAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 101
FIGURA 6.9 NÚMERO DE DERECHOS DE APROVECHAMIENTOS DE AGUAS SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEAS POR CUENCA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 103
FIGURA 6.10 DISTRIBUCIÓN DE LOS DERECHOS ND Y NR POR CUENCA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 103
FIGURA 6.11 DISTRIBUCIÓN DE LOS DERECHOS INSCRITOS ND DE ACUERDO AL ARTÍCULO 140 Y SIGUIENTES Y 4° TRANSITORIO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 104
FIGURA 6.12 EJEMPLO DE GRAFO A) NO DIRIGIDO Y B) DIRIGIDO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ... 124
FIGURA 6.13 EJEMPLO DE GRAFO NO DIRIGIDO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 125
FIGURA 6.14 MATRIZ DE ADYACENCIA DEL GRAFO DE LA FIGURA 6.13. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 126
FIGURA 6.15 LISTA DE ADYACENCIA DEL GRAFO DE LA FIGURA 6.13. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 127
FIGURA 6.16 EJEMPLO DE RED DE TÍTULOS DE DAA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 130
FIGURA 6.17 EJEMPLO DE VISUALIZACIÓN PLATAFORMA DAA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 131
FIGURA 6.18 FICHA CATASTRO DE CAPTACIONES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 134

FIGURA 6.19 UBICACIÓN DE LOS EXPEDIENTES ND, NR, NC Y (VPC) DE LA REGIÓN DE ARICA Y PARINACOTA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 143
FIGURA 6.20 EVOLUCIÓN DEL PRECIO EN CPL REALES DE 2008 POR MINUTO DE CAUDAL TRANSADO POR COMUNA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 188
FIGURA 6.21 EVOLUCIÓN DEL PRECIO EN CPL REALES DE 2008 POR L/S DE CAUDAL TRANSADO Y POR COMUNA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 189
FIGURA 6.22 EVOLUCIÓN DEL PRECIO EN CPL REALES DE 2008 POR ACCIÓN TRANSADA Y POR COMUNA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 189
FIGURA 6.23 EVOLUCIÓN DE LOS COSTOS DIRECTOS TOTALES DEL MERCADO DE AGUA POR COMUNA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 191
FIGURA 6.24 NÚMERO DE TRANSACCIONES EN FUNCIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE AGUA POR COMUNA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 193
FIGURA 6.25 PRECIO POR UNIDAD DE CAUDAL EN FUNCIÓN DEL CAUDAL MEDIO ANUAL POR COMUNA (CAUDAL REPRESENTATIVO). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 194
FIGURA 6.26 EVOLUCIÓN HISTÓRICA DEL PRECIO DEL AGUA TRANSADA EN UNIDADES DE CAUDAL DE MINUTOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 196
FIGURA 6.27 EVOLUCIÓN HISTÓRICA DEL PRECIO DEL AGUA TRANSADA EN UNIDADES DE CAUDAL DE L/S. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 196
FIGURA 6.28 EVOLUCIÓN HISTÓRICA DEL PRECIO DEL AGUA TRANSADA EN ACCIONES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 197
FIGURA 6.29 DISTRIBUCIÓN DE LA MUESTRA DE PRECIO Y CAUDAL TRANSADO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 205
FIGURA 7.1 DISTRIBUCIÓN DE LAS UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS DE LA REGIÓN DE ARICA Y PARINACOTA. FUENTE: MODIFICADO DE ALBERS (2012). 209
FIGURA 7.2 ESQUEMA GEOMORFOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA REGIÓN DE ARICA Y PARINACOTA. FUENTE: MODIFICADO DE CHARRIER R. (2012). 212
FIGURA 7.3 PERFIL GEOMORFOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA REGIÓN DE ARICA Y PARINACOTA. FUENTE: MODIFICADO DE CHARRIER R. (2012). 212
FIGURA 7.4 MAPA GEOLÓGICO DE LA REGIÓN DE ARICA Y PARINACOTA. CONTINÚA CON LEYENDA EN PÁGINA SIGUIENTE. FUENTE: GARCÍA ET AL (2004), GARCÍA ET AL (2012), GARCÍA Y FUENTES (2012), GARCÍA ET AL (2013). 221
FIGURA 7.5 LEYENDA DE MAPA GEOLÓGICO. VIENE DE PÁGINA ANTERIOR. FUENTE: GARCÍA *ET AL.* (2004), GARCÍA *ET AL.* (2012), GARCÍA Y FUENTES (2012), GARCÍA *ET AL.* (2013). 223

FIGURA 7.6 DELIMITACIÓN DE LAS CUENCAS HIDROGRÁFICAS DE LA XV REGIÓN DE ARICA Y PARINACOTA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 225
FIGURA 7.7 CLASIFICACIÓN CLIMÁTICA DE KÖPPEN EN LA REGIÓN DE ARICA Y PARINACOTA. FUENTE: RIOSECO, R. Y TESSER, C. CARTOGRAFÍA INTERACTIVA DE LOS CLIMAS DE CHILE [EN LÍNEA]. INSTITUTO DE GEOGRAFÍA, PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE. 231
FIGURA 7.8 UBICACIÓN DE LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS, FLUVIOMÉTRICAS Y DE CALIDAD DE AGUA MONITOREADAS POR LA DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS (DGA) Y ESTACIONES METEOROLÓGICAS DE PROPIEDAD DE LA DIRECCIÓN METEOROLÓGICA DE CHILE (DMC). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 235
FIGURA 7.9 ESTACIÓN RÍO COLPITAS EN ALCÉRRECA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 241
FIGURA 7.10 ESTACIÓN RÍO CAMARONES EN CONANOXA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 241
FIGURA 7.11 ESTACIÓN RÍO CAMARONES EN CHILPE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 242
FIGURA 7.12 ESTACIÓN RÍO GUALLATIRE EN GUALLATIRE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 242
FIGURA 7.13 ESTACIÓN RÍO LLUTA EN EL TOCONTASI. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 243
FIGURA 7.14 PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL EN RELACIÓN A LA ALTITUD, EN LA TABLA 7.11 SE PRESENTA LA INFORMACIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 249
FIGURA 7.15 MAPA DE ISOYETAS DE PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL DE LA XV REGIÓN DE ARICA Y PARINACOTA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 253
FIGURA 7.16 COMPARACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL OBTENIDA PARA DISTINTOS PERIODOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 255
FIGURA 7.17 PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL EN LA REGIÓN DE ARICA Y PARINACOTA, SEPARADA POR RANGOS DE ALTITUD: A) PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL EN ALTITUD ≤ 4.000 MSNM, B) PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL ENTRE 3.000 MSNM ≤ ALTITUD < 4.000 MSNM Y C) PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL EN ALTITUD < 3.000 MSNM. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 258
FIGURA 7.18 VARIACIÓN DE LA EVAPORACIÓN MEDIA ANUAL DEL TANQUE TIPO A CON LA ELEVACIÓN (VALORES PROMEDIO ANUAL). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 261
FIGURA 7.19 RELACIÓN ENTRE LA EVAPORACIÓN MEDIA ANUAL Y LA TEMPERATURA MEDIA ANUAL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 261
FIGURA 7.20 VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA MEDIA ANUAL CON LA ALTITUD. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 262
FIGURA 7.21 MAPA DE ISOLÍNEAS DE LA TASA DE EVAPORACIÓN MEDIA ANUAL EN LA REGIÓN DE ARICA Y PARINACOTA. SE MUESTRAN LAS 8 ESTACIONES DE LA REGIÓN DE ARICA Y PARINACOTA Y LAS 4 ESTACIONES DE LA REGIÓN DE TARAPACÁ QUE FUERON UTILIZADAS PARA EL ANÁLISIS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 265

FIGURA 7.22 VARIACIÓN DE LA EVAPORACIÓN MEDIA MENSUAL EN ESTACIONES METEOROLÓGICAS DE LA REGIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 269
FIGURA 7.23 TEMPERATURA MEDIA MENSUAL ABSOLUTA REPORTADA EN LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 272
FIGURA 7.24 RELACIÓN PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL Y EVAPOTRANSPIRACIÓN MEDIA ANUAL ESTIMADA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 274
FIGURA 7.25 COMPARACIÓN DE LOS RENDIMIENTOS DE LAS CUENCAS APORTANTES A LAS ESTACIONES FLUVIOMÉTRICAS OBTENIDOS PARA EL PERIODOS ACTUAL EVALUADO Y EN EL BALANCE HIDROLÓGICO DE CHILE, DGA (1987). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 280
FIGURA 7.26 CAUDAL MEDIO MENSUAL REPORTADO EN LAS ESTACIONES FLUVIOMÉTRICAS UBICADAS EN LAS CUENCAS DE LA REGIÓN: A) CUENCA DEL RÍO LLUTA, B) CUENCA DEL RÍO SAN JOSÉ, C) CUENCA DE LA QUEBRADA CHACA VÍTOR, D) CUENCA DEL RÍO CAMARONES, E) CUENCA DE LOS RÍOS UCHUSUMA Y CAQUENA, Y F) CUENCA DEL RÍO LAUCA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 285
FIGURA 7.27 UBICACIÓN DE LOS AFOROS REALIZADOS EN LAS DIFERENTES CAMPAÑAS EN EL PRESENTE ESTUDIO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 287
FIGURA 7.28 UBICACIÓN DE LAS MUESTRAS TOMADAS PARA EL ANÁLISIS HIDROQUÍMICO EN LAS DIFERENTES CAMPAÑAS EN EL PRESENTE ESTUDIO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 291
FIGURA 7.29 UBICACIÓN DE LAS MUESTRAS TOMADAS PARA EL ANÁLISIS ISOTÓPICO EN LAS DIFERENTES CAMPAÑAS EN EL PRESENTE ESTUDIO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 293
FIGURA 7.30 RECTA METEÓRICA MUNDIAL (RMM) Y TIPOS DE DESVIACIONES. FUENTE: MODIFICADO DE DOMENICO Y SCHWARTZ (1998). 298
FIGURA 7.31 RELACIÓN ISOTÓPICA DEL $\Delta^{18}O$ Y ΔD EN LAS MUESTRAS TOMADAS EN LA PRIMERA CAMPAÑA DE TERRENO, NOVIEMBRE 2015. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 299
FIGURA 7.32 UBICACIÓN DE LA CUENCA DE LA QUEBRADA LA CONCORDIA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 301
FIGURA 7.33 CURVA HIPSOMÉTRICA DE LA CUENCA DE LA QUEBRADA LA CONCORDIA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 305
FIGURA 7.34 DIAGRAMA UNIFILAR DE LA QUEBRADA LA CONCORDIA SECTOR BAJO (TERRITORIO CHILENO). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 306
FIGURA 7.35 UBICACIÓN ESTACIONES METEOROLÓGICAS EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA DE LA CONCORDIA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 307
FIGURA 7.36 ISOYETAS DE PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL REGIONAL EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA LA CONCORDIA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 311

FIGURA 7.37 .MAPA GEOLÓGICO DE LA CUENCA DE LA QUEBRADA LA CONCORDIA. FUENTE: MODIFICADO DE GARCÍA ET AL (2004). 321
FIGURA 7.38 UBICACIÓN DE LOS SONDAJES CON INFORMACIÓN ESTRATIGRÁFICA EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA LA CONCORDIA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 325
FIGURA 7.39 MAPA PIEZOMÉTRICO DE LA CUENCA DEL RÍO CAPLINA. FUENTE: PEÑA *ET AL.* (2009). . 327
FIGURA 7.40 MAPA DE LAS UNIDADES SEGÚN LA IMPORTANCIA HIDROGEOLÓGICA PRESENTES EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA LA CONCORDIA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 331
FIGURA 7.41 UBICACIÓN DE LOS SONDAJES CON PRUEBAS DE BOMBEO EN LA CUENCA DE LA CONCORDIA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 335
FIGURA 7.42 EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LOS NIVELES ESTÁTICOS DESDE MAYO A DICIEMBRE DE 1997 EN LOS SONDAJES DE LA CUENCA DE LA QUEBRADA LA CONCORDIA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 340
FIGURA 7.43 UBICACIÓN DE LOS POZOS MONITOREADOS HISTÓRICAMENTE POR LA DGA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 343
FIGURA 7.44 EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LOS NIVELES DE LOS POZOS MONITOREADOS POR LA DGA EN LA UNIDAD HIDROGEOLÓGICA I DURANTE EL PERIODO 1967- 2015 CON RELACIÓN A LA PRECIPITACIÓN Y EL CAUDAL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 345
FIGURA 7.45 MAPA PIEZOMÉTRICO DE LA UNIDAD HIDROGEOLÓGICA I EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA LA CONCORDIA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 347
FIGURA 7.46 UBICACIÓN DE LOS PUNTOS MUESTREADOS EN LOS ANTECEDENTES Y EN EL PRESENTE ESTUDIO EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA LA CONCORDIA. FUENTE ELABORACIÓN PROPIA. 351
FIGURA 7.47 DISTRIBUCIÓN DEL CONTENIDO DE SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES DE LAS MUESTRAS ANALIZADAS EN EL INFORME DE AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (1998B). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 355
FIGURA 7.48 DIAGRAMA DE PIPER CON LAS MUESTRAS ANALIZADAS EN AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (1998B). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 358
FIGURA 7.49 RELACIÓN ENTRE EL CONTENIDO DE SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES CON LOS CLORUROS Y CON LOS SULFATOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 359
FIGURA 7.50 LOCALIZACIÓN DE LOS POZOS MUESTREADOS EN LAS CUATRO CAMPAÑAS DE MUESTREO EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA LA CONCORDIA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 361
FIGURA 7.51 VALORES DE TEMPERATURA REGISTRADOS EN LAS CAMPAÑAS REALIZADAS EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA LA CONCORDIA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 363
FIGURA 7.52 VALORES DE PH REGISTRADOS EN LAS CAMPAÑAS REALIZADAS EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA LA CONCORDIA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 364

FIGURA 7.53 VALORES DE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA REGISTRADOS EN LAS CAMPAÑAS REALIZADAS EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA LA CONCORDIA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 365
FIGURA 7.54 VALORES DE SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES REGISTRADOS EN LAS CAMPAÑAS REALIZADAS EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA LA CONCORDIA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 366
FIGURA 7.55 DIAGRAMAS DE PIPER Y DE SCHOELLER-BERKALOFF DE LAS MUESTRAS ANALIZADAS EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA LA CONCORDIA EN LAS DIFERENTES CAMPAÑAS DE MUESTREO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 369
FIGURA 7.56 MAPA DE LA CUENCA DE LA CONCORDIA CON LOS DIAGRAMAS DE STIFF DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS MUESTRAS RECOGIDAS EN NOVIEMBRE DE 2015. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 371
FIGURA 7.57 DISTRIBUCIÓN DE LOS VALORES DE NITRATOS DE LAS MUESTRAS RECOGIDAS EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA LA CONCORDIA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 374
FIGURA 7.58 DIAGRAMAS DE PIPER Y DE SCHOELLER-BERKALOFF DE LAS MUESTRAS ANALIZADAS EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA LA CONCORDIA Y EN LOS POZOS DEL VALLE DE LA CUENCA DEL RÍO LLUTA FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 376
FIGURA 7.59 MODELO DE LA POSICIÓN DE LA CUÑA SALINA EN UN ACUÍFERO COSTERO. FUENTE: VERRUIJT (1968). 377
FIGURA 7.60 POZO PROPIEDAD DE ZOFRI S.A. UBICADO EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA LA CONCORDIA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 378
FIGURA 7.61 MUESTRAS QUE SUPERAN LOS LÍMITES ESTABLECIDOS EN NCH 409/1 EN DIFERENTES ELEMENTOS DE LAS MUESTRAS TOMADAS EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA LA CONCORDIA EN LA SEGUNDA CAMPAÑA, FEBRERO DE 2016. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 381
FIGURA 7.62 RELACIÓN $\Delta^{18}O/\Delta D$ DE LAS MUESTRAS TOMADAS EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA LA CONCORDIA EN LAS CUATRO CAMPAÑAS DE MUESTREO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 384
FIGURA 7.63 ESQUEMA DEL MODELO CONCEPTUAL HIDROGEOLÓGICO DE LA CUENCA DE LA QUEBRADA LA CONCORDIA. FUENTE: MODIFICADO DE LA CAPA USO DEL SUELO TOMADA DEL PORTAL WEB DEL SINIA HTTP://IDE.MMA.GOB.CL/ 386
FIGURA 7.64 UBICACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO LLUTA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 389
FIGURA 7.65 CURVA HIPSOMÉTRICA DE LA CUENCA DEL RÍO LLUTA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. . 392
FIGURA 7.66 DIAGRAMA UNIFILAR DEL RÍO LLUTA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 394
FIGURA 7.67 UBICACIÓN ESTACIONES METEOROLÓGICAS DE DMC Y DGA Y FLUVIOMÉTRICAS Y DE CALIDAD DE LA DGA EN LA CUENCA DEL RÍO LLUTA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 397
FIGURA 7.68 PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL REGISTRADA EN ESTACIONES DE LA CUENCA DEL RÍO LLUTA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 399

FIGURA 7.69 ISOYETAS DE PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL REGIONAL EN LA CUENCA DEL RÍO LLUTA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 401
FIGURA 7.70 VARIACIÓN TEMPORAL MENSUAL DE LA PRECIPITACIÓN MEDIA EN LA CUENCA DEL RÍO LLUTA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 405
FIGURA 7.71 EVAPORACIÓN MEDIA MENSUAL POTENCIAL EN ESTACIÓN PUTRE [3.545 MSNM]. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 406
FIGURA 7.72 CAUDAL MEDIO MENSUAL EN EL RÍO LLUTA Y SU RELACIÓN CON LA PRECIPITACIÓN MEDIA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 409
FIGURA 7.73 CURVAS DE VARIACIÓN ESTACIONAL ASOCIADAS A PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA DE 15% Y 85% Y CAUDAL MEDIO MENSUAL EN LAS ESTACIONES FLUVIOMÉTRICAS DE LA CUENCA DEL RÍO LLUTA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 411
FIGURA 7.74 LOCALIZACIÓN DE LOS AFOROS HISTÓRICOS ENCONTRADOS EN LA CUENCA DEL RÍO LLUTA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 417
FIGURA 7.75 LOCALIZACIÓN DE LOS AFOROS EN LAS CUATRO CAMPAÑAS DE ESTE ESTUDIO EN LA CUENCA DEL RÍO LLUTA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 419
FIGURA 7.76 ESQUEMA EN EL MODELO HIDROLÓGICO HEC-HMS DE LA CUENCA DEL RÍO LLUTA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 424
FIGURA 7.77 COMPARACIÓN CAUDALES MEDIOS ANUALES OBSERVADOS Y SIMULADOS EN LA SUBCUENCA LLUTA ALTO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 427
FIGURA 7.78 COMPARACIÓN ENTRE EL CAUDAL MEDIO ANUAL OBSERVADO Y EL SIMULADO EN LA SUBCUENCA LLUTA BAJO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 428
FIGURA 7.79 MAPA GEOLÓGICO DE LA CUENCA DEL RÍO LLUTA. FUENTE: MODIFICADO DE GARCÍA *ET AL.* (2004) Y GARCÍA (2012). 437
FIGURA 7.80 UBICACIÓN DEL PROYECTO MINERO "MANGANESO LOS PUMAS" Y DE LOS SONDAJES. FUENTE: MODIFICADO DE AQUACONSULT (2010)..... 441
FIGURA 7.81 PERFIL A-A' GEOLÓGICO-HIDROGEOLÓGICO DEL PROYECTO "MANGANESO LOS PUMAS". FUENTE: AQUACONSULT (2010)..... 443
FIGURA 7.82 UBICACIÓN DE LOS PERFILES NANO TEM EFECTUADOS POR AQUATERRA (2011) Y LOS 4 PERFILES TEM REALIZADOS POR AMEC (2014) EN EL SECTOR ALTO DE LA CUENCA DEL RÍO LLUTA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 445
FIGURA 7.83 PERFIL GEOFÍSICO ZONA 2 MEDIANTE NANO TEM TRANSVERSAL RÍO CARACARANI EN HUMAPALCA. FUENTE: AQUATERRA (2011). 447
FIGURA 7.84 PERFIL GEOFÍSICO 1 TRANSVERSAL AL RÍO COLPITAS. FUENTE: AMEC (2014). 447

FIGURA 7.85 PERFIL GEOFÍSICO 2 TRANSVERSAL AL RÍO COLPITAS. FUENTE: AMEC (2014). 448
FIGURA 7.86 PERFIL GEOFÍSICO 3 TRANSVERSAL AL RÍO COLPITAS. FUENTE: AMEC (2014). 448
FIGURA 7.87 PERFIL GEOFÍSICO 4 TRANSVERSAL AL RÍO COLPITAS. FUENTE: AMEC (2014). 449
FIGURA 7.88 UBICACIÓN DE LOS PERFILES GEOLÓGICOS DEL SECTOR DEL VALLE EL RÍO LLUTA. FUENTE: MODIFICADO DE JICA (1995). 451
FIGURA 7.89 PERFILES GEOLÓGICOS DEL SECTOR DEL VALLE EL RÍO LLUTA. FUENTE: JICA (1995). . 453
FIGURA 7.90 PERFIL GEOLÓGICO X-X´ DEL SECTOR DEL VALLE EL RÍO LLUTA. FUENTE: JICA (1995). 454
FIGURA 7.91 DISTRIBUCIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA (M/DÍA) EN EL VALLE DEL RÍO LLUTA. FUENTE: MODIFICADO DE AC ING Y AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (2002). 457
FIGURA 7.92 COLUMNA ESTRATIGRÁFICA AZAPA-POCONCHILE. FUENTE: GARCÍA *ET AL.* (2004). 462
FIGURA 7.93 MAPA DE LAS UNIDADES SEGÚN LA IMPORTANCIA HIDROGEOLÓGICA PRESENTE EN LA CUENCA DEL RÍO LLUTA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 465
FIGURA 7.94 UBICACIÓN DE LOS 11 SONDAJES DE LA EMPRESA ESSAT S.A Y LOS 4 SONDAJES JICA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 469
FIGURA 7.95 MAPA PIEZOMÉTRICO INFERIDO DE LA SUBCUENCA DEL RÍO LLUTA ALTO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 477
FIGURA 7.96 MAPA PIEZOMÉTRICO DE LA UNIDAD HIDROGEOLÓGICA I EN LA SUBCUENCA DEL RÍO LLUTA BAJO. FUENTE: AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (1998C) Y ELABORACIÓN PROPIA..... 481
FIGURA 7.97 EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LOS NIVELES DE LOS POZOS MONITOREADOS POR LA DGA EN LA UNIDAD HIDROGEOLÓGICA I DURANTE EL PERIODO 2000-2015 CON RELACIÓN A LA PRECIPITACIÓN Y EL CAUDAL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 484
FIGURA 7.98 EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LOS NIVELES DEL POZO J-2 MONITOREADO POR LA DGA EN LA UNIDAD HIDROGEOLÓGICA I DURANTE EL PERIODO 2000-2009 CON RELACIÓN A LA PRECIPITACIÓN Y EL CAUDAL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 485
FIGURA 7.99 EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LOS NIVELES DE LOS POZOS J-B Y J-A MONITOREADO POR LA DGA EN LA UNIDAD HIDROGEOLÓGICA I DURANTE EL PERIODO 2000-2015 CON RELACIÓN A LA PRECIPITACIÓN Y EL CAUDAL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 487
FIGURA 7.100 UBICACIÓN DE LOS PUNTOS MUESTREADOS PARA EL ANÁLISIS HIDROQUÍMICO EN LA CUENCA DEL RÍO LLUTA DURANTE LAS DIFERENTES CAMPAÑAS DE MUESTREO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 491
FIGURA 7.101 VALORES DE TEMPERATURA REGISTRADOS EN LAS AGUAS SUPERFICIALES EN LAS CAMPAÑAS REALIZADAS EN LA CUENCA DEL RÍO LLUTA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 494

FIGURA 7.102 VALORES DE TEMPERATURA REGISTRADOS EN LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LAS CAMPAÑAS REALIZADAS EN LA CUENCA DEL RÍO LLUTA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 494
FIGURA 7.103 VALORES DE PH REGISTRADOS EN LAS AGUAS SUPERFICIALES EN LAS CAMPAÑAS REALIZADAS EN LA CUENCA DEL RÍO LLUTA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 496
FIGURA 7.104 VALORES DE PH REGISTRADOS EN LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LAS CAMPAÑAS REALIZADAS EN LA CUENCA DEL RÍO LLUTA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 497
FIGURA 7.105 VALORES DE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA REGISTRADOS EN LAS AGUAS SUPERFICIALES EN LAS CAMPAÑAS REALIZADAS EN LA CUENCA DEL RÍO LLUTA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 499
FIGURA 7.106 VALORES DE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA REGISTRADOS EN LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LAS CAMPAÑAS REALIZADAS EN LA CUENCA DEL RÍO LLUTA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 499
FIGURA 7.107 DIAGRAMAS DE PIPER Y DE SCHOELLER-BERKALOFF DE LAS MUESTRAS ANALIZADAS EN EL SECTOR ALTO DE LA CUENCA DEL RÍO LLUTA, CAMPAÑA DE NOVIEMBRE DE 2015. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 504
FIGURA 7.108 DIAGRAMA DE PIPER DE LAS MUESTRAS ANALIZADAS EN EL SECTOR BAJO Y MEDIO DE LA CUENCA DEL RÍO LLUTA, CAMPAÑA NOVIEMBRE DE 2015. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 505
FIGURA 7.109 DIAGRAMAS DE SCHOELLER-BERKALOFF DE LAS MUESTRAS ANALIZADAS EN EL SECTOR MEDIO Y BAJO DE LA CUENCA DEL RÍO LLUTA, CAMPAÑA NOVIEMBRE DE 2015. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 506
FIGURA 7.110 DIAGRAMA DE STIFF DE LAS MUESTRAS ANALIZADAS EN LA CUENCA DEL RÍO LLUTA, CAMPAÑA NOVIEMBRE DE 2015. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 507
FIGURA 7.111 VOLCÁN TACORA Y AZUFRERA ABANDONADA UBICADA EN EL RÍO AZUFRE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 511
FIGURA 7.112 UBICACIÓN DE LOS PUNTOS DE AGUAS SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEAS QUE SE ANALIZARON EN CADA CAMPAÑA DE MUESTREO ISOTÓPICO EN LA CUENCA DEL RÍO LLUTA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 517
FIGURA 7.113 RELACIÓN $\Delta^{18}O/\Delta D$ DE LAS AGUAS SUPERFICIALES ANALIZADAS EN LA CUENCA DEL RÍO LLUTA EN LAS DIFERENTES CAMPAÑAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 520
FIGURA 7.114 RELACIÓN $\Delta^{18}O/\Delta D$ DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS ANALIZADAS EN LA CUENCA DEL RÍO LLUTA EN LAS DIFERENTES CAMPAÑAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 521
FIGURA 7.115 ESQUEMA DEL MODELO CONCEPTUAL HIDROGEOLÓGICO DE LA CUENCA DEL RÍO LLUTA. FUENTE: MODIFICADO DE LA CAPA USO DEL SUELO TOMADA DEL PORTAL WEB DEL SINIA HTTP://IDE.MMA.GOB.CL/. 524
FIGURA 7.116 UBICACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO SAN JOSÉ. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 527

FIGURA 7.117 CURVA HIPSOMÉTRICA DE LA CUENCA DEL RÍO SAN JOSÉ. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 530
FIGURA 7.118 DIAGRAMA UNIFILAR DEL RÍO SAN JOSÉ. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 531
FIGURA 7.119 UBICACIÓN ESTACIONES DE CALIDAD, FLUVIOMÉTRICAS Y METEOROLÓGICAS EN LA CUENCA DEL RÍO SAN JOSÉ. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 533
FIGURA 7.120 PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL REGISTRADA EN ESTACIONES DE LA CUENCA DEL RÍO SAN JOSÉ. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 535
FIGURA 7.121 ISOYETAS DE PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL REGIONAL EN LA CUENCA DEL RÍO SAN JOSÉ. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 537
FIGURA 7.122 VARIACIÓN TEMPORAL MENSUAL DE LA PRECIPITACIÓN MEDIA EN LA CUENCA DEL RÍO SAN JOSÉ. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 541
FIGURA 7.123 EVAPORACIÓN MEDIA MENSUAL POTENCIAL EN ESTACIÓN AZAPA [365 MSNM]. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 542
FIGURA 7.124 CAUDAL MEDIO MENSUAL EN EL RÍO SAN JOSÉ Y SU RELACIÓN CON LA PRECIPITACIÓN MEDIA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 545
FIGURA 7.125 CURVAS DE VARIACIÓN ESTACIONAL ASOCIADAS A PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA DE 15% Y 85% Y CAUDAL MEDIO MENSUAL EN LAS ESTACIONES FLUVIOMÉTRICAS DE LA CUENCA DEL RÍO SAN JOSÉ. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 547
FIGURA 7.126 LOCALIZACIÓN DE LOS AFOROS HISTÓRICOS ENCONTRADOS EN LA CUENCA DEL RÍO SAN JOSÉ. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 553
FIGURA 7.127 LOCALIZACIÓN DE LOS AFOROS EN LAS CUATRO CAMPAÑAS DE ESTE ESTUDIO EN LA CUENCA DEL RÍO SAN JOSÉ. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 555
FIGURA 7.128 ESQUEMA EN EL MODELO HIDROLÓGICO HEC-HMS DE LA CUENCA DEL RÍO SAN JOSÉ. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 558
FIGURA 7.129 COMPARACIÓN CAUDALES MEDIOS ANUALES OBSERVADOS Y SIMULADOS EN LA SUBCUENCA SAN JOSÉ ALTO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 561
FIGURA 7.130 MAPA GEOLÓGICO DE LA CUENCA DEL RÍO SAN JOSÉ. FUENTE: MODIFICADO DE GARCÍA *ET AL.* (2004). 571
FIGURA 7.131 DESTACADA EN RECTÁNGULO ROJO, LA UBICACIÓN DEL VALLE DE AZAPA, ZONA ESTUDIA HIDROGEOLÓGICAMENTE EN DETALLE EN LOS ANTECEDENTES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 575
FIGURA 7.132 MAPA PIEZOMÉTRICO DEL VALLE DE AZAPA DE JUNIO DE 1988. FUENTE: MODIFICADO DE AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (1989). 579

FIGURA 7.133 MAPA PIEZOMÉTRICO DEL VALLE DE AZAPA DEL AÑO 1995. FUENTE: MODIFICADO DE AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS Y AC ING (1995) Y AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS Y AC ING (1997). 583
FIGURA 7.134 MAPA PIEZOMÉTRICO VALLE DE AZAPA CON LAS CURVAS ISOFREÁTICAS DE 1988, 1993, 1994 Y 1995. FUENTE: AC ING Y AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (2002). 587
FIGURA 7.135 UBICACIÓN DE LAS MEDICIONES TEM REALIZADAS POR AC ING (2009) EN EL VALLE DE AZAPA. FUENTE: MODIFICADO DE AC ING (2009). 591
FIGURA 7.136 MAPA DE LAS UNIDADES SEGÚN LA IMPORTANCIA HIDROGEOLÓGICA PRESENTES EN LA CUENCA DEL RÍO SAN JOSÉ. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 597
FIGURA 7.137 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LOS VALORES DE TRANSMISIVIDAD EN EL VALLE DE AZAPA. FUENTE: MODIFICADO DE AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (1989). 601
FIGURA 7.138 UBICACIÓN DE LOS POZOS DONDE EL INH (2014) REALIZÓ PRUEBAS DE BOMBEO. FUENTE: MODIFICADO DE INH (2014). 605
FIGURA 7.139 UBICACIÓN DE LOS POZOS CON REGISTRO DE MEDICIÓN DE NIVELES DE LA DGA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 611
FIGURA 7.140 EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LA PROFUNDIDAD DEL NIVEL EN LOS POZOS UBICADOS EN EL SECTOR ARICA CENTRO EN EL PERIODO 1973 – 2013 2006 CON RELACIÓN A LA PRECIPITACIÓN Y EL CAUDAL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 614
FIGURA 7.141 EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LA PROFUNDIDAD DEL NIVEL EN LOS POZOS UBICADOS EN EL SECTOR SAUCACHE EN EL PERIODO 1973 - 2006 CON RELACIÓN A LA PRECIPITACIÓN Y EL CAUDAL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 616
FIGURA 7.142 EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LA PROFUNDIDAD DEL NIVEL EN LOS POZOS UBICADOS EN LOS SECTORES QUEBRADA DE ACHA Y PAGO DE GÓMEZ, EN EL PERIODO 1962 - 2014 CON RELACIÓN A LA PRECIPITACIÓN Y EL CAUDAL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 617
FIGURA 7.143 EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LA PROFUNDIDAD DEL NIVEL EN LOS POZOS UBICADOS EN LOS SECTORES LAS ÁNIMAS Y LAS MAITAS, EN EL PERIODO 1973 – 2007 CON RELACIÓN A LA PRECIPITACIÓN Y EL CAUDAL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 619
FIGURA 7.144 EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LA PROFUNDIDAD DEL NIVEL EN LOS POZOS UBICADOS EN LOS SECTORES SAN MIGUEL, LAS RIVERAS Y CABUZA, EN EL PERIODO 1962 - 2015 CON RELACIÓN A LA PRECIPITACIÓN Y EL CAUDAL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 621
FIGURA 7.145 MAPA PIEZOMÉTRICO DE LA UNIDAD HIDROGEOLÓGICA I EN LA CUENCA DEL RÍO SAN JOSÉ. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 625

FIGURA 7.146 MAPA PIEZOMÉTRICO DE LA CABECERA DE LA CUENCA DEL RÍO SAN JOSÉ. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 627
FIGURA 7.147 PERFIL LONGITUDINAL DE LA COTA TOPOGRÁFICA Y EL NIVEL FREÁTICO DEL VALLE DE AZAPA. FUENTE: DHV *ET AL.* (1995) 629
FIGURA 7.148 UBICACIÓN DE LOS PUNTOS MUESTREADOS EN LA CUENCA DEL RÍO SAN JOSÉ DURANTE LAS CAMPAÑAS EFECTUADAS EN EL PRESENTE ESTUDIO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 633
FIGURA 7.149 VALORES DE TEMPERATURA REGISTRADOS EN LAS AGUAS SUPERFICIALES EN LAS CAMPAÑAS REALIZADAS EN LA CUENCA DEL RÍO SAN JOSÉ. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 636
FIGURA 7.150 VALORES DE TEMPERATURA REGISTRADOS EN LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LAS CAMPAÑAS REALIZADAS EN LA CUENCA DEL RÍO SAN JOSÉ. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 636
FIGURA 7.151 VALORES DE PH REGISTRADOS EN LAS AGUAS SUPERFICIALES EN LAS CAMPAÑAS REALIZADAS EN LA CUENCA DEL RÍO SAN JOSÉ. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 638
FIGURA 7.152 VALORES DE PH REGISTRADOS EN LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LAS CAMPAÑAS REALIZADAS EN LA CUENCA DEL RÍO SAN JOSÉ. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 638
FIGURA 7.153 VALORES DE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA REGISTRADOS EN LAS AGUAS SUPERFICIALES EN LAS CAMPAÑAS REALIZADAS EN LA CUENCA DEL RÍO SAN JOSÉ. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 640
FIGURA 7.154 VALORES DE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA REGISTRADOS EN LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LAS CAMPAÑAS REALIZADAS EN LA CUENCA DEL RÍO SAN JOSÉ. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 640
FIGURA 7.155 DIAGRAMA DE PIPER DE LAS MUESTRAS ANALIZADAS EN LA CUENCA DEL RÍO SAN JOSÉ, CAMPAÑA DE NOVIEMBRE DE 2015. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 644
FIGURA 7.156 DIAGRAMAS DE SCHOELLER-BERKALOFF DE LAS MUESTRAS ANALIZADAS EN LA CUENCA DEL RÍO SAN JOSÉ, CAMPAÑA DE NOVIEMBRE DE 2015. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 645
FIGURA 7.157 DIAGRAMAS DE STIFF DE LAS MUESTRAS ANALIZADAS EN LA CUENCA DEL RÍO SAN JOSÉ, CAMPAÑA DE NOVIEMBRE DE 2015. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 647
FIGURA 7.158 VERTIENTE UBICADA EN LA LOCALIDAD DE PUQUIO, QUEBRADA LA HIGUERA O ACHA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 652
FIGURA 7.159 UBICACIÓN DE LOS PUNTOS ANALIZADOS ISOTÓPICAMENTE EN LA CUENCA DEL RÍO SAN JOSÉ DURANTE LAS DIFERENTES CAMPAÑAS DE MUESTREO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 655
FIGURA 7.160 RELACIÓN $\Delta^{18}O/\Delta D$ DE LAS AGUAS SUPERFICIALES ANALIZADAS EN LA CUENCA DEL RÍO SAN JOSÉ EN LAS DIFERENTES CAMPAÑAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 659
FIGURA 7.161 RELACIÓN $\Delta^{18}O/\Delta D$ DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS ANALIZADAS EN LA CUENCA DEL RÍO SAN JOSÉ EN LAS DIFERENTES CAMPAÑAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 659

FIGURA 7.162 ESQUEMA DEL MODELO CONCEPTUAL HIDROLÓGICO DE LA CUENCA DEL RÍO SAN JOSÉ. FUENTE: MODIFICADO DE LA CAPA USO DEL SUELO TOMADA DEL PORTAL WEB DEL SINIA HTTP://IDE.MMA.GOB.CL/. 663
FIGURA 7.163 UBICACIÓN DE LA CUENCA DE LA QUEBRADA CHACA-VÍTOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 665
FIGURA 7.164 CURVA HIPSOMÉTRICA DE LA CUENCA DE LA QUEBRADA CHACA VÍTOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 668
FIGURA 7.165 DIAGRAMA UNIFILAR DE LA QUEBRADA CHACA VÍTOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 669
FIGURA 7.166 UBICACIÓN ESTACIONES DE CALIDAD, FLUVIOMÉTRICAS Y METEOROLÓGICAS EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA CHACA-VÍTOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 671
FIGURA 7.167 PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL REGISTRADA EN ESTACIÓN CODPA DE LA CUENCA DE LA QUEBRADA CHACA VÍTOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 673
FIGURA 7.168 ISOYETAS DE PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL REGIONAL EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA CHACA-VÍTOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 675
FIGURA 7.169 VARIACIÓN MENSUAL DE LA PRECIPITACIÓN MEDIA EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA CHACA VÍTOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 679
FIGURA 7.170 EVAPORACIÓN MEDIA MENSUAL POTENCIAL EN ESTACIÓN CODPA [1.870 MSNM]. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 680
FIGURA 7.171 CAUDAL MEDIO MENSUAL EN LA QUEBRADA CHACA VÍTOR Y SU RELACIÓN CON LA PRECIPITACIÓN MEDIA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 683
FIGURA 7.172 CURVAS DE VARIACIÓN ESTACIONAL ASOCIADAS A PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA DE 15% Y 85% Y CAUDAL MEDIO MENSUAL EN LA ESTACIÓN FLUVIOMÉTRICA RÍO CODPA EN CALA-CALA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 684
FIGURA 7.173 LOCALIZACIÓN DE LOS AFOROS HISTÓRICOS ENCONTRADOS EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA CHACA VÍTOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 687
FIGURA 7.174 LOCALIZACIÓN DE LOS AFOROS EN LAS CUATRO CAMPAÑAS ESTE ESTUDIO EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA CHACA VÍTOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 689
FIGURA 7.175 ESQUEMA EN EL MODELO HIDROLÓGICO HEC-HMS DE LA CUENCA DE LA QUEBRADA CHACA VÍTOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 692
FIGURA 7.176 COMPARACIÓN CAUDALES MEDIOS ANUALES OBSERVADOS Y SIMULADOS EN LA SUBCUENCA RÍO CODPA HASTA CALA-CALA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 695

FIGURA 7.177 ZONAS DE INTERÉS SELECCIONADAS (RECUADROS ROJOS) COMO ÁREAS ACUÍFERAS, EN DONDE SE PRODUCE LA PRINCIPAL RECARGA AL ACUÍFERO REGIONAL EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA CHACA VÍTOR. FUENTE: MAYCO (2013). 696
FIGURA 7.178 MAPA GEOLÓGICO DE LA CUENCA DE LA QUEBRADA CHACA-VÍTOR. FUENTE: MODIFICADO DE GARCÍA *ET AL* (2004). 703
FIGURA 7.179 UBICACIÓN DE LA QUEBRADA VÍTOR DESTACADO EN RECTÁNGULO ROJO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 707
FIGURA 7.180 NANO TEM INTERPRETADO EN SECCIÓN DE SALIDA DE SUBCUENCA "RÍO CODPA EN CALA-CALA". FUENTE: AQUATERRA (2011). 710
FIGURA 7.181 MAPA DE LAS UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS PRESENTES EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA CHACA-VÍTOR. FUENTE: MODIFICADO DE MAYCO (2013). 711
FIGURA 7.182 COLUMNA ESTRATIGRÁFICA DE LA QUEBRADA CHACA VÍTOR EN EL SECTOR BAJO DE LA CUENCA. FUENTE: GARCÍA *ET AL.* (2004). 713
FIGURA 7.183 MAPA DE LAS UNIDADES SEGÚN LA IMPORTANCIA HIDROGEOLÓGICA PRESENTES EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA CHACA-VÍTOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 715
FIGURA 7.184 UBICACIÓN DE LOS POZOS CON PRUEBAS DE BOMBEO Y POZOS CON MEDICIÓN DE NIVEL FREÁTICO EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA CHACA-VÍTOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 719
FIGURA 7.185 MAPA PIEZOMÉTRICO DE LA UNIDAD HIDROGEOLÓGICA I EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA CHACA-VÍTOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 725
FIGURA 7.186 MAPA PIEZOMÉTRICO INFERIDO EN LA CABECERA DE LA CUENCA DE LA QUEBRADA CHACA-VÍTOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 727
FIGURA 7.187 DISTRIBUCIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA DE LAS MUESTRAS ANALIZADAS POR MAYCO (2013). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 731
FIGURA 7.188 DIAGRAMAS DE PIPER Y DE SCHOELLER-BERKALOFF CON LAS MUESTRAS ANALIZADAS EN MAYCO (2013). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 734
FIGURA 7.189 RELACIÓN $\Delta^{18}O/\Delta D$ DE LAS MUESTRAS ANALIZADAS POR MAYCO (2013) EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA CHACA-VÍTOR EN FEBRERO DE 2015. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 735
FIGURA 7.190 REGISTRO DEL CONTENIDO DE ARSÉNICO EN LA ESTACIÓN "RÍO CODPA EN CALA-CALA", PERIODO 1990-2015. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 736
FIGURA 7.191 UBICACIÓN DE LOS PUNTOS MUESTREADOS EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA CHACA-VÍTOR DURANTE LAS CAMPAÑAS DE MUESTREO EFECTUADAS EN EL PRESENTE ESTUDIO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 737

FIGURA 7.192 VALORES DE TEMPERATURA REGISTRADOS EN LAS AGUAS SUPERFICIALES EN LAS CAMPAÑAS REALIZADAS EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA CHACA-VÍTOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 740
FIGURA 7.193 VALORES DE TEMPERATURA REGISTRADOS EN LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LAS CAMPAÑAS REALIZADAS EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA CHACA-VÍTOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 740
FIGURA 7.194 VALORES DE PH REGISTRADOS EN LAS AGUAS SUPERFICIALES EN LAS CAMPAÑAS REALIZADAS EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA CHACA-VÍTOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 742
FIGURA 7.195 VALORES DE PH REGISTRADOS EN LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LAS CAMPAÑAS REALIZADAS EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA CHACA-VÍTOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 742
FIGURA 7.196 VALORES DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA REGISTRADOS EN LAS AGUAS SUPERFICIALES EN LAS CAMPAÑAS REALIZADAS EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA CHACA-VÍTOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 744
FIGURA 7.197 VALORES DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA REGISTRADOS EN LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LAS CAMPAÑAS REALIZADAS EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA CHACA-VÍTOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 744
FIGURA 7.198 DIAGRAMAS DE PIPER Y DE SCHOELLER-BERKALOFF DE LA COMPOSICIÓN HIDROQUÍMICA DE LA CUENCA DE LA QUEBRADA CHACA-VÍTOR, NOVIEMBRE DE 2015. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 748
FIGURA 7.199 DIAGRAMAS DE PIPER Y DE SCHOELLER-BERKALOFF DE LA COMPOSICIÓN HIDROQUÍMICA DE LA CUENCA DE LA QUEBRADA CHACA-VÍTOR, FEBRERO DE 2016. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 749
FIGURA 7.200 MAPA CON LOS DIAGRAMAS DE STIFF DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS MUESTRAS RECOGIDAS EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA CHACA-VÍTOR EN NOVIEMBRE DE 2015. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 751
FIGURA 7.201 UBICACIÓN DE LAS MUESTRAS ANALIZADAS ISOTÓPICAMENTE EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA CHACA-VÍTOR EN LAS CAMPAÑAS DE TERRENO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 759
FIGURA 7.202 RELACIÓN $\Delta^{18}O/\Delta D$ DE LAS AGUAS SUPERFICIALES ANALIZADAS EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA CHACA-VÍTOR EN LAS DIFERENTES CAMPAÑAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 762
FIGURA 7.203 RELACIÓN $\Delta^{18}O/\Delta D$ DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS ANALIZADAS EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA CHACA-VÍTOR EN LAS DIFERENTES CAMPAÑAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 763
FIGURA 7.204 ESQUEMA DEL MODELO CONCEPTUAL HIDROGEOLÓGICO DE LA CUENCA DE LA QUEBRADA CHACA-VÍTOR. FUENTE: MODIFICADO DE LA CAPA USO DEL SUELO TOMADA DEL PORTAL WEB DEL SINIA HTTP://IDE.MMA.GOB.CL/. 766

FIGURA 7.205 UBICACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO CAMARONES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 769
FIGURA 7.206 CURVA HIPSOMÉTRICA DE LA CUENCA DEL RÍO CAMARONES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 773
FIGURA 7.207 DIAGRAMA UNIFILAR DEL RÍO CAMARONES. FUENTE: CON POTENCIAL CONSULTORES SPA (2016)..... 774
FIGURA 7.208 UBICACIÓN ESTACIONES DE CALIDAD, FLUVIOMÉTRICAS Y METEOROLÓGICAS EN LA CUENCA DEL RÍO CAMARONES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 777
FIGURA 7.209 ISOYETAS DE PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL REGIONAL EN LA CUENCA DEL RÍO CAMARONES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 781
FIGURA 7.210 TASA DE EVAPORACIÓN MEDIA MENSUAL ESTIMADA EN LA CUENCA DEL RÍO CAMARONES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 787
FIGURA 7.211 CURVAS DE VARIACIÓN ESTACIONAL ASOCIADAS A PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA DE 15%, 25% Y 85% Y CAUDAL MEDIO MENSUAL EN LAS ESTACIONES FLUVIOMÉTRICAS Y PUNTOS DE INTERÉS DE LA CUENCA DEL RÍO CAMARONES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 792
FIGURA 7.212 LOCALIZACIÓN DE LOS AFOROS HISTÓRICOS ENCONTRADOS EN LA CUENCA DEL RÍO CAMARONES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 795
FIGURA 7.213 LOCALIZACIÓN DE LOS AFOROS EN LAS CAMPAÑA I, CAMPAÑA II, CAMPAÑA III Y CAMPAÑA IV DEL ESTUDIO DE CON POTENCIAL (2016) EN LA CUENCA DEL RÍO CAMARONES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 797
FIGURA 7.214 LOCALIZACIÓN DE LOS AFOROS EN LA CAMPAÑA IV DE ESTE ESTUDIO EN LA CUENCA DEL RÍO CAMARONES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 799
FIGURA 7.215 ESQUEMA EN EL MODELO HIDROLÓGICO HEC-HMS DE LA CUENCA DEL RÍO CAMARONES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 804
FIGURA 7.216 COMPARACIÓN CAUDALES MEDIOS ANUALES OBSERVADOS Y SIMULADOS EN LA SUBCUENCA RÍO CAMARONES HASTA CONANOXA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 807
FIGURA 7.217 MAPA GEOLÓGICO DE LA CUENCA DEL RÍO CAMARONES. FUENTE: MODIFICADO DE GARCÍA ET AL (2004)..... 813
FIGURA 7.218 NANO TEM INTERPRETADO EN CONANOXA. FUENTE: MODIFICADO DE AQUATERRA LTDA. (2011)..... 815
FIGURA 7.219. UBICACIÓN DE LOS PUNTOS NANOTEM Y DE LOS PERFILES DE TOMOGRAFÍA REALIZADOS EN GEOHIDROLOGÍA (2014). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 817
FIGURA 7.220 MAPA DE LAS UNIDADES SEGÚN LA IMPORTANCIA HIDROGEOLÓGICA PRESENTES EN LA CUENCA DEL RÍO CAMARONES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 823

FIGURA 7.221 MAPA PIEZOMÉTRICO INFERIDO DE LA UNIDAD HIDROGEOLÓGICA I EN LA PARTE BAJA DE LA CUENCA DEL RÍO CAMARONES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 829
FIGURA 7.222 MAPA PIEZOMÉTRICO INFERIDO DE LA CABECERA DE LA CUENCA DEL RÍO CAMARONES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 831
FIGURA 7.223 UBICACIÓN DE LAS MUESTRAS ANALIZADAS EN LOS ANTECEDENTES MÁS RECIENTES DE LA CUENCA DEL RÍO CAMARONES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 835
FIGURA 7.224 UBICACIÓN DE LOS PUNTOS MUESTREADOS EN LA CUENCA DEL RÍO CAMARONES DURANTE LAS CAMPAÑAS DE MUESTREO EFECTUADAS EN EL PRESENTE ESTUDIO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 839
FIGURA 7.225 DISTRIBUCIÓN DE LOS VALORES DE PH DE LAS MUESTRAS TOMADAS POR LA UTA (2010) EN LA CUENCA DEL RÍO CAMARONES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 843
FIGURA 7.226 DISTRIBUCIÓN DE LOS VALORES DE PH DE LAS MUESTRAS TOMADAS EN AGOSTO DE 2016 EN LA CUENCA DEL RÍO CAMARONES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 845
FIGURA 7.227 DISTRIBUCIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA DE LAS MUESTRAS TOMADAS EN AGOSTO DE 2016 EN LA CUENCA DEL RÍO CAMARONES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 849
FIGURA 7.228 DISTRIBUCIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA DE LAS MUESTRAS TOMADAS POR CONPOTENCIAL (2016), SEPTIEMBRE DE 2015. FUENTE: MODIFICADO DE CONPOTENCIAL (2016). 851
FIGURA 7.229 DISTRIBUCIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA DE LAS MUESTRAS ANALIZADAS POR GEOHIDROLOGÍA (2014) EN MARZO DE 2014. FUENTE: MODIFICADO DE GEOHIDROLOGÍA (2014). 855
FIGURA 7.230 DIAGRAMAS DE PIPER Y DE SCHOELLER-BERKALOFF CON LOS DATOS OBTENIDOS EN LA CUARTA CAMPAÑA DE MUESTREO DE AGOSTO DE 2016 EN LA CUENCA EL RÍO CAMARONES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 859
FIGURA 7.231 MAPA CON LOS DIAGRAMAS DE STIFF DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS MUESTRAS RECOGIDAS EN LA CUENCA DEL RÍO CAMARONES EN AGOSTO DE 2016. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 861
FIGURA 7.232. UBICACIÓN DE LAS MUESTRAS ANALIZADAS ISOTÓPICAMENTE EN LOS ANTECEDENTES EN LA CUENCA DEL RÍO CAMARONES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 867
FIGURA 7.233. RELACIÓN $\Delta^{18}O/\Delta D$ DE LAS MUESTRAS ANALIZADAS EN LOS ANTECEDENTES EN LA CUENCA DEL RÍO CAMARONES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 870
FIGURA 7.234 LAGUNA ROJA DE AMUYO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 872
FIGURA 7.235 ESQUEMA DEL MODELO CONCEPTUAL HIDROGEOLÓGICO DE LA CUENCA DEL RÍO CAMARONES. FUENTE: MODIFICADO DE LA CAPA USO DEL SUELO TOMADA DEL PORTAL WEB DEL SINIA HTTP://IDE.MMA.GOB.CL/. 873

FIGURA 7.236 UBICACIÓN DE LA CUENCA DE LOS RÍOS UCHUSUMA Y CAQUENA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 875
FIGURA 7.237 CURVA HIPSOMÉTRICA DE LA CUENCA DE LOS RÍOS UCHUSUMA Y CAQUENA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 879
FIGURA 7.238 DIAGRAMA UNIFILAR DE LOS RÍOS UCHUSUMA-CAQUENA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 880
FIGURA 7.239 UBICACIÓN ESTACIONES DE CALIDAD DE AGUA, FLUVIOMÉTRICAS Y METEOROLÓGICAS EN LA CUENCA DE LOS RÍOS UCHUSUMA Y CAQUENA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 883
FIGURA 7.240 PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL REGISTRADA EN LAS ESTACIONES DE LA CUENCA DE LOS RÍOS UCHUSUMA Y CAQUENA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 885
FIGURA 7.241 ISOYETAS DE PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL REGIONAL EN LA CUENCA DE LOS RÍOS UCHUSUMA Y CAQUENA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 887
FIGURA 7.242 VARIACIÓN MENSUAL DE LA PRECIPITACIÓN MEDIA EN LA CUENCA DE LOS RÍOS UCHUSUMA Y CAQUENA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 890
FIGURA 7.243 EVAPORACIÓN MEDIA MENSUAL POTENCIAL EN ESTACIONES UBICADAS EN CUENCAS ALTIPLÁNICAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 892
FIGURA 7.244 CAUDAL MEDIO MENSUAL EN EL RÍO CAQUENA Y SU RELACIÓN CON LA PRECIPITACIÓN MEDIA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 896
FIGURA 7.245 CURVAS DE VARIACIÓN ESTACIONAL ASOCIADAS A PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA DE 15% Y 85% Y CAUDAL MEDIO MENSUAL EN LAS ESTACIONES FLUVIOMÉTRICAS DE LA SUBCUENCA DEL RÍO CAQUENA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 898
FIGURA 7.246 LOCALIZACIÓN DE LAS CAMPAÑAS DE AFORO EN LA CUENCA DE LOS RÍOS UCHUSUMA Y CAQUENA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 901
FIGURA 7.247 ESQUEMA EN EL MODELO HIDROLÓGICO HEC-HMS DE LA CUENCA DEL RÍO CAQUENA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 905
FIGURA 7.248 COMPARACIÓN CAUDALES MEDIOS ANUALES OBSERVADOS Y SIMULADOS EN LA SUBCUENCA RÍO CAQUENA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 908
FIGURA 7.249 MAPA GEOLÓGICO DE LA CUENCA DE LOS RÍOS UCHUSUMA Y CAQUENA. FUENTE: MODIFICADO DE GARCÍA *ET AL.* (2004) 913
FIGURA 7.250 ESQUEMA DE ACUÍFEROS VISVIRI Y CAQUENA. FUENTE: MODIFICADO DE HENRÍQUEZ *ET AL.* (1976). 915
FIGURA 7.251 DELIMITACIÓN DEL ACUÍFERO DEL BOFEDAL DE CAQUENA. FUENTE: DGA (2003) 916
FIGURA 7.252 MAPA PIEZOMÉTRICO DE LA CUENCA DEL RÍO UCHUSUMA EN TERRITORIO PERUANO Y BOLIVIANO. FUENTE: AZAPA (2004). 917

FIGURA 7.253 NANO TEM INTERPRETADO EN SECCIÓN DE SALIDA DE SUBCUENCA INFERIOR. FUENTE: MODIFICADO DE AQUATERRA (2011). 918
FIGURA 7.254 MAPA DE LAS UNIDADES SEGÚN LA IMPORTANCIA HIDROGEOLÓGICA PRESENTES EN LA CUENCA DE LOS RÍOS UCHUSUMA Y CAQUENA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 923
FIGURA 7.255 MAPA PIEZOMÉTRICO EN LA CUENCA DE LOS RÍOS UCHUSUMA Y CAQUENA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 929
FIGURA 7.256 DIAGRAMAS DE PIPER Y DE SCHOELLER-BERKALOFF DE LAS MUESTRAS ANALIZADAS HIDROQUÍMICAMENTE EN LA ESTACIÓN DE LA DGA "RÍO CAQUENA EN VERTEDERO", CORRESPONDIENTE A LA BASE DE DATOS DEL ESTUDIO DE DICTUC (2009). FUENTE: MODIFICADO DE DICTUC (2009)... 933
FIGURA 7.257 REGISTRO DEL CONTENIDO DE BORO EN LA ESTACIÓN "RÍO CAQUENA EN VERTEDERO", EN PERIODO 1980-2014. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 934
FIGURA 7.258 REGISTRO DEL CONTENIDO DE ARSÉNICO EN LA ESTACIÓN "RÍO CAQUENA EN VERTEDERO", EN PERIODO 1980-2014. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 934
FIGURA 7.259 UBICACIÓN DE LAS MUESTRAS ANALIZADAS HIDROQUÍMICA EN LA CUENCA DE LOS RÍOS UCHUSUMA Y CAQUENA EN LAS CAMPAÑAS DE MUESTREO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 937
FIGURA 7.260 VALORES DE TEMPERATURA REGISTRADOS EN LAS AGUAS SUPERFICIALES EN LAS CAMPAÑAS REALIZADAS EN LA CUENCA DE LOS RÍOS UCHUSUMA Y CAQUENA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 940
FIGURA 7.261 VALORES DE TEMPERATURA REGISTRADOS EN LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LAS CAMPAÑAS REALIZADAS EN LA CUENCA DE LOS RÍOS UCHUSUMA Y CAQUENA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 940
FIGURA 7.262 VALORES DE PH REGISTRADOS EN LAS AGUAS SUPERFICIALES EN LAS CAMPAÑAS REALIZADAS EN LA CUENCA DE LOS RÍOS UCHUSUMA Y CAQUENA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 942
FIGURA 7.263 VALORES DE PH REGISTRADOS EN LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LAS CAMPAÑAS REALIZADAS EN LA CUENCA DE LOS RÍOS UCHUSUMA Y CAQUENA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 942
FIGURA 7.264 VALORES DE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA REGISTRADOS EN LAS AGUAS SUPERFICIALES EN LAS CAMPAÑAS REALIZADAS EN LA CUENCA DE LOS RÍOS UCHUSUMA Y CAQUENA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 944
FIGURA 7.265 VALORES DE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA REGISTRADOS EN LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LAS CAMPAÑAS REALIZADAS EN LA CUENCA DE LOS RÍOS UCHUSUMA Y CAQUENA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 944

FIGURA 7.266 DIAGRAMAS DE PIPER Y SCHOELLER-BERKALOFF DE LAS MUESTRAS ANALIZADAS HIDROQUÍMICA EN LA CUENCA DE LOS RÍOS UCHUSUMA Y CAQUENA, CAMPAÑA NOVIEMBRE DE 2015. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 948
FIGURA 7.267 DIAGRAMAS DE STIFF DE LAS MUESTRAS ANALIZADAS HIDROQUÍMICA EN LA CUENCA DE LOS RÍOS UCHUSUMA Y CAQUENA, CAMPAÑA NOVIEMBRE DE 2015. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 949
FIGURA 7.268 MUESTRA CQAS-51 TOMADA EN UNA VERTIENTE DE LA QUEBRADA COIPACOIPANI. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 951
FIGURA 7.269 UBICACIÓN DE LAS MUESTRAS ANALIZADAS ISOTÓPICAMENTE EN LA CUENCA DE LOS RÍOS UCHUSUMA Y CAQUENA EN LAS DIFERENTES CAMPAÑAS DE TERRENO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA .. 955
FIGURA 7.270 RELACIÓN $\Delta^{18}O/\Delta D$ DE LAS AGUAS SUPERFICIALES EN LAS CAMPAÑAS REALIZADAS EN LA CUENCA DE LOS RÍOS UCHUSUMA Y CAQUENA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 958
FIGURA 7.271 RELACIÓN $\Delta^{18}O/\Delta D$ DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEA EN LAS CAMPAÑAS REALIZADAS EN LA CUENCA DE LOS RÍOS UCHUSUMA Y CAQUENA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 958
FIGURA 7.272 ESQUEMA DEL MODELO CONCEPTUAL HIDROGEOLÓGICO DE LA CUENCA DE LOS RÍOS UCHUSUMA Y CAQUENA. FUENTE: MODIFICADO DE LA CAPA USO DEL SUELO TOMADA DEL PORTAL WEB DEL SINIA HTTP://IDE.MMA.GOB.CL/ 961
FIGURA 7.273 UBICACIÓN DE LA CUENCA DEL LAGO CHUNGARA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 963
FIGURA 7.274 CURVA HIPSOMÉTRICA DE LA CUENCA DEL LAGO CHUNGARA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 966
FIGURA 7.275 DIAGRAMA UNIFILAR DEL LAGO CHUNGARA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 967
FIGURA 7.276 UBICACIÓN ESTACIONES DE CALIDAD DE AGUA, FLUVIOMÉTRICAS Y METEOROLÓGICAS EN LA CUENCA DEL LAGO CHUNGARA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 969
FIGURA 7.277 PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL REGISTRADA EN LAS ESTACIONES DE LA CUENCA DEL LAGO CHUNGARA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 971
FIGURA 7.278 ISOYETAS DE PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL REGIONAL EN LA CUENCA DEL LAGO CHUNGARA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 973
FIGURA 7.279 VARIACIÓN MENSUAL DE LA PRECIPITACIÓN MEDIA EN LA CUENCA DEL LAGO CHUNGARA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 976
FIGURA 7.280 LOCALIZACIÓN DE LOS SITIOS AFORADOS EN LA CUENCA DEL LAGO CHUNGARA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 981
FIGURA 7.281 ESQUEMA CONCEPTUAL DEL BALANCE HÍDRICO Y SALINO DE UNA LAGUNA EN CLIMA ÁRIDO. FUENTE: RISACHER *ET AL* (1999). 984
FIGURA 7.282 BALANCE HÍDRICO Y SALINO DEL LAGO CHUNGARA. FUENTE: RISACHER *ET AL* (1999). 985

FIGURA 7.283 MAPA GEOLÓGICO DE LA CUENCA DEL LAGO CHUNGARA. FUENTE: MODIFICADO DE GARCÍA *ET AL* (2004). 989
FIGURA 7.284 UBICACIÓN CUENCA DEL LAGO CHUNGARA Y DE LOS PUNTOS TEM REALIZADOS POR MATRAZ (2015). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 993
FIGURA 7.285 PERFIL HIDROGEOLÓGICO DEL MODELO CONCEPTUAL DE CIRCULACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEO EN EL VOLCÁN AJOYA (COMPLEJO VOLCÁNICO CHOQUELIMPIE-JOYA). FUENTE: HERRERA ET AL. (2006). 996
FIGURA 7.286 PERFIL HIDROGEOLÓGICO TEM-1 DEL SECTOR LAGO CHUNGARA-LAGUNAS DE COTACOTANI. FUENTE: MODIFICADO DE MATRAZ (2015). 997
FIGURA 7.287 COLUMNA ESTRATIGRÁFICA DEL SECTOR CHIRIGUAYA. FUENTE: MODIFICADO DE GARCÍA *ET AL.* (2006). 999
FIGURA 7.288 MAPA DE LAS UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS PRESENTES EN LA CUENCA DEL LAGO CHUNGARA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1001
FIGURA 7.289 MAPA PIEZOMÉTRICO INFERIDO DE LA CUENCA DEL LAGO CHUNGARA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1007
FIGURA 7.290 UBICACIÓN DE LAS MUESTRAS ANALIZADAS HIDROQUÍMICA E ISOTÓPICAMENTE EN LOS ANTECEDENTES EN LA CUENCA DEL LAGO CHUNGARA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 1011
FIGURA 7.291 UBICACIÓN DE LAS MUESTRAS ANALIZADAS HIDROQUÍMICA E ISOTÓPICAMENTE EN LA CUENCA DEL LAGO CHUNGARA DURANTE LAS CAMPAÑAS DE MUESTREO EFECTUADAS EN EL PRESENTE ESTUDIO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1015
FIGURA 7.292 DISTRIBUCIÓN DE LOS VALORES DE PH (IZQUIERDA) Y DE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (DERECHA) DE LAS MUESTRAS RECOGIDAS EN LOS ANTECEDENTES EN LA CUENCA DEL LAGO CHUNGARA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 1019
FIGURA 7.293 DIAGRAMAS DE PIPER Y DE SCHOELLER-BERKALOFF DE LAS MUESTRAS ANALIZADAS HIDROQUÍMICAMENTE EN LA CUENCA DEL LAGO CHUNGARA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 1023
FIGURA 7.294 MAPA CON LOS DIAGRAMAS DE STIFF DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS MUESTRAS RECOGIDAS EN LA CUENCA DE LAGO CHUNGARA EN AGOSTO DE 2016. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1025
FIGURA 7.295 REGISTRO DEL CONTENIDO DE ARSÉNICO Y HIERRO EN LA DESEMBOCADURA DEL RÍO CHUNGARA EN EL PERIODO 1983-2014. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 1029
FIGURA 7.296 UBICACIÓN DE LAS MUESTRAS ANALIZADAS ISOTÓPICAMENTE EN LA CUENCA DEL LAGO CHUNGARA EN LOS ANTECEDENTES Y EN LAS DIFERENTES CAMPAÑAS DE TERRENO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1031

FIGURA 7.297 RELACIÓN $\Delta^{18}O/\Delta D$ DE LAS MUESTRAS ANALIZADAS EN ESTUDIOS ANTERIORES EN LA CUENCA DEL LAGO CHUNGARA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1034
FIGURA 7.298 RELACIÓN $\Delta^{18}O/\Delta D$ DE LAS MUESTRAS ANALIZADAS EN LA CUENCA DEL LAGO CHUNGARA, MAYO Y AGOSTO DE 2016. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1035
FIGURA 7.299 ESQUEMA DEL MODELO CONCEPTUAL HIDROGEOLÓGICO DE LA CUENCA DEL LAGO CHUNGARA. FUENTE: MODIFICADO DE LA CAPA USO DEL SUELO TOMADA DEL PORTAL WEB DEL SINIA HTTP://IDE.MMA.GOB.CL/. 1037
FIGURA 7.300 UBICACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO LAUCA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 1039
FIGURA 7.301 CURVA HIPSOMÉTRICA DE LA CUENCA DEL RÍO LAUCA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1043
FIGURA 7.302 DIAGRAMA UNIFILAR DEL RÍO LAUCA. FUENTE: MATRAZ CONSULTORES ASOCIADOS (2015). 1044
FIGURA 7.303 UBICACIÓN ESTACIONES DE CALIDAD DE AGUA, FLUVIOMÉTRICAS Y METEOROLÓGICAS EN LA CUENCA DEL RÍO LAUCA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 1047
FIGURA 7.304 PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL REGISTRADA EN LAS ESTACIONES DE LA CUENCA DEL RÍO LAUCA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 1049
FIGURA 7.305 ISOYETAS DE PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL REGIONAL EN LA CUENCA DEL RÍO LAUCA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 1051
FIGURA 7.306 VARIACIÓN MENSUAL DE LA PRECIPITACIÓN MEDIA EN LA CUENCA DEL RÍO LAUCA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 1054
FIGURA 7.307 EVAPORACIÓN MEDIA MENSUAL POTENCIAL EN ESTACIONES UBICADAS EN CUENCAS ALTIPLÁNICAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1057
FIGURA 7.308 CAUDAL MEDIO MENSUAL EN EL RÍO LAUCA Y SU RELACIÓN CON LA PRECIPITACIÓN MEDIA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 1061
FIGURA 7.309 CURVAS DE VARIACIÓN ESTACIONAL ASOCIADAS A PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA DE 15% Y 85% Y CAUDAL MEDIO MENSUAL EN LAS ESTACIONES FLUVIOMÉTRICAS DE LA CUENCA DEL RÍO LAUCA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 1063
FIGURA 7.310 LOCALIZACIÓN DE LOS AFOROS HISTÓRICOS EN LA CUENCA DEL RÍO LAUCA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1065
FIGURA 7.311 LOCALIZACIÓN DE LAS CAMPAÑAS DE AFORO EN LA CUENCA DEL RÍO LAUCA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1067
FIGURA 7.312 ESQUEMA EN EL MODELO HIDROLÓGICO HEC-HMS DE LA CUENCA DEL RÍO LAUCA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 1075

FIGURA 7.313 COMPARACIÓN CAUDALES MEDIOS ANUALES OBSERVADOS Y SIMULADOS EN LA SUBCUENCA RÍO LAUCA EN ESTANCIA EL LAGO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 1078
FIGURA 7.314 COMPARACIÓN CAUDALES MEDIOS ANUALES OBSERVADOS Y SIMULADOS EN LA SUBCUENCA RÍO LAUCA EN JAPU. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 1079
FIGURA 7.315 MAPA GEOLÓGICO DE LA CUENCA DEL RÍO LAUCA. FUENTE: MODIFICADO DE GARCÍA *ET AL.* (2004). 1085
FIGURA 7.316 UBICACIÓN DE LOS PERFILES HIDROGEOLÓGICOS REALIZADOS EN LA CUENCA DEL RÍO LAUCA. FUENTE: MODIFICADO DE MATRAZ (2015). 1093
FIGURA 7.317 PERFILES HIDROGEOLÓGICOS E1-E2-E3 DE LOS SECTORES LAUCA ALTO, MEDIO Y BAJO PARALELOS AL RÍO LAUCA. FUENTE: MODIFICADO DE MATRAZ (2015). CONTINÚA EN PÁGINA SIGUIENTE 1095
FIGURA 7.318 UBICACIÓN DE LOS SONDAJES EXISTENTES EN LA CUENCA DEL RÍO LAUCA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1101
FIGURA 7.319 MAPA PIEZOMÉTRICO DE LA CUENCA DEL RÍO LAUCA. FUENTE: MATRAZ (2015). 1106
FIGURA 7.320 UBICACIÓN DE LOS PUNTOS DE AGUAS SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEAS MUESTREADOS EN LOS ANTECEDENTES DE LA CUENCA DEL RÍO LAUCA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1109
FIGURA 7.321 UBICACIÓN DE LAS MUESTRAS ANALIZADAS HIDROQUÍMICA E ISOTÓPICAMENTE EN LA CUENCA DEL RÍO LAUCA EN LA CAMPAÑA DE AGOSTO 2016. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1113
FIGURA 7.322 DISTRIBUCIÓN DE LOS VALORES DE PH DE LAS MUESTRAS RECOGIDAS EN LA CUARTA CAMPAÑA DE TERRENO, AGOSTO 2016, EN LA CUENCA DEL RÍO LAUCA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1117
FIGURA 7.323 DISTRIBUCIÓN DE LOS VALORES DE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA DE LAS MUESTRAS RECOGIDAS EN LA CUARTA CAMPAÑA DE TERRENO, AGOSTO 2016, EN LA CUENCA DEL RÍO LAUCA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1119
FIGURA 7.324 DIAGRAMAS DE PIPER Y DE SCHOELLER-BERKALOFF DE LAS MUESTRAS ANALIZADAS HIDROQUÍMICA EN AGOSTO DE 2016 EN LA CUENCA DEL RÍO LAUCA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1123
FIGURA 7.325 MAPA CON LOS DIAGRAMAS DE STIFF DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS MUESTRAS RECOGIDAS EN LA CUENCA DEL RÍO LAUCA EN AGOSTO DE 2016. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ... 1125
FIGURA 7.326 UBICACIÓN DE LAS MUESTRAS ANALIZADAS ISOTÓPICAMENTE EN LA CUENCA DEL RÍO LAUCA EN LOS ANTECEDENTES Y EN LA 4° CAMPAÑA DE TERRENO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.... 1129
FIGURA 7.327 RELACIÓN $\Delta^{18}O/\Delta D$ DE LAS MUESTRAS ANALIZADAS EN LA CUENCA DEL RÍO LAUCA EN SEPTIEMBRE DE 2014 POR MATRAZ (2015) Y SU UBICACIÓN. FUENTE: MATRAZ (2015). 1133

FIGURA 7.328 RELACIÓN $\Delta^{18}O/\Delta D$ DE LAS MUESTRAS ANALIZADAS EN LA CUENCA DEL RÍO LAUCA EN ABRIL DE 2015 POR MATRAZ (2015) Y SU UBICACIÓN. FUENTE: MATRAZ (2015). 1134
FIGURA 7.329 RELACIÓN $\Delta^{18}O/\Delta D$ DE LAS MUESTRAS ANALIZADAS EN LA CUENCA DEL RÍO LAUCA, AGOSTO DE 2016. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 1135
FIGURA 7.330 POZO N°6 PROPIEDAD DEL MOP UBICADO EN EL SECTOR NORTE DE LA CUENCA DEL RÍO LAUCA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 1138
FIGURA 7.331 ESQUEMA DEL MODELO CONCEPTUAL HIDROGEOLÓGICO DE LA CUENCA DEL RÍO LAUCA. FUENTE: MODIFICADO DE LA CAPA USO DEL SUELO TOMADA DEL PORTAL WEB DEL SINIA HTTP://IDE.MMA.GOB.CL/. 1139
FIGURA 7.332 UBICACIÓN DE LA CUENCA DEL SALAR DE SURIRE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA... 1141
FIGURA 7.333 CURVA HIPSOMÉTRICA DE LA CUENCA DEL SALAR DE SURIRE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 1145
FIGURA 7.334 DIAGRAMA UNIFILAR DEL SALAR SURIRE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 1146
FIGURA 7.335 UBICACIÓN ESTACIONES METEOROLÓGICAS EN LA CUENCA DEL SALAR DE SURIRE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 1147
FIGURA 7.336 PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL REGISTRADA EN LA ESTACIÓN CHILCAYA EN LA CUENCA DEL SALAR DE SURIRE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 1149
FIGURA 7.337 ISOYETAS DE PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL REGIONAL EN LA CUENCA DEL SALAR SURIRE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 1151
FIGURA 7.338 VARIACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL EN LA CUENCA DEL SALAR SURIRE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 1153
FIGURA 7.339 LOCALIZACIÓN DE LOS AFOROS HISTÓRICOS EN LA CUENCA DEL SALAR DE SURIRE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 1157
FIGURA 7.340 LOCALIZACIÓN DE LAS CAMPAÑAS DE AFORO EN LA CUENCA DEL SALAR DE SURIRE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 1159
FIGURA 7.341 FLUCTUACIÓN DE NIVELES EN LOS PUNTOS DE MONITOREO SELECCIONADOS EN LA CUENCA DEL SALAR DE SURIRE. FUENTE: "PROGRAMA DE SEGUIMIENTO AMBIENTAL, EXTRACCIÓN DE ULEXITA EN EL SALAR DE SURIRE" DE QUIBORAX (2009). CONTINUA EN PÁGINAS SIGUIENTES..... 1161
FIGURA 7.342 MAPA GEOLÓGICO DE LA CUENCA DEL SALAR DE SURIRE. FUENTE: MODIFICADO DE GARCÍA *ET AL* (2004). 1171
FIGURA 7.343 UBICACIÓN DE LOS PERFILES GEOLÓGICOS A-B Y C-D Y DE LOS SONDAJES EN LA CUENCA DEL SALAR DE SURIRE. FUENTE: MODIFICADO DE SALAS *ET AL.* (1975)..... 1175
FIGURA 7.344 PERFILES GEOLÓGICOS DEL RELLENO DE LA CUENCA DEL SALAR DE SURIRE. FUENTE: SALAS (1975)..... 1177

FIGURA 7.345 PERFIL HIDROGEOLÓGICO ENTRE LA CUENCA DEL SALAR DE SURIRE Y LA CUENCA DEL RÍO LAUCA. FUENTE: MATRAZ (2015). 1178
FIGURA 7.346 MAPA DE LAS UNIDADES SEGÚN LA IMPORTANCIA HIDROGEOLÓGICA PRESENTES EN LA CUENCA DEL SALAR DE SURIRE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1181
FIGURA 7.347 MAPA PIEZOMÉTRICO INFERIDO DE LA CUENCA DEL SALAR DE SURIRE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1187
FIGURA 7.348 UBICACIÓN DE LAS MUESTRAS DE AGUA ANALIZADAS HIDROQUÍMICAMENTE EN LOS ESTUDIOS ANTERIORES EN LA CUENCA DEL SALAR DE SURIRE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1191
FIGURA 7.349 COMPOSICIÓN ISOTÓPICA DE LAS MUESTRAS ANALIZADAS EN EL SALAR DE SURIRE POR SALAS (1975). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 1193
FIGURA 7.350 DIAGRAMAS DE PIPER Y DE SCHOELLER-BERKALOFF DE LAS MUESTRAS ANALIZADAS HIDROQUÍMICAMENTE EN EL SALAR DE SURIRE POR RISACHER *ET AL.* (1999). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1195
FIGURA 7.351 COMPOSICIÓN ISOTÓPICA DE LAS MUESTRAS ANALIZADAS POR RISACHER *ET AL*. (1999) EN EL AÑO 1995 EN LA CUENCA DEL SALAR DE SURIRE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1196
FIGURA 7.352 UBICACIÓN DE LAS MUESTRAS ANALIZADAS HIDROQUÍMICAMENTE EN LA CUENCA DEL SALAR DE SURIRE EN LAS DIFERENTES CAMPAÑAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1199
FIGURA 7.353 VALORES DE TEMPERATURA REGISTRADOS EN LAS AGUAS SUPERFICIALES EN LAS CAMPAÑAS REALIZADAS EN LA CUENCA DEL SALAR DE SURIRE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 1202
FIGURA 7.354 VALORES DE PH REGISTRADOS EN LAS AGUAS SUPERFICIALES EN LAS CAMPAÑAS REALIZADAS EN LA CUENCA DEL SALAR DE SURIRE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 1203
FIGURA 7.355 VALORES DE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA REGISTRADOS EN LAS AGUAS SUPERFICIALES EN LAS CAMPAÑAS REALIZADAS EN LA CUENCA DEL SALAR DE SURIRE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA... 1204
FIGURA 7.356 DIAGRAMAS DE PIPER Y DE SCHOELLER-BERKALOFF DE LAS MUESTRAS ANALIZADAS HIDROQUÍMICAMENTE EN LAS DIFERENTES CAMPAÑAS EN LA CUENCA DEL SALAR DE SURIRE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1206
FIGURA 7.357 MAPA CON LOS DIAGRAMAS DE STIFF DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS MUESTRAS RECOGIDAS EN LA CUENCA DEL SALAR DE SURIRE EN AGOSTO DE 2016. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1207
FIGURA 7.358 VERTIENTE HIDROTERMAL POLLEQUERE, UBICADA AL SURESTE DEL SALAR DE SURIRE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 1210
FIGURA 7.359 UBICACIÓN DE LAS MUESTRAS ANALIZADAS ISOTÓPICAMENTE EN LA CUENCA DEL SALAR DE SURIRE EN LAS DIFERENTES CAMPAÑAS DE TERRENO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1213

FIGURA 7.360 RELACIÓN $\Delta^{18}O/\Delta D$ DE LAS MUESTRAS ANALIZADAS EN LA CUENCA DEL SALAR DE SURIRE, NOVIEMBRE DE 2015 (MORADO), MAYO DE 2016 (VERDE) Y AGOSTO DE 2016 (NARANJO). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1216
FIGURA 7.361 ESQUEMA DEL MODELO CONCEPTUAL HIDROGEOLÓGICO DE LA CUENCA DEL SALAR DE SURIRE. FUENTE: MODIFICADO DE LA CAPA USO DEL SUELO TOMADA DEL PORTAL WEB DEL SINIA HTTP://IDE.MMA.GOB.CL/. 1219
FIGURA 8.1 ESQUEMA CONCEPTUAL DEL BALANCE HÍDRICO GENERAL DE UNA CUENCA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1222
FIGURA 8.2 ESQUEMA CONCEPTUAL DEL BALANCE HÍDRICO EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA DE LA CONCORDIA (TERRITORIO CHILENO). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1226
FIGURA 8.3. ESQUEMA CONCEPTUAL DEL BALANCE HÍDRICO EN LA SUBCUENCA DEL RÍO LLUTA EN ALCERRECA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 1230
FIGURA 8.4. ESQUEMA CONCEPTUAL DEL BALANCE HÍDRICO EN LA SUBCUENCA DEL RÍO LLUTA ENTRE ALCERRECA Y SOCOROMA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 1233
FIGURA 8.5 ESQUEMA CONCEPTUAL DEL BALANCE HÍDRICO EN LA SUBCUENCA DEL RÍO LLUTA ENTRE SOCOROMA Y PANAMERICANA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1235
FIGURA 8.6 ESQUEMA CONCEPTUAL DEL BALANCE HÍDRICO EN LA SUBCUENCA DEL RÍO LLUTA ENTRE ALCÉRRECA Y PANAMERICANA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1237
FIGURA 8.7. ESQUEMA CONCEPTUAL DEL BALANCE HÍDRICO EN LA SUBCUENCA DEL RÍO SAN JOSÉ EN AUSIPAR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 1241
FIGURA 8.8. ESQUEMA CONCEPTUAL DEL BALANCE HÍDRICO EN LA SUBCUENCA RÍO SAN JOSÉ BAJO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1244
FIGURA 8.9 ESQUEMA CONCEPTUAL DEL BALANCE HÍDRICO EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA CHACA-VITOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 1249
FIGURA 8.10. ESQUEMA CONCEPTUAL DEL BALANCE HÍDRICO EN LA SUBCUENCA DEL RÍO CAMARONES EN CHILPE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 1253
FIGURA 8.11. ESQUEMA CONCEPTUAL DEL BALANCE HÍDRICO EN LA SUBCUENCA DEL RÍO CAMARONES ENTRE CHILPE Y CONANOXA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 1256
FIGURA 8.12. ESQUEMA CONCEPTUAL DEL BALANCE HÍDRICO EN LA SUBCUENCA RÍO CAQUENA EN VERTEDERO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1260
FIGURA 8.13 ESQUEMA CONCEPTUAL DEL BALANCE HÍDRICO EN LA CUENCA DEL LAGO CHUNGARA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1267
FIGURA 8.14 ESQUEMA CONCEPTUAL DEL BALANCE HÍDRICO EN LA CUENCA DEL RÍO LAUCA EN JAPU. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1271

FIGURA 8.15. ESQUEMA CONCEPTUAL DEL BALANCE HÍDRICO EN LA CUENCA DEL SALAR DE SURIRE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 1275
FIGURA 9.1 DISTRIBUCIÓN GRÁFICA Y LA VARIACIÓN ENTRE EL CENSO 2002 Y EL 2012. FUENTE: SÍNTESIS DE RESULTADOS REGIÓN ARICA Y PARINACOTA. INE. 2012. HTTP://WWW.INEARICAYPARINACOTA.CL/ARCHIVOS/FILES/PDF/NOTICIAS/2013/04/PRESENTACION%20SINTESIS%20CENSO%2002042013.PDF..... 1299
FIGURA 9.2 DISTRIBUCIÓN POR ETNIAS EN LA REGIÓN DE ARICA Y PARINACOTA. FUENTE: SÍNTESIS DE RESULTADOS REGIÓN ARICA Y PARINACOTA. INE. 2012. HTTP://WWW.INEARICAYPARINACOTA.CL/ARCHIVOS/FILES/PDF/NOTICIAS/2013/04/PRESENTACION%20SINTESIS%20CENSO..... 1300
FIGURA 9.3 TALLERES DE PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL PROYECTO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 1302

Índice de tablas

TABLA 4.1 DISTRIBUCIÓN ÉTNICA EN LA REGIÓN DE ARICA Y PARINACOTA. FUENTE: INE (2002). 8
TABLA 4.2 DISTRIBUCIÓN ÉTNICA EN LA REGIÓN DE ARICA Y PARINACOTA. FUENTE: INE (2012). 9
TABLA 4.3 EVOLUCIÓN DE LA POBLACIÓN INDÍGENA EN LA REGIÓN DE ARICA Y PARINACOTA. FUENTE: CASEN 2013. PUEBLOS INDÍGENAS. SÍNTESIS DE RESULTADOS. MINISTERIO DE DESARROLLO SOCIAL. 15 MARZO 2015. 9
TABLA 4.4 DISTRIBUCIÓN DE LA POBLACIÓN EN LA REGIÓN DE ARICA Y PARINACOTA. FUENTE: HTTP://SIR.MIDEPLAN.CL MARZO DE 2009. 10
TABLA 4.5 ESTRUCTURA DE LA DISTRIBUCIÓN DE LAS REUNIONES DE LA PRESENTACIÓN DEL PROYECTO A LAS COMUNIDADES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 11
TABLA 4.6 ESTRUCTURA DE LAS PRESENTACIONES DEL PROYECTO A LAS COMUNIDADES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 13
TABLA 4.7 LUGARES Y FECHAS DE LAS PRESENTACIONES A LAS COMUNIDADES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 14
TABLA 5.1 RESUMEN DE ESTACIONES FLUVIOMÉTRICAS, METEOROLÓGICAS, SEDIMENTOLÓGICAS Y DE CALIDAD DE AGUAS CONTROLADAS POR LA DGA. 23
TABLA 6.1 DERECHOS DE APROVECHAMIENTO ORIGINARIOS, CAUDAL EN L/S, ACCIONES Y MINUTOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 73
TABLA 6.2 DERECHOS DE APROVECHAMIENTO DE AGUAS Y SU DISTRIBUCIÓN EN ND Y NR, SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEOS, CAUDALES EN L/S, ACCIONES Y MINUTOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 74
TABLA 6.3 ESTADO DE REGULARIZACIÓN DE DERECHOS NR, SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 76
TABLA 6.4 REGULARIZACIÓN DE DERECHOS NR SOLICITADOS, DERECHOS INSCRITOS Y EXPEDIENTES ENCONTRADOS SEGÚN SU NATURALEZA SUPERFICIAL O SUBTERRÁNEA, CAUDALES EN L/S, ACCIONES Y MINUTOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 76
TABLA 6.5 DERECHOS DE APROVECHAMIENTO DE AGUAS Y SU DISTRIBUCIÓN EN SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEOS. CAUDALES EN L/S, ACCIONES Y MINUTOS EN LA CUENCA DE QUEBRADA DE LA CONCORDIA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 78
TABLA 6.6 DERECHOS DE APROVECHAMIENTO DE AGUAS Y SU DISTRIBUCIÓN EN ND Y NR, SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEOS. CAUDALES EN L/S, ACCIONES Y MINUTOS EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA DE LA CONCORDIA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 78

TABLA 6.7 DERECHOS DE APROVECHAMIENTO DE AGUAS ND Y SU DISTRIBUCIÓN SEGÚN PROCEDIMIENTO. CAUDALES EN L/S, ACCIONES Y MINUTOS EN LA CUENCA DE QUEBRADA DE LA CONCORDIA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 78
TABLA 6.8 RESUMEN DERECHOS DE APROVECHAMIENTO DE AGUAS ND Y SU DISTRIBUCIÓN SEGÚN PROCEDIMIENTO. CAUDALES EN L/S, ACCIONES Y MINUTOS EN LA CUENCA DE QUEBRADA DE LA CONCORDIA Y DERECHOS POTENCIALES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 79
TABLA 6.9 ESTADO DE REGULARIZACIÓN DE DERECHOS NR, SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEOS EN LA CUENCA DE LA CONCORDIA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 81
TABLA 6.10 REGULARIZACIÓN DE DERECHOS NR SOLICITADOS, DERECHOS INSCRITOS Y EXPEDIENTES ENCONTRADOS SEGÚN SU NATURALEZA SUPERFICIAL O SUBTERRÁNEA, CAUDALES EN L/S, ACCIONES Y MINUTOS EN LA CUENCA DE LA CONCORDIA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 81
TABLA 6.11 DERECHOS DE APROVECHAMIENTO DE AGUAS Y SU DISTRIBUCIÓN SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEOS. CAUDALES EN L/S, ACCIONES Y MINUTOS EN LA CUENCA DEL RÍO LLUTA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 82
TABLA 6.12 DERECHOS DE APROVECHAMIENTO DE AGUAS Y SU DISTRIBUCIÓN EN ND Y NR, SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEOS. CAUDALES EN L/S, ACCIONES Y MINUTOS EN LA CUENCA DEL RÍO LLUTA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 82
TABLA 6.13 DERECHOS DE APROVECHAMIENTO DE AGUAS ND Y SU DISTRIBUCIÓN SEGÚN PROCEDIMIENTO. CAUDALES EN L/S, ACCIONES Y MINUTOS EN LA CUENCA DEL RÍO LLUTA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 83
TABLA 6.14 RESUMEN DERECHOS DE APROVECHAMIENTO DE AGUAS ND Y SU DISTRIBUCIÓN SEGÚN PROCEDIMIENTO. CAUDALES EN L/S, ACCIONES Y MINUTOS EN LA CUENCA DEL RÍO LLUTA Y DERECHOS POTENCIALES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 84
TABLA 6.15 ESTADO DE REGULARIZACIÓN DE DERECHOS NR, SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEOS EN LA CUENCA DEL RÍO LLUTA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 86
TABLA 6.16 REGULARIZACIÓN DE DERECHOS NR SOLICITADOS, DERECHOS INSCRITOS Y EXPEDIENTES ENCONTRADOS SEGÚN SU NATURALEZA SUPERFICIAL O SUBTERRÁNEA, CAUDALES EN L/S, ACCIONES Y MINUTOS EN LA CUENCA DEL RÍO LLUTA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 86
TABLA 6.17 DERECHOS DE APROVECHAMIENTO DE AGUAS Y SU DISTRIBUCIÓN EN SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEOS. CAUDALES EN L/S, ACCIONES Y MINUTOS EN LA CUENCA DEL RÍO SAN JOSÉ. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 87

TABLA 6.18 DERECHOS DE APROVECHAMIENTO DE AGUAS Y SU DISTRIBUCIÓN EN ND Y NR, SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEOS. CAUDALES EN L/S, ACCIONES Y MINUTOS EN LA CUENCA DEL RÍO SAN JOSÉ. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 87
TABLA 6.19 DERECHOS DE APROVECHAMIENTO DE AGUAS ND Y SU DISTRIBUCIÓN SEGÚN PROCEDIMIENTO. CAUDALES EN L/S, ACCIONES Y MINUTOS EN LA CUENCA DEL RÍO SAN JOSÉ. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 88
TABLA 6.20 RESUMEN DERECHOS DE APROVECHAMIENTO DE AGUAS ND Y SU DISTRIBUCIÓN SEGÚN PROCEDIMIENTO. CAUDALES EN L/S, ACCIONES Y MINUTOS EN LA CUENCA DEL RÍO SAN JOSÉ Y DERECHOS POTENCIALES. FUENTE ELABORACIÓN PROPIA..... 88
TABLA 6.21 ESTADO DE REGULARIZACIÓN DE DERECHOS NR, SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEOS EN LA CUENCA DEL RÍO SAN JOSÉ. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 90
TABLA 6.22 REGULARIZACIÓN DE DERECHOS NR SOLICITADOS, DERECHOS INSCRITOS Y EXPEDIENTES ENCONTRADOS SEGÚN SU NATURALEZA SUPERFICIAL O SUBTERRÁNEA, CAUDALES EN L/S, ACCIONES Y MINUTOS EN LA CUENCA DEL RÍO SAN JOSÉ. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 90
TABLA 6.23 DERECHOS DE APROVECHAMIENTO DE AGUAS Y SU DISTRIBUCIÓN EN SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEOS. CAUDALES EN L/S, ACCIONES Y MINUTOS EN LA CUENCA COSTERAS R. SAN JOSÉ-Q. CAMARONES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 91
TABLA 6.24 DERECHOS DE APROVECHAMIENTO DE AGUAS Y SU DISTRIBUCIÓN EN ND Y NR, SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEOS. CAUDALES EN L/S, ACCIONES Y MINUTOS EN LA CUENCA COSTERAS R. SAN JOSÉ-Q. CAMARONES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 91
TABLA 6.25 DERECHOS DE APROVECHAMIENTO DE AGUAS ND Y SU DISTRIBUCIÓN SEGÚN PROCEDIMIENTO. CAUDALES EN L/S, ACCIONES Y MINUTOS EN LA CUENCA COSTERAS R. SAN JOSÉ-Q. CAMARONES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 92
TABLA 6.26 RESUMEN DERECHOS DE APROVECHAMIENTO DE AGUAS ND Y SU DISTRIBUCIÓN SEGÚN PROCEDIMIENTO. CAUDALES EN L/S, ACCIONES Y MINUTOS CUENCA COSTERAS R. SAN JOSÉ-Q. CAMARONES Y DERECHOS POTENCIALES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 92
TABLA 6.27 ESTADO DE REGULARIZACIÓN DE DERECHOS NR, SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEOS EN LAS CUENCAS COSTERAS SAN JOSÉ-CAMARONES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 94
TABLA 6.28 REGULARIZACIÓN DE DERECHOS NR SOLICITADOS, DERECHOS INSCRITOS Y EXPEDIENTES ENCONTRADOS SEGÚN SU NATURALEZA SUPERFICIAL O SUBTERRÁNEA, CAUDALES EN L/S, ACCIONES Y MINUTOS EN LAS CUENCAS COSTERAS SAN JOSÉ-CAMARONES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 94
TABLA 6.29 DERECHOS DE APROVECHAMIENTO DE AGUAS Y SU DISTRIBUCIÓN EN SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEOS. CAUDALES EN L/S, ACCIONES Y MINUTOS EN LA CUENCA DEL RÍO CAMARONES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 95

TABLA 6.30 DERECHOS DE APROVECHAMIENTO DE AGUAS Y SU DISTRIBUCIÓN EN ND Y NR, SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEOS. CAUDALES EN L/S, ACCIONES Y MINUTOS EN LA CUENCA DEL RÍO CAMARONES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 95
TABLA 6.31 DERECHOS DE APROVECHAMIENTO DE AGUAS ND Y SU DISTRIBUCIÓN SEGÚN PROCEDIMIENTO. CAUDALES EN L/S, ACCIONES Y MINUTOS EN LA CUENCA DEL RÍO CAMARONES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 96
TABLA 6.32 RESUMEN DERECHOS DE APROVECHAMIENTO DE AGUAS ND Y SU DISTRIBUCIÓN SEGÚN PROCEDIMIENTO. CAUDALES EN L/S, ACCIONES Y MINUTOS EN LA CUENCA DEL RÍO CAMARONES Y DERECHOS POTENCIALES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 96
TABLA 6.33 ESTADO DE REGULARIZACIÓN DE DERECHOS NR, SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEOS EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA CAMARONES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 98
TABLA 6.34 REGULARIZACIÓN DE DERECHOS NR SOLICITADOS, DERECHOS INSCRITOS Y EXPEDIENTES ENCONTRADOS SEGÚN SU NATURALEZA SUPERFICIAL O SUBTERRÁNEA, CAUDALES EN L/S, ACCIONES Y MINUTOS EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA CAMARONES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 98
TABLA 6.35 DERECHOS DE APROVECHAMIENTO ORIGINARIOS Y SU DISTRIBUCIÓN EN SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEOS. CAUDAL EN L/S, ACCIONES Y MINUTOS EN LAS CUENCAS ALTIPLÁNICAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 99
TABLA 6.36 DERECHOS DE APROVECHAMIENTO DE AGUAS Y SU DISTRIBUCIÓN EN ND Y NR, SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEOS. CAUDALES EN L/S, ACCIONES Y MINUTOS EN LAS CUENCAS ALTIPLÁNICAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 99
TABLA 6.37 DERECHOS DE APROVECHAMIENTO DE AGUAS ND Y SU DISTRIBUCIÓN SEGÚN PROCEDIMIENTO. CAUDALES EN L/S, ACCIONES Y MINUTOS EN LAS CUENCAS ALTIPLÁNICAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 100
TABLA 6.38 RESUMEN DERECHOS DE APROVECHAMIENTO DE AGUAS ND Y SU DISTRIBUCIÓN SEGÚN PROCEDIMIENTO. CAUDALES EN L/S, ACCIONES Y MINUTOS EN LAS CUENCAS ALTIPLÁNICAS Y DERECHOS POTENCIALES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 100
TABLA 6.39 ESTADO DE REGULARIZACIÓN DE DERECHOS NR, SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEOS EN LAS CUENCAS ALTIPLÁNICAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 102
TABLA 6.40 REGULARIZACIÓN DE DERECHOS NR SOLICITADOS, DERECHOS INSCRITOS Y EXPEDIENTES ENCONTRADOS SEGÚN SU NATURALEZA SUPERFICIAL O SUBTERRÁNEA, CAUDALES EN L/S, ACCIONES Y MINUTOS EN LAS CUENCAS ALTIPLÁNICAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 102
TABLA 6.41 CAUDALES REFERENCIALES (85% PROB.EXC.) DE LAS CUENCAS PARA EL CÁLCULO DE LA DOTACIÓN HIDROLÓGICA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 107

TABLA 6.42 DAA ASOCIADOS A CUENCA RÍO LLUTA, RÍO LLUTA ALTO. FUENTE: ELABORACIÓN A PARTIR DE BASE DE COMUNIDADES 108
TABLA 6.43 DAA ASOCIADOS A CUENCA RÍO LLUTA, RÍO LLUTA BAJO. FUENTE: ELABORACIÓN A PARTIR DE BASE DE COMUNIDADES 109
TABLA 6.44 DAA ASOCIADOS A CUENCA RÍO SAN JOSÉ, AZAPA ALTO. FUENTE: ELABORACIÓN A PARTIR DE BASE DE COMUNIDADES 111
TABLA 6.45 DAA ASOCIADOS A CUENCA RÍO SAN JOSÉ EN RÍO SAN JOSÉ. FUENTE: ELABORACIÓN A PARTIR DE BASE DE COMUNIDADES 115
TABLA 6.46 DAA ASOCIADOS A CUENCA COSTERAS R. SAN JOSÉ-Q.CAMARONES, QUEBRADA VÍTOR. FUENTE: ELABORACIÓN A PARTIR DE BASE DE COMUNIDADES 116
TABLA 6.47 DAA ASOCIADOS A CUENCA Q. RÍO CAMARONES. FUENTE: ELABORACIÓN A PARTIR DE BASE DE COMUNIDADES. 118
TABLA 6.48 DAA ASOCIADOS A CUENCA RÍO CAQUENA. FUENTE: ELABORACIÓN A PARTIR DE BASE DE COMUNIDADES Y USUARIOS. 119
TABLA 6.49 DAA ASOCIADOS A CUENCA RÍOS UCHUSUMA Y CAQUENA. FUENTE: ELABORACIÓN A PARTIR DE BASE DE COMUNIDADES Y USUARIOS. 120
TABLA 6.50 DAA ASOCIADOS A CUENCA RÍO LAUCA. FUENTE: ELABORACIÓN A PARTIR DE BASE DE COMUNIDADES Y USUARIOS. 121
TABLA 6.51 SIMBOLOGÍA TENTATIVA PARA LA VISUALIZACIÓN GRÁFICA DE LA PLATAFORMA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 130
TABLA 6.52 RESUMEN DE LA SITUACIÓN DEL CATASTRO DE EXPEDIENTES NR DE LAS CAPTACIONES SIN COORDENADAS EN EL CPA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 135
TABLA 6.53 RESUMEN DE LA SITUACIÓN DEL CATASTRO DE EXPEDIENTES ND DE LAS CAPTACIONES SIN COORDENADAS EN LA CPA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 138
TABLA 6.54 RESUMEN DE LOS EXPEDIENTES DE LA CPA DE LA DGA CON Y SIN COORDENADAS GEOGRÁFICAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 141
TABLA 6.55 RESUMEN DE LAS DEMANDAS ACTUALES (L/S) EN LA XV REGIÓN DE ARICA Y PARINACOTA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 148
TABLA 6.56 DEMANDA DE AGUA POTABLE DE LAS INSTALACIONES PÚBLICAS DE LA CUENCA DE LA QUEBRADA DE LA CONCORDIA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 149
TABLA 6.57 NÚMERO DE CABEZAS DE GANADO Y DEMANDA ANUAL DE AGUA (Nº Y LITROS - M^3) EN LA CUENCA DEL RÍO LLUTA. FUENTE: AYALA, CABRERA Y ASOC (2007). 150
TABLA 6.58 NÚMERO DE AVES Y DEMANDA ANUAL DE AGUA (Nº Y LITROS - M^3) EN LA CUENCA DEL RÍO LLUTA. FUENTE: AYALA, CABRERA Y ASOC (2007). 150

TABLA 6.59 DEMANDA DE AGUA POR USO AGRÍCOLA POR MES Y AÑO (HA Y M^3) EN LA CUENCA DEL RÍO LLUTA. FUENTE: AYALA, CABRERA Y ASOC (2007). 151
TABLA 6.60 DEMANDA DE AGUA POTABLE DE LOCALIDADES DE LA CUENCA DEL RÍO LLUTA. FUENTE: MODIFICADO DE AYALA, CABRERA Y ASOC (2007) Y AGUAS DEL ALTIPLANO (2016). 152
TABLA 6.61 NÚMERO DE CABEZAS DE GANADO Y DEMANDA ANUAL DE AGUA (Nº Y LITROS - M^3) EN LA CUENCA DEL RÍO SAN JOSÉ. FUENTE: AYALA, CABRERA Y ASOC (2007). 153
TABLA 6.62 NÚMERO DE AVES Y DEMANDA ANUAL DE AGUA (Nº Y LITROS - M^3) EN LA CUENCA DEL RÍO SAN JOSÉ. FUENTE: AYALA, CABRERA Y ASOC (2007). 153
TABLA 6.63 DEMANDA DE AGUA POR USO AGRÍCOLA POR MES Y AÑO (HA Y M^3) EN LA CUENCA DEL RÍO SAN JOSÉ. FUENTE: MODIFICADO DE AYALA, CABRERA Y ASOC (2007) 155
TABLA 6.64 DEMANDA DE AGUA POTABLE DE ARICA. FUENTE: AGUAS DEL ALTIPLANO (2016). 156
TABLA 6.65 DEMANDA DE AGUA POTABLE RURAL DE LOCALIDADES DE LA CUENCA DEL RÍO SAN JOSÉ. FUENTE: MODIFICADO DE AYALA, CABRERA Y ASOC (2007) Y AGUAS DEL ALTIPLANO (2016). 156
TABLA 6.66 RESUMEN DE LA DEMANDA DE AGUA POR ACTIVIDADES INDUSTRIALES DE ARICA EN LA CUENCA DEL RÍO SAN JOSÉ. FUENTE: AYALA, CABRERA Y ASOC (2007). 157
TABLA 6.67 NÚMERO DE CABEZAS DE GANADO, Y DEMANDA ANUAL DE AGUA (Nº Y LITROS - M^3) EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA CHACA-VÍTOR. FUENTE: AYALA, CABRERA Y ASOC (2007). 158
TABLA 6.68 NÚMERO DE AVES Y DEMANDA ANUAL DE AGUA (Nº Y LITROS - M^3) EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA CHACA-VÍTOR. FUENTE: AYALA, CABRERA Y ASOC (2007). 158
TABLA 6.69 DEMANDA DE AGUA POR USO AGRÍCOLA POR MES Y AÑO (HA Y M^3) EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA CHACA-VÍTOR. FUENTE: AYALA, CABRERA Y ASOC (2007). 159
TABLA 6.70 DEMANDA DE AGUA POTABLE DE LAS LOCALIDADES DE LA CUENCA DE LA QUEBRADA CHACA-VÍTOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 160
TABLA 6.71 NÚMERO DE CABEZAS DE GANADO, Y DEMANDA ANUAL DE AGUA (Nº Y LITROS - M^3) EN LA CUENCA DEL RÍO CAMARONES. FUENTE: AYALA, CABRERA Y ASOC (2007). 161
TABLA 6.72 NÚMERO DE AVES Y DEMANDA ANUAL DE AGUA (Nº Y LITROS - M^3) EN LA CUENCA DEL RÍO CAMARONES. FUENTE: AYALA, CABRERA Y ASOC (2007). 161
TABLA 6.73 DEMANDA DE AGUA POR USO AGRÍCOLA POR MES Y AÑO (HA Y M^3) EN LA CUENCA DEL RÍO CAMARONES. FUENTE: AYALA, CABRERA Y ASOC (2007). 162
TABLA 6.74 DEMANDA DE AGUA POTABLE DE LAS LOCALIDADES DE LA CUENCA DEL RÍO CAMARONES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 163
TABLA 6.75 NÚMERO DE CABEZAS DE GANADO Y DEMANDA ANUAL DE AGUA (Nº Y LITROS - M^3). FUENTE: AYALA, CABRERA Y ASOC (2007) 164

TABLA 6.76 DEMANDA DE AGUA POR USO AGRÍCOLA POR MES Y AÑO (HA Y M^3). FUENTE: MODIFICADO DE AYALA, CABRERA Y ASOC (2007). 165
TABLA 6.77 DEMANDA DE AGUA POTABLE RURAL DE LOCALIDADES DE LAS CUENCAS ALTIPLÁNICAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 166
TABLA 6.78 RESUMEN DE LAS DEMANDAS ACTUALES Y FUTURAS DE LA XV REGIÓN DE ARICA Y PARINACOTA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 167
TABLA 6.79 DEMANDA FUTURA DE AGUA POTABLE DE LOCALIDADES DE LA CUENCA DEL RÍO LLUTA. FUENTE: AYALA, CABRERA Y ASOC (2007) Y AGUAS DEL ALTIPLANO (2016). 168
TABLA 6.80 CAUDALES DE USO MINERO ACTUAL Y FUTURO EN LA CUENCA DEL RÍO LLUTA. FUENTE. ELABORACIÓN PROPIA 169
TABLA 6.81 DEMANDA FUTURA DE AGUA POTABLE EN ARICA. FUENTE: AGUAS DEL ALTIPLANO (2016). 169
TABLA 6.82 DEMANDA FUTURA DE AGUA POTABLE RURAL DE LOCALIDADES DE LA CUENCA DEL RÍO SAN JOSÉ. FUENTE: AYALA, CABRERA Y ASOC (2007) Y AGUAS DEL ALTIPLANO (2016). 170
TABLA 6.83 RESUMEN DE LA DEMANDA INDUSTRIAL DE ARICA DE LA CUENCA DEL RÍO SAN JOSÉ. FUENTE: AYALA, CABRERA Y ASOC (2007). 170
TABLA 6.84 RESUMEN DE CAUDALES DE EXPLOTACIÓN FUTUROS DE LOCALIDADES DE LA CUENCA DE LA QUEBRADA CHACA-VÍTOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 171
TABLA 6.85 DEMANDA FUTURA DE AGUA POTABLE DE LOCALIDADES DE LA CUENCA DEL RÍO CAMARONES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 172
TABLA 6.86 DEMANDA FUTURA DE AGUA POTABLE RURAL DE LOCALIDADES DE LAS CUENCAS ALTIPLÁNICAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 173
TABLA 6.87 DEMANDA FUTURA DE AGUA DE USO MINERO DE LAS CUENCAS ALTIPLÁNICAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 173
TABLA 6.88 CÁLCULO DE LAS ÁREAS DE LAS MASAS DE AGUA Y LAS TASAS DE EVAPORACIÓN DE CADA UNA DE ELLAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 175
TABLA 6.89 CÁLCULO DE LAS DEMANDAS DE AGUA POR EVAPORACIÓN (L/S) DE CADA UNA DE ELLAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 176
TABLA 6.90 DEMANDA EVAPOTRANSPIRATIVA ASOCIADA AL ÁREA CULTIVADA DE LAS CUENCAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 177
TABLA 6.91 PLANTEAMIENTO DEL MODELO MICROECONÓMICO DE FUNCIONAMIENTO DE MERCADOS DE AGUA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 182
TABLA 6.92 RESULTADOS DE LA REGRESIÓN DE ESTIMACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE LOS INGRESOS MEDIOS POR COMUNA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 185

TABLA 6.93 EVOLUCIÓN DE LOS INGRESOS EN TRES NIVELES PARA TODAS LAS COMUNAS. FUENTE: MODIFICADO DE CASEN (2003, 2009, 2011 Y 2013). 186
TABLA 6.94 TRANSACCIONES DE ACCIONES Y VALOR MEDIO DE LAS TRANSACCIONES POR ORGANIZACIÓN DE USUARIOS DEL AGUA (OUA). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 198
TABLA 6.95 COSTOS DE PRODUCCIÓN DE AGUA POTABLE EN ARICA (2016). FUENTE SISS. 199
TABLA 6.96 RESULTADOS DEL MODELO ECONOMÉTRICO DE PRECIOS DEL AGUA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 202
TABLA 6.97 RESULTADOS DETALLADOS DEL MODELO ECONOMÉTRICO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 204
TABLA 7.1 CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS DE LAS CUENCAS DE LA XV REGIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 227
TABLA 7.2 CONTINUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS DE LAS CUENCAS DE LA XV REGIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 228
TABLA 7.3 ESTACIONES METEOROLÓGICAS CON MEDICIONES DE VARIABLES CLIMÁTICAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 234
TABLA 7.4 LISTADO DE ESTACIONES METEOROLÓGICAS CONTROLADAS POR LA DGA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA BASADO EN INFORMACIÓN DEL SNIA, DGA. 237
TABLA 7.5 LISTADO DE ESTACIONES METEOROLÓGICAS CONTROLADAS POR LA DMC. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 238
TABLA 7.6 LISTADO DE ESTACIONES FLUVIOMÉTRICAS CONTROLADAS POR LA DGA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA BASADO EN INFORMACIÓN DEL SNIA, DGA. 238
TABLA 7.7 LISTADO DE ESTACIONES DE CALIDAD DEL AGUA CONTROLADAS POR LA DGA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA BASADO EN INFORMACIÓN DEL SNIA, DGA. 240
TABLA 7.8 DISPONIBILIDAD DE INFORMACIÓN EN LAS ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA, BASADO EN INFORMACIÓN DEL SNIA, DGA. 244
TABLA 7.9 ESTACIONES RELACIONADAS ENTRE ELLAS PARA EL RELLENO Y ANÁLISIS DE CONSISTENCIA SEGÚN CADA CUENCA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 246
TABLA 7.10 PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL DE LA REGIÓN DE ARICA Y PARINACOTA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 247
TABLA 7.11 IDENTIFICACIÓN DE LAS ESTACIONES SEGÚN LA NUMERACIÓN UTILIZADA EN LA FIGURA 7.14, ASÍ COMO LA ALTITUD Y PRECIPITACIÓN CORRESPONDIENTE PARA EL ANÁLISIS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 250

TABLA 7.12 PRECIPITACIONES MEDIAS MENSUALES POR CUENCAS DE LA REGIÓN DE ARICA Y PARINACOTA Y OTRAS CONSIDERADAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 256
TABLA 7.13 COORDENADAS Y PERIODO DE INFORMACIÓN DE LAS ESTACIONES CON MEDICIÓN DE EVAPORACIÓN TANQUE TIPO A FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 260
TABLA 7.14 EVAPORACIÓN MEDIA MENSUAL DEL TANQUE TIPO A EN ALGUNAS CUENCAS DE LA REGIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 268
TABLA 7.15 TEMPERATURA MEDIA MENSUAL ABSOLUTA REGISTRADA EN ESTACIONES METEOROLÓGICAS DE LA REGIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 271
TABLA 7.16 ESTACIONES CONSIDERADAS Y VALOR ESTIMADO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN EN LA REGIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 273
TABLA 7.17 DISPONIBILIDAD DE INFORMACIÓN EN LAS ESTACIONES FLUVIOMÉTRICAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 275
TABLA 7.18 SÍNTESIS DE LAS SERIES DE CAUDALES ANUALES PARA EL AÑO HIDROLÓGICO EN LAS ESTACIONES SELECCIONADAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 281
TABLA 7.19 CAUDAL MEDIO MENSUAL EN LAS ESTACIONES FLUVIOMÉTRICAS DE LA REGIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 283
TABLA 7.20 LÍMITE MÁXIMO DE CONTENIDO DE CADA ELEMENTO PARA AGUA POTABLE SEGÚN LA NORMA NCH409/1.OF2005. FUENTE: MODIFICADO DE NCH409/1.OF2005. 297
TABLA 7.21 PONDERACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN SEGÚN ÁREA DE INFLUENCIA ENTRE ISOYETAS EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA LA CONCORDIA SECTOR BAJO (TERRITORIO DE CHILE). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 310
TABLA 7.22 PRECIPITACIONES MEDIAS MENSUALES EN ESTACIONES METEOROLÓGICAS DE LA REGIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 313
TABLA 7.23 COORDENADAS Y PERIODO DE INFORMACIÓN DE LAS ESTACIONES CON MEDICIÓN DE EVAPORACIÓN TANQUE TIPO A. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 314
TABLA 7.24 EVAPORACIÓN MEDIA MENSUAL DEL TANQUE TIPO A EN ESTACIONES DE LA REGIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 314
TABLA 7.25 ESTACIONES CONSIDERADAS Y VALOR ESTIMADO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN EN LA REGIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 316
TABLA 7.26 RESUMEN DE LAS PRINCIPALES FUENTES DE RECARGA AL ACUÍFERO EN LA CONCORDIA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 319
TABLA 7.27 RESUMEN DE LAS UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS DE LA CUENCA DE LA QUEBRADA LA CONCORDIA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 329

TABLA 7.28 PARÁMETROS HIDRÁULICOS OBTENIDOS DE LA INTERPRETACIÓN DE LAS PRUEBAS DE BOMBEO DE LOS POZOS UBICADOS EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA LA CONCORDIA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 337
TABLA 7.29 RESUMEN DE LOS PARÁMETROS HIDRÁULICOS DE CADA UNIDAD HIDROGEOLÓGICA DE LA CUENCA DE LA QUEBRADA LA CONCORDIA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 339
TABLA 7.30 VALORES MÁXIMOS, MÍNIMOS Y PROMEDIO DE TEMPERATURA REGISTRADOS EN CADA CAMPAÑA DE MUESTREO EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA LA CONCORDIA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 364
TABLA 7.31 VALORES MÁXIMOS, MÍNIMOS Y PROMEDIO DE PH REGISTRADOS EN CADA CAMPAÑA DE MUESTREO EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA LA CONCORDIA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 365
TABLA 7.32 VALORES MÁXIMOS, MÍNIMOS Y PROMEDIO DE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA REGISTRADOS EN CADA CAMPAÑA DE MUESTREO EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA LA CONCORDIA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 366
TABLA 7.33 VALORES MÁXIMOS, MÍNIMOS Y PROMEDIO DE TOTALES DE SÓLIDOS DISUELTOS REGISTRADOS EN CADA CAMPAÑA DE MUESTREO EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA LA CONCORDIA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 367
TABLA 7.34 RESUMEN DE LOS VALORES MÁXIMOS Y MÍNIMOS DEL ERROR DEL BALANCE IÓNICO DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS MUESTRAS DE LAS CUATRO CAMPAÑAS DE MUESTREO EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA LA CONCORDIA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 367
TABLA 7.35 RESUMEN DE LOS VALORES MÁXIMOS Y MÍNIMOS DE OXÍGENO Y DEUTERIO OBTENIDOS EN LAS CUATRO CAMPAÑAS DE MUESTREO EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA LA CONCORDIA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 383
TABLA 7.36 COORDENADAS Y PERIODO DE INFORMACIÓN DE LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS EN LA CUENCA DEL RÍO LLUTA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 395
TABLA 7.37 PONDERACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN SEGÚN ÁREA DE INFLUENCIA ENTRE ISOYETAS EN LA CUENCA DEL RÍO LLUTA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 400
TABLA 7.38 PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL EN LA CUENCA DEL RÍO LLUTA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 403
TABLA 7.39 PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL EN LA CUENCA DEL RÍO LLUTA 404
TABLA 7.40 ESTACIONES CONSIDERADAS Y VALOR ESTIMADO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN EN LA CUENCA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 406
TABLA 7.41 COORDENADAS Y PERIODO DE INFORMACIÓN DE LAS ESTACIONES FLUVIOMÉTRICAS EN LA CUENCA DEL RÍO LLUTA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 407

TABLA 7.42 CAUDAL MEDIO ANUAL PARA EL AÑO HIDROLÓGICO EN LA CUENCA DEL RÍO LLUTA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 408
TABLA 7.43 CAUDAL MEDIO MENSUAL EN LA CUENCA DEL RÍO LLUTA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 409
TABLA 7.44 CAUDALES MENSUALES ASOCIADOS A PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 410
TABLA 7.45 COORDENADAS DE LOS PUNTOS AFORADOS EN ESTUDIOS DE REFERENCIA Y CAMPAÑA RECIENTE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 413
TABLA 7.46 CAUDALES OBTENIDOS DE LAS CAMPAÑAS DE AFOROS EN LA CUENCA DEL RÍO LLUTA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 421
TABLA 7.47 REGISTRO DE LOS AFOROS HISTÓRICOS ENCONTRADOS EN LA CUENCA DEL RÍO LLUTA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 422
TABLA 7.48 PARÁMETROS UTILIZADOS PARA EL MODELO SMA EN LA CUENCA DEL RÍO LLUTA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 426
TABLA 7.49 INFORMACIÓN BASE UTILIZADA DE CADA SUBCUENCA DEL RÍO LLUTA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 430
TABLA 7.50 CAUDALES CONSIDERADOS EN LA CORRELACIÓN Y ESTIMACIÓN DE LA RECARGA NETA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 431
TABLA 7.51 SÍNTESIS DE LAS PRINCIPALES ESTIMACIONES DE RECARGA AL ACUÍFERO EN LA CUENCA DEL RÍO LLUTA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 432
TABLA 7.52 VALORES DE LA RECARGA MEDIA MENSUAL ESTIMADA EN LA CUENCA DEL RÍO LLUTA. 432
TABLA 7.53 RESUMEN DE LAS UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS DE LA CUENCA DEL RÍO LLUTA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 463
TABLA 7.54 PARÁMETROS ELÁSTICOS OBTENIDOS DE LA INTERPRETACIÓN DE LA PRUEBA DE BOMBEO DE LOS POZOS UBICADOS EN LA SUBCUENCA DEL RÍO LLUTA BAJO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 472
TABLA 7.55 RESUMEN DE LOS PARÁMETROS HIDRÁULICOS DE CADA UNIDAD HIDROGEOLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO LLUTA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 474
TABLA 7.56 RESUMEN DE LAS ACTIVIDADES REALIZADAS EN LAS CAMPAÑAS DE MUESTREO EN LA CUENCA DEL RÍO LLUTA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 489
TABLA 7.57 VALORES MÁXIMOS, MÍNIMOS Y PROMEDIOS DE TEMPERATURA REGISTRADOS EN CADA CAMPAÑA DE MUESTREO EN LA CUENCA DEL RÍO LLUTA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 493
TABLA 7.58 VALORES MÁXIMOS, MÍNIMOS Y PROMEDIO DE PH REGISTRADO EN CADA CAMPAÑA DE MUESTREO EN LA CUENCA DEL RÍO LLUTA FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 495
TABLA 7.59 VALORES MÁXIMOS, MÍNIMOS Y PROMEDIOS DE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA REGISTRADOS EN CADA CAMPAÑA DE MUESTREO EN LA CUENCA DEL RÍO LLUTA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 497

TABLA 7.60 VALORES MÁXIMOS, MÍNIMOS Y PROMEDIO DE SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES (TDS) REGISTRADO EN CADA CAMPAÑA DE MUESTREO EN LA CUENCA DEL RÍO LLUTA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 500
TABLA 7.61 RESUMEN DE LOS VALORES MÁXIMOS Y MÍNIMOS DEL ERROR DEL BALANCE IÓNICO DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS MUESTRAS DE LAS CUATRO CAMPAÑAS DE MUESTREO EN LA CUENCA DEL RÍO LLUTA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 500
TABLA 7.62 RESUMEN DE LOS VALORES MÁXIMOS Y MÍNIMOS DE OXÍGENO Y DEUTERIO OBTENIDOS EN LAS CUATRO CAMPAÑAS DE MUESTREO EN LA CUENCA DEL RÍO LLUTA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA .. 519
TABLA 7.63 COORDENADAS Y PERIODO DE INFORMACIÓN DE LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS EN LA CUENCA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 532
TABLA 7.64 PONDERACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN SEGÚN ÁREA DE INFLUENCIA ENTRE ISOYETAS EN LA CUENCA DEL RÍO SAN JOSÉ. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 536
TABLA 7.65 PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL EN LA CUENCA DEL RÍO SAN JOSÉ. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 539
TABLA 7.66 PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL EN LA CUENCA DEL RÍO SAN JOSÉ. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 540
TABLA 7.67 ESTACIONES CONSIDERADAS Y VALOR ESTIMADO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN EN LA CUENCA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 542
TABLA 7.68 COORDENADAS Y PERIODO DE INFORMACIÓN DE LAS ESTACIONES FLUVIOMÉTRICAS EN LA CUENCA DEL RÍO SAN JOSÉ. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 543
TABLA 7.69 CAUDAL MEDIO ANUAL PARA EL AÑO HIDROLÓGICO EN LA CUENCA DEL RÍO SAN JOSÉ. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 544
TABLA 7.70 CAUDAL MEDIO MENSUAL EN LA CUENCA DEL RÍO SAN JOSÉ. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 545
TABLA 7.71 CAUDALES MENSUALES ASOCIADOS A PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 546
TABLA 7.72 COORDENADAS DE LOS PUNTOS AFORADOS EN ESTUDIOS DE REFERENCIA Y CAMPAÑA RECIENTE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 549
TABLA 7.73 CAUDALES OBTENIDOS DE LAS CAMPAÑAS DE AFOROS EN LA CUENCA DEL RÍO SAN JOSÉ. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 550
TABLA 7.74 REGISTRO DE LOS AFOROS HISTÓRICOS EN LA CUENCA DEL RÍO SAN JOSÉ. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 551

TABLA 7.75 PARÁMETROS UTILIZADOS PARA EL MODELO SMA EN LA CUENCA DEL RÍO SAN JOSÉ. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 560
TABLA 7.76 INFORMACIÓN BASE UTILIZADA DE CADA SUBCUENCA DEL RÍO SAN JOSÉ. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 564
TABLA 7.77 CAUDALES CONSIDERADOS EN LA CORRELACIÓN Y ESTIMACIÓN DE LA RECARGA NETA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 566
TABLA 7.78 SÍNTESIS DE LAS PRINCIPALES ESTIMACIONES DE RECARGA AL ACUÍFERO EN LA CUENCA DEL RÍO SAN JOSÉ. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 567
TABLA 7.79 VALORES DE LA RECARGA MEDIA MENSUAL ESTIMADA EN LA CUENCA DEL RÍO SAN JOSÉ. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 567
TABLA 7.80 RESUMEN DE LAS CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS POR SECTORES DEL VALLE DE AZAPA. FUENTE: DHV (1995). 585
TABLA 7.81 RESUMEN DE LAS UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS DE LA CUENCA DEL RÍO SAN JOSÉ. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 596
TABLA 7.82 RESUMEN DE LAS CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS POR SECTORES DEL VALLE DE AZAPA. FUENTE: DHV (1995). 603
TABLA 7.83 RESUMEN DE LOS PARÁMETROS HIDRÁULICOS DE CADA UNIDAD HIDROGEOLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO SAN JOSÉ. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 608
TABLA 7.84 RESUMEN DE LAS ACTIVIDADES REALIZADAS EN LAS CAMPAÑAS DE MUESTREO EN LA CUENCA DEL RÍO SAN JOSÉ. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 631
TABLA 7.85 VALORES MÁXIMOS, MÍNIMOS Y PROMEDIO DE TEMPERATURA REGISTRADOS EN CADA CAMPAÑA DE MUESTREO EN LA CUENCA DEL RÍO SAN JOSÉ. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 635
TABLA 7.86 VALORES MÁXIMOS, MÍNIMOS Y PROMEDIO DE PH REGISTRADO EN CADA CAMPAÑA DE MUESTREO EN LA CUENCA DEL RÍO SAN JOSÉ. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 637
TABLA 7.87 VALORES MÁXIMOS, MÍNIMOS Y PROMEDIOS DE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA REGISTRADOS EN CADA CAMPAÑA DE MUESTREO EN LA CUENCA DEL RÍO SAN JOSÉ. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 639
TABLA 7.88 VALORES MÁXIMOS, MÍNIMOS Y PROMEDIO DE SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES (TDS) REGISTRADOS EN CADA CAMPAÑA DE MUESTREO EN LA CUENCA DEL RÍO SAN JOSÉ. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 641
TABLA 7.89. RESUMEN DE LOS VALORES MÁXIMOS Y MÍNIMOS DEL ERROR DEL BALANCE IÓNICO DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS MUESTRAS DE LAS CUATRO CAMPAÑAS DE MUESTREO EN LA CUENCA DEL RÍO SAN JOSÉ. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 641

TABLA 7.90 RESUMEN DE LOS VALORES MÁXIMOS Y MÍNIMOS DE OXÍGENO 18 Y DEUTERIO OBTENIDOS EN LAS CUATRO CAMPAÑAS DE MUESTREO EN LA CUENCA DEL RÍO SAN JOSÉ. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 657
TABLA 7.91 COORDENADAS Y PERIODO DE INFORMACIÓN DE LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS DE INFLUENCIA EN LA CUENCA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 670
TABLA 7.92 PONDERACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN SEGÚN ÁREA DE INFLUENCIA ENTRE ISOYETAS EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA CHACA VÍTOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 674
TABLA 7.93 PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA CHACA VÍTOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 678
TABLA 7.94 EVAPOTRANSPIRACIÓN MEDIA MENSUAL EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA CHACA VÍTOR. FUENTE: MAYCO CONSULTORES (2013). 681
TABLA 7.95 COORDENADAS Y PERIODO DE INFORMACIÓN DE LA ESTACIÓN FLUVIOMÉTRICA EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA CHACA VÍTOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 681
TABLA 7.96 CAUDAL MEDIO ANUAL PARA EL AÑO HIDROLÓGICO EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA CHACA VÍTOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 682
TABLA 7.97 CAUDAL MEDIO MENSUAL EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA CHACA VÍTOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 682
TABLA 7.98 CAUDALES MENSUALES ASOCIADOS A PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 683
TABLA 7.99 COORDENADAS DE LOS PUNTOS AFORADOS EN ESTUDIOS DE REFERENCIA Y CAMPAÑA RECIENTE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 685
TABLA 7.100 CAUDALES OBTENIDOS DE LAS CAMPAÑAS DE AFOROS EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA CHACA VÍTOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 691
TABLA 7.101 REGISTRO DE LOS AFOROS HISTÓRICOS ENCONTRADOS DE LA CUENCA DE LA QUEBRADA CHACA VÍTOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 691
TABLA 7.102 PARÁMETROS UTILIZADOS PARA EL MODELO SMA EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA CHACA VÍTOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 694
TABLA 7.103 VALORES DE RECARGA ESTIMADOS EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA CHACA VÍTOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 697
TABLA 7.104 INFORMACIÓN BASE UTILIZADA DE LA SUBCUENCA DEL RÍO CODPA HASTA CALA-CALA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 698
TABLA 7.105 CAUDALES CONSIDERADOS EN LA CORRELACIÓN Y ESTIMACIÓN DE LA RECARGA NETA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 699

TABLA 7.106 SÍNTESIS DE LAS PRINCIPALES ESTIMACIONES DE RECARGA AL ACUÍFERO EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA CHACA VÍTOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 699
TABLA 7.107 VALORES DE LA RECARGA MEDIA MENSUAL ESTIMADA EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA CHACA VÍTOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 700
TABLA 7.108 RESUMEN DE LAS UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS DE LA CUENCA DE LA QUEBRADA CHACA-VÍTOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 714
TABLA 7.109 PARÁMETROS HIDRÁULICOS DE LOS ACUÍFEROS INTERMEDIO Y COSTERO DE LA CUENCA DE LA QUEBRADA CHACA-VÍTOR ESTIMADOS POR MAYCO (2013) E ICASS (2016). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 721
TABLA 7.110 RESUMEN DE LOS PARÁMETROS HIDRÁULICOS DE CADA UNIDAD HIDROGEOLÓGICA DE LA CUENCA DE LA QUEBRADA CHACA-VÍTOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 722
TABLA 7.111 RESUMEN DE LAS ACTIVIDADES REALIZADAS EN LAS CAMPAÑAS DE MUESTREO EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA CHACA-VÍTOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 736
TABLA 7.112 VALORES MÁXIMOS, MÍNIMOS Y PROMEDIO DE TEMPERATURA REGISTRADOS EN CADA CAMPAÑA DE MUESTREO EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA CHACA-VÍTOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 739
TABLA 7.113 VALORES MÁXIMOS, MÍNIMOS Y PROMEDIO DE PH REGISTRADOS EN CADA CAMPAÑA DE MUESTREO EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA CHACA-VÍTOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 741
TABLA 7.114 VALORES MÁXIMOS, MÍNIMOS Y PROMEDIO DE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA REGISTRADOS EN CADA CAMPAÑA DE MUESTREO EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA CHACA-VÍTOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 743
TABLA 7.115 VALORES MÁXIMOS, MÍNIMOS Y PROMEDIO DE SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES REGISTRADOS EN CADA CAMPAÑA DE MUESTREO EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA CHACA-VÍTOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 745
TABLA 7.116 RESUMEN DE LOS VALORES MÁXIMOS Y MÍNIMOS DEL ERROR DEL BALANCE IÓNICO DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS MUESTRAS DE LAS CUATRO CAMPAÑAS DE MUESTREO EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA CHACA-VÍTOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 746
TABLA 7.117 RESUMEN DE LOS VALORES MÁXIMOS Y MÍNIMOS DE OXÍGENO Y DEUTERIO OBTENIDOS EN LAS CUATRO CAMPAÑAS DE MUESTREO EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA CHACA-VÍTOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 761
TABLA 7.118 COORDENADAS Y PERIODO DE INFORMACIÓN DE LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS EN LA CUENCA DEL RÍO CAMARONES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 775
TABLA 7.119 PONDERACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN SEGÚN ÁREA DE INFLUENCIA ENTRE ISOYETAS EN LA CUENCA DEL RÍO CAMARONES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 779

TABLA 7.120 PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL EN LAS ESTACIONES SELECCIONADAS DE LA XV REGIÓN Y I REGIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 783
TABLA 7.121 PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL EN LA CUENCA DEL RÍO CAMARONES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 785
TABLA 7.122 COORDENADAS Y PERIODO DE INFORMACIÓN DE LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS EN LA CUENCA DEL RÍO CAMARONES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 786
TABLA 7.123 EVAPORACIÓN MEDIA MENSUAL NETA EN ESTACIONES SELECCIONADAS. FUENTE: MODIFICADO DE GEOHIDROLOGÍA (2014). 787
TABLA 7.124 COORDENADAS Y PERIODO DE INFORMACIÓN DE LAS ESTACIONES FLUVIOMÉTRICAS EN LA CUENCA DEL RÍO CAMARONES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 788
TABLA 7.125 CAUDAL MEDIO ANUAL PARA EL AÑO HIDROLÓGICO EN LA CUENCA DEL RÍO CAMARONES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 789
TABLA 7.126 CAUDAL MEDIO MENSUAL EN LA CUENCA DEL RÍO CAMARONES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 789
TABLA 7.127 CAUDALES MEDIOS MENSUALES EN LOS PUNTOS DE INTERÉS DE LA CUENCA DEL RÍO CAMARONES SIN CONTROL FLUVIOMÉTRICO. FUENTE: AC INGENIEROS CONSULTORES LTDA. (2002). 790
TABLA 7.128 CAUDALES MENSUALES ASOCIADOS A PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 791
TABLA 7.129 COORDENADAS DE LOS PUNTOS AFORADOS EN LA CUENCA DEL RÍO CAMARONES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 793
TABLA 7.130 CAUDALES OBTENIDOS DE LAS CAMPAÑAS DE AFOROS EN LA CUENCA DEL RÍO CAMARONES. VALORES TOMADOS DE CON POTENCIAL CONSULTORES (2016). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 801
TABLA 7.131 REGISTRO DE LOS AFOROS HISTÓRICOS ENCONTRADOS DE LA CUENCA DEL RÍO CAMARONES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 801
TABLA 7.132 PARÁMETROS UTILIZADOS PARA EL MODELO SMA EN LA CUENCA DEL RÍO CAMARONES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 806
TABLA 7.133 INFORMACIÓN BASE UTILIZADA DE LA SUBCUENCA DEL RÍO CAMARONES EN CONANOXA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 808
TABLA 7.134 CAUDALES CONSIDERADOS EN LA CORRELACIÓN Y ESTIMACIÓN DE LA RECARGA NETA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 809
TABLA 7.135 SÍNTESIS DE LAS PRINCIPALES ESTIMACIONES DE RECARGA AL ACUÍFERO EN LA CUENCA DEL RÍO CAMARONES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 810

TABLA 7.136 VALORES DE LA RECARGA MEDIA MENSUAL ESTIMADA EN LA CUENCA DEL RÍO CAMARONES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 810
TABLA 7.137 RESUMEN DE LAS UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS DE LA CUENCA DEL RÍO CAMARONES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 821
TABLA 7.138 RESUMEN DE LOS PARÁMETROS HIDRÁULICOS DE CADA UNIDAD HIDROGEOLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO CAMARONES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 826
TABLA 7.139 COORDENADAS Y PERIODO DE INFORMACIÓN DE LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS EN LA CUENCA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 881
TABLA 7.140 PONDERACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN SEGÚN ÁREA DE INFLUENCIA ENTRE ISOYETAS EN LA CUENCA DE LOS RÍOS UCHUSUMA Y CAQUENA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 886
TABLA 7.141 PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL EN LA CUENCA DE LOS RÍOS UCHUSUMA Y CAQUENA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 889
TABLA 7.142 PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL EN LA CUENCA DE LOS RÍOS UCHUSUMA Y CAQUENA FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 889
TABLA 7.143 COORDENADAS Y PERIODO DE INFORMACIÓN DE LAS ESTACIONES CON MEDICIÓN DE EVAPORACIÓN TANQUE TIPO A. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 891
TABLA 7.144 EVAPORACIÓN POTENCIAL MENSUAL EN LAS CUENCAS ALTIPLÁNICAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 892
TABLA 7.145 ESTACIONES CONSIDERADAS Y VALOR ESTIMADO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN EN LA CUENCA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 893
TABLA 7.146 COORDENADAS Y PERIODO DE INFORMACIÓN DE LAS ESTACIONES FLUVIOMÉTRICAS EN LA SUBCUENCA DEL RÍO CAQUENA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 894
TABLA 7.147 CAUDAL MEDIO ANUAL PARA EL AÑO HIDROLÓGICO EN LA SUBCUENCA DEL RÍO CAQUENA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 894
TABLA 7.148 CAUDAL MEDIO MENSUAL EN LA SUBCUENCA DEL RÍO CAQUENA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 895
TABLA 7.149 CAUDALES MENSUALES ASOCIADOS A PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 897
TABLA 7.150 COORDENADAS DE LOS PUNTOS AFORADOS EN LA CUENCA DE LOS RÍOS UCHUSUMA Y CAQUENA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 900
TABLA 7.151 CAUDALES OBTENIDOS DE LAS CAMPAÑAS DE AFOROS EN LA CUENCA DE LOS RÍOS UCHUSUMA Y CAQUENA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 903
TABLA 7.152 PARÁMETROS UTILIZADOS PARA EL MODELO SMA EN LA CUENCA DEL RÍO CAQUENA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 907

TABLA 7.153 INFORMACIÓN BASE UTILIZADA DE CADA SUBCUENCA DEL RÍO CAQUENA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 909
TABLA 7.154 CAUDALES CONSIDERADOS EN LA CORRELACIÓN Y ESTIMACIÓN DE LA RECARGA NETA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 910
TABLA 7.155 SÍNTESIS DE LAS PRINCIPALES ESTIMACIONES DE RECARGA AL ACUÍFERO EN LA CUENCA DEL RÍO CAQUENA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 910
TABLA 7.156 VALORES DE LA RECARGA MEDIA MENSUAL ESTIMADA EN LA CUENCA DEL RÍO CAQUENA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 911
TABLA 7.157 RESUMEN DE LAS UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS DE LA CUENCA DE LOS RÍOS UCHUSUMA Y CAQUENA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 921
TABLA 7.158 RESUMEN DE LOS PARÁMETROS HIDRÁULICOS DE CADA UNIDAD HIDROGEOLÓGICA DE LA CUENCA DE LOS RÍOS UCHUSUMA Y CAQUENA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 926
TABLA 7.159 RESUMEN DE LAS ACTIVIDADES REALIZADAS EN LA CUENCA DE LOS RÍOS UCHUSUMA Y CAQUENA EN LAS CAMPAÑAS DE MUESTREO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 935
TABLA 7.160 VALORES MÁXIMOS, MÍNIMOS Y PROMEDIO DE TEMPERATURA REGISTRADOS EN CADA CAMPAÑA DE MUESTREO EN LA CUENCA DE LOS RÍOS UCHUSUMA Y CAQUENA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 939
TABLA 7.161 VALORES MÁXIMOS, MÍNIMOS Y PROMEDIO DE PH REGISTRADOS EN CADA CAMPAÑA DE MUESTREO EN LA CUENCA DE LOS RÍOS UCHUSUMA Y CAQUENA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 941
TABLA 7.162 VALORES MÁXIMOS, MÍNIMOS Y PROMEDIO DE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA REGISTRADOS EN CADA CAMPAÑA DE MUESTREO EN LA CUENCA DE LOS RÍOS UCHUSUMA Y CAQUENA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 943
TABLA 7.163 VALORES MÁXIMOS, MÍNIMOS Y PROMEDIO DE TOTAL DE SÓLIDOS DISUELTOS REGISTRADOS EN CADA CAMPAÑA DE MUESTREO EN LA CUENCA DE LOS RÍOS UCHUSUMA Y CAQUENA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 945
TABLA 7.164 RESUMEN DE LOS VALORES MÁXIMOS Y MÍNIMOS DEL ERROR DEL BALANCE IÓNICO DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS MUESTRAS DE LAS CUATRO CAMPAÑAS DE MUESTREO EN LA CUENCA DE LOS RÍOS UCHUSUMA Y CAQUENA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 945
TABLA 7.165 RESUMEN DE LOS VALORES MÁXIMOS Y MÍNIMOS DE OXÍGENO 18 Y DEUTERIO OBTENIDOS EN LAS CUATRO CAMPAÑAS DE MUESTREO EN LA CUENCA DE LOS RÍOS UCHUSUMA Y CAQUENA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 957
TABLA 7.166 COORDENADAS Y PERIODO DE INFORMACIÓN DE LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS EN LA CUENCA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 968

TABLA 7.167 PONDERACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN SEGÚN ÁREA DE INFLUENCIA ENTRE ISOYETAS EN LA CUENCA DEL LAGO CHUNGARA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 972
TABLA 7.168 PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL EN LA CUENCA DEL LAGO CHUNGARA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 975
TABLA 7.169 PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL EN LA CUENCA DEL LAGO CHUNGARA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 975
TABLA 7.170 COORDENADAS Y PERIODO DE INFORMACIÓN DE LAS ESTACIONES CON MEDICIÓN DE EVAPORACIÓN TANQUE TIPO A. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 977
TABLA 7.171 EVAPORACIÓN POTENCIAL MENSUAL EN LAS CUENCAS ALTIPLÁNICAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 977
TABLA 7.172 COORDENADAS Y PERIODO DE INFORMACIÓN DE LA ESTACIÓN FLUVIOMÉTRICA EN LA CUENCA DEL LAGO CHUNGARA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 978
TABLA 7.173 COORDENADAS DE LOS PUNTOS AFORADOS EN ESTUDIOS DE REFERENCIA Y CAMPAÑA RECIENTE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 979
TABLA 7.174 CAUDALES OBTENIDOS DE LAS CAMPAÑAS DE AFOROS EN LA EN LA CUENCA DEL LAGO CHUNGARA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 979
TABLA 7.175 SÍNTESIS DE LAS PRINCIPALES ESTIMACIONES DE RECARGA EN LA CUENCA DEL LAGO CHUNGARA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 986
TABLA 7.176 RESUMEN DE LAS UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS DE LA CUENCA DEL LAGO CHUNGARA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 1000
TABLA 7.177 RESUMEN DE LOS PARÁMETROS HIDRÁULICOS DE CADA UNIDAD HIDROGEOLÓGICA DE LA CUENCA DEL LAGO CHUNGARA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 1004
TABLA 7.178 MUESTRAS CONSIDERADAS EN CADA ESTACIÓN DE LA DGA PARA LA ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS PROMEDIOS A PARTIR DE LA BASE DE DATOS DE DICTUC (2008). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 1013
TABLA 7.179 RESUMEN DE LAS ACTIVIDADES REALIZADAS EN LA CUENCA DEL LAGO CHUNGARA EN LAS CAMPAÑAS DE MUESTREO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 1014
TABLA 7.180 RESUMEN DE LOS VALORES MÁXIMOS Y MÍNIMOS DEL ERROR DEL BALANCE IÓNICO DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS MUESTRAS ANALIZADAS EN LOS ANTECEDENTES Y EN LAS DOS CAMPAÑAS DE MUESTREO EN LA CUENCA DEL LAGO CHUNGARA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1021
TABLA 7.181 COORDENADAS Y PERIODO DE INFORMACIÓN DE LAS ESTACIONES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 1045
TABLA 7.182 PONDERACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN SEGÚN ÁREA DE INFLUENCIA ENTRE ISOYETAS EN LA CUENCA DEL RÍO LAUCA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1050

TABLA 7.183 PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL EN LA CUENCA DEL RÍO LAUCA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1053
TABLA 7.184 PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL EN LA CUENCA DEL RÍO LAUCA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1053
TABLA 7.185 COORDENADAS Y PERIODO DE INFORMACIÓN DE LAS ESTACIONES CON MEDICIÓN DE EVAPORACIÓN TANQUE TIPO A. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1055
TABLA 7.186 EVAPORACIÓN POTENCIAL MENSUAL EN LAS CUENCAS ALTIPLÁNICAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1056
TABLA 7.187 ESTACIONES CONSIDERADAS Y VALOR ESTIMADO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN EN LA CUENCA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1058
TABLA 7.188 EVAPOTRANSPIRACIÓN MEDIA MENSUAL EN LA CUENCA DEL RÍO LAUCA. FUENTE: MATRAZ (2015). 1058
TABLA 7.189 COORDENADAS Y PERIODO DE INFORMACIÓN DE LAS ESTACIONES FLUVIOMÉTRICAS EN LA CUENCA DEL RÍO LAUCA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1059
TABLA 7.190 CAUDAL MEDIO ANUAL PARA EL AÑO HIDROLÓGICO EN LA CUENCA DEL RÍO LAUCA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1060
TABLA 7.191 CAUDAL MEDIO MENSUAL EN LA CUENCA DEL RÍO LAUCA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1060
TABLA 7.192 CAUDALES MENSUALES ASOCIADOS A PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1062
TABLA 7.193 COORDENADAS DE LOS PUNTOS AFORADOS EN ESTUDIOS DE REFERENCIA Y CAMPAÑA RECIENTE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1069
TABLA 7.194 CAUDALES OBTENIDOS DE LAS CAMPAÑAS DE AFOROS EN LA CUENCA DEL RÍO LAUCA. FUENTE: VALORES DE AFOROS TOMADOS DE MATRAZ CONSULTORES ASOCIADOS (2015). 1071
TABLA 7.195 CAUDALES DE AFOROS HISTÓRICOS EN LA CUENCA DEL RÍO LAUCA. FUENTE: ARRAU (1997). 1073
TABLA 7.196 PARÁMETROS UTILIZADOS PARA EL MODELO SMA EN LA CUENCA DEL RÍO LAUCA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1077
TABLA 7.197 INFORMACIÓN BASE UTILIZADA DE CADA SUBCUENCA DEL RÍO LAUCA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1081
TABLA 7.198 CAUDALES CONSIDERADOS EN LA CORRELACIÓN Y ESTIMACIÓN DE LA RECARGA NETA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 1082

TABLA 7.199 SÍNTESIS DE LAS PRINCIPALES ESTIMACIONES DE RECARGA AL ACUÍFERO EN LA CUENCA DEL RÍO LAUCA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 1082
TABLA 7.200 VALORES DE LA RECARGA MEDIA MENSUAL ESTIMADA EN LA CUENCA DEL RÍO LAUCA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 1083
TABLA 7.201 CARACTERÍSTICAS DE LOS POZOS Y DE LAS PRUEBAS REALIZADAS EN LA CAMPAÑA 1992-93. FUENTE: AYALA Y CABRERA (1994) 1088
TABLA 7.202 CARACTERÍSTICAS DE LAS PRUEBAS REALIZADAS EN LA CAMPAÑA 1992-93. FUENTE: AMBAR Y ÁLAMO Y PERALTA (2000). P.G.V.: PRUEBA DE BOMBEO DE GASTO VARIABLE. P.G.CTE: PRUEBA DE BOMBEO DE GASTO CONSTANTE. 1090
TABLA 7.203 RESUMEN DE LAS UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS DE LA CUENCA DEL RÍO LAUCA. FUENTE: MATRAZ (2015) 1099
TABLA 7.204 TRANSMISIVIDADES ESTIMADAS POR CADA AUTOR CON LOS DATOS OBTENIDOS EN LAS DIFERENTES CAMPAÑAS DE BOMBEO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 1103
TABLA 7.205 RESUMEN DE LOS PARÁMETROS HIDRÁULICOS DE CADA UNIDAD HIDROGEOLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO LAUCA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1104
TABLA 7.206 COORDENADAS Y PERIODO DE INFORMACIÓN DE LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS EN LA CUENCA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1146
TABLA 7.207 PONDERACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN SEGÚN ÁREA DE INFLUENCIA ENTRE ISOYETAS EN LA CUENCA DEL SALAR DE SURIRE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1150
TABLA 7.208 PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL EN LA CUENCA DEL SALAR SURIRE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1153
TABLA 7.209 COORDENADAS Y PERIODO DE INFORMACIÓN DE LAS ESTACIONES CON MEDICIÓN DE EVAPORACIÓN TANQUE TIPO A. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1154
TABLA 7.210 EVAPORACIÓN POTENCIAL MENSUAL EN LAS CUENCAS ALTIPLÁNICAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1154
TABLA 7.211 ESTIMACIÓN DE LA EVAPORACIÓN ANUAL DESDE EL SALAR. FUENTE: DGA (1986). * DETERMINADO EFECTUANDO BALANCE HÍDRICO. 1155
TABLA 7.212 COORDENADAS DE LOS PUNTOS AFORADOS EN ESTUDIOS DE REFERENCIA Y CAMPAÑA RECIENTE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1156
TABLA 7.213 CAUDALES OBTENIDOS DE LAS CAMPAÑAS DE AFOROS EN LA CUENCA DEL SALAR DE SURIRE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1165
TABLA 7.214 VALORES DE RECARGA ESTIMADOS EN LA CUENCA DEL SALAR DE SURIRE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1168

TABLA 7.215 RESUMEN DE LAS UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS DE LA CUENCA DEL SALAR DE SURIRE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 1180
TABLA 7.216 RESUMEN DE LOS PARÁMETROS HIDRÁULICOS DE CADA UNIDAD HIDROGEOLÓGICA DE LA CUENCA DEL SALAR DE SURIRE FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1184
TABLA 7.217 RESUMEN DE LAS ACTIVIDADES REALIZADAS EN LAS CAMPAÑAS DE MUESTREO REALIZADAS EN LA CUENCA DEL SALAR DE SURIRE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1197
TABLA 7.218 VALORES MÁXIMOS, MÍNIMOS Y PROMEDIO DE TEMPERATURA REGISTRADOS EN CADA CAMPAÑA DE MUESTREO EN LA CUENCA DEL SALAR DE SURIRE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1201
TABLA 7.219. VALORES MÁXIMOS, MÍNIMOS Y PROMEDIO DE PH REGISTRADOS EN CADA CAMPAÑA DE MUESTREO EN LA CUENCA DEL SALAR DE SURIRE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1202
TABLA 7.220 VALORES MÁXIMOS, MÍNIMOS Y PROMEDIO DE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA REGISTRADOS EN CADA CAMPAÑA DE MUESTREO EN LA CUENCA DEL SALAR DE SURIRE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1203
TABLA 7.221 VALORES MÁXIMOS, MÍNIMOS Y PROMEDIO DE SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES REGISTRADOS EN CADA CAMPAÑA DE MUESTREO EN LA CUENCA DEL SALAR DE SURIRE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1204
TABLA 7.222 RESUMEN DE LOS VALORES MÁXIMOS Y MÍNIMOS DEL ERROR DEL BALANCE IÓNICO DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS MUESTRAS DE LAS CUATRO CAMPAÑAS DE MUESTREO EN LA CUENCA DEL SALAR DE SURIRE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 1205
TABLA 7.223 RESUMEN DE LOS VALORES MÁXIMOS Y MÍNIMOS DE OXÍGENO 18 Y DEUTERIO OBTENIDOS EN LAS CUATRO CAMPAÑAS DE MUESTREO EN LA CUENCA DEL SALAR DE SURIRE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1215
TABLA 8.1 BALANCE HÍDRICO ANUAL EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA DE LA CONCORDIA (TERRITORIO CHILENO) . FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1226
TABLA 8.2 COMPONENTES DEL BALANCE HÍDRICO EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA DE LA CONCORDIA (TERRITORIO CHILENO). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 1228
TABLA 8.3 BALANCE HÍDRICO ANUAL EN LA SUBCUENCA RÍO LLUTA EN ALCÉRRECA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 1230
TABLA 8.4. COMPONENTES DEL BALANCE HÍDRICO EN LA SUBCUENCA DEL RÍO LLUTA EN ALCERRECA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1232
TABLA 8.5 BALANCE HÍDRICO ANUAL EN LA SUBCUENCA RÍO LLUTA EN ALCÉRRECA - SOCOROMA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 1234

TABLA 8.6 BALANCE HÍDRICO ANUAL EN LA SUBCUENCA RÍO LLUTA ENTRE SOCOROMA Y PANAMERICANA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1236
TABLA 8.7 BALANCE HÍDRICO ANUAL EN LA SUBCUENCA RÍO LLUTA ENTRE ALCÉRRECA Y PANAMERICANA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1238
TABLA 8.8. COMPONENTES DEL BALANCE HÍDRICO EN LA SUBCUENCA DEL RÍO LLUTA ENTRE ALCÉRRECA Y RÍO LLUTA EN PANAMERICANA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 1239
TABLA 8.9. SÍNTESIS DE LOS BALANCES HÍDRICOS REFERENTES EN LA CUENCA DEL RÍO LLUTA. FUENTE: BALANCE DGA (1987) 1240
TABLA 8.10 BALANCE HÍDRICO ANUAL EN LA SUBCUENCA RÍO SAN JOSÉ EN AUSIPAR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 1242
TABLA 8.11. COMPONENTES DEL BALANCE HÍDRICO EN LA SUBCUENCA DEL RÍO SAN JOSÉ EN AUSIPAR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1243
TABLA 8.12 BALANCE HÍDRICO ANUAL EN LA SUBCUENCA RÍO SAN JOSÉ BAJO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 1245
TABLA 8.13 COMPONENTES DEL BALANCE HÍDRICO EN LA SUBCUENCA RÍO SAN JOSÉ BAJO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 1246
TABLA 8.14. SÍNTESIS DE LOS BALANCES HÍDRICOS REFERENTES EN LA CUENCA DEL RÍO SAN JOSÉ. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA EN BASE A ANTECEDENTES 1248
TABLA 8.15 BALANCE HÍDRICO ANUAL EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA CHACA VÍTOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 1249
TABLA 8.16 COMPONENTES DEL BALANCE HÍDRICO EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA CHACA-VITOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1251
TABLA 8.17. SÍNTESIS DE LOS BALANCES HÍDRICOS REFERENTES EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA CHACA VÍTOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 1252
TABLA 8.18 BALANCE HÍDRICO ANUAL EN LA SUBCUENCA DEL RÍO CAMARONES EN CHILPE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 1254
TABLA 8.19. COMPONENTES DEL BALANCE HÍDRICO EN LA SUBCUENCA RÍO CAMARONES EN CHILPE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1255
TABLA 8.20 BALANCE HÍDRICO ANUAL EN LA SUBCUENCA DEL RÍO CAMARONES ENTRE CHILPE Y CONANOXA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1257
TABLA 8.21. COMPONENTES DEL BALANCE HÍDRICO EN LA SUBCUENCA DEL RÍO CAMARONES ENTRE CHILPE Y CONANOXA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 1258
TABLA 8.22. SÍNTESIS DE LOS BALANCES HÍDRICOS REFERENTES EN LA CUENCA DEL RÍO CAMARONES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1259

TABLA 8.23 BALANCE HÍDRICO ANUAL EN LA SUBCUENCA RÍO CAQUENA EN VERTEDERO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1261
TABLA 8.24. COMPONENTES DEL BALANCE HÍDRICO EN LA SUBCUENCA RÍO CAQUENA EN VERTEDERO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1262
TABLA 8.25 BALANCE HÍDRICO ANUAL EN LA SUBCUENCA RÍO CAQUENA BAJO VERTEDERO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1263
TABLA 8.26. COMPONENTES DEL BALANCE HÍDRICO EN LA SUBCUENCA RÍO CAQUENA BAJO VERTEDERO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1265
TABLA 8.27. SÍNTESIS DE LOS BALANCES HÍDRICOS REFERENTES EN LA CUENCA DEL RÍO CAQUENA. FUENTE: BALANCE DGA (1987) 1266
TABLA 8.28 BALANCE HÍDRICO ANUAL EN LA CUENCA DEL LAGO CHUNGARA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1267
TABLA 8.29. COMPONENTES DEL BALANCE HÍDRICO EN LA CUENCA DEL LAGO CHUNGARA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1269
TABLA 8.30. SÍNTESIS DE LOS BALANCES HÍDRICOS REFERENTES EN LA CUENCA DEL LAGO CHUNGARA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA EN BASE A ANTECEDENTES. 1270
TABLA 8.31 BALANCE HÍDRICO ANUAL EN LA CUENCA DEL RÍO LAUCA EN JAPU. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1272
TABLA 8.32. COMPONENTES DEL BALANCE HÍDRICO EN LA CUENCA DEL RÍO LAUCA EN JAPU. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1273
TABLA 8.33. SÍNTESIS DE LOS BALANCES HÍDRICOS REFERENTES EN LA CUENCA DEL RÍO LAUCA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA EN BASE A ANTECEDENTES. 1274
TABLA 8.34 BALANCE HÍDRICO ANUAL EN LA CUENCA DEL SALAR DE SURIRE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 1276
TABLA 8.35. COMPONENTES DEL BALANCE HÍDRICO EN LA CUENCA DEL SALAR DE SURIRE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1277
TABLA 8.36. SÍNTESIS DE LOS BALANCES HÍDRICOS REFERENTES EN LA CUENCA DEL SALAR DE SURIRE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1278
TABLA 8.37 ESTIMACIÓN RECARGA DESDE EL RÍO EN EL ACUÍFERO RÍO LLUTA BAJO FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1279
TABLA 8.38 BALANCE ACUÍFERO RÍO LLUTA BAJO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1280
TABLA 8.39 ESTIMACIÓN MENSUAL RECARGA DESDE EL RÍO EN EL ACUÍFERO RÍO LLUTA BAJO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1281

TABLA 8.40 BALANCE MENSUAL ACUÍFERO RÍO LLUTA BAJO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1281
TABLA 8.41 ESTIMACIÓN RECARGA DESDE EL RÍO EN EL ACUÍFERO RÍO SAN JOSÉ BAJO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1282
TABLA 8.42 BALANCE ACUÍFERO DEL RÍO SAN JOSÉ BAJO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1283
TABLA 8.43 ESTIMACIÓN MENSUAL DE LA RECARGA DESDE EL RÍO EN EL ACUÍFERO RÍO SAN JOSÉ BAJO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1284
TABLA 8.44 BALANCE MENSUAL ACUÍFERO RÍO SAN JOSÉ BAJO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ... 1284
TABLA 8.45 ESTIMACIÓN RECARGA DESDE EL RÍO EN EL ACUÍFERO QUEBRADA CHACA VÍTOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1285
TABLA 8.46 BALANCE ACUÍFERO DE LA QUEBRADA CHACA-VITOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. . 1286
TABLA 8.47 ESTIMACIÓN MENSUAL RECARGA DESDE EL RÍO EN EL ACUÍFERO DE LA QUEBRADA CHAVA VÍTOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1287
TABLA 8.48 BALANCE MENSUAL ACUÍFERO DE LA QUEBRADA CHACA-VITOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1287
TABLA 8.49 BALANCE LEGAL DE LA CUENCA DE LA QUEBRADA DE LA CONCORDIA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1288
TABLA 8.50 BALANCE LEGAL DE LA CUENCA DEL RÍO LLUTA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1289
TABLA 8.51 BALANCE LEGAL DE LA CUENCA DEL RÍO SAN JOSÉ. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1290
TABLA 8.52 BALANCE LEGAL DE LA CUENCA DE LA QUEBRADA CHACA-VÍTOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1291
TABLA 8.53 BALANCE LEGAL DE LA CUENCA DEL RÍO CAMARONES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1292
TABLA 8.54 BALANCE LEGAL DE LA CUENCA DE LOS RÍOS UCHUSUMA Y CAQUENA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1293
TABLA 8.55 BALANCE LEGAL DE LA CUENCA DEL LAGO CHUNGARA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1294
TABLA 8.56 BALANCE LEGAL DE LA CUENCA DEL RÍO LAUCA FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1295
TABLA 8.57 BALANCE LEGAL DE LA CUENCA DEL SALAR DE SURIRE FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 1296
TABLA 9.1 Nº DE ASOCIACIONES Y COMUNIDADES INDÍGENAS POR COMUNA, REGIÓN XV. FUENTE: GUTIÉRREZ Y VILLACORTA, 2011, SOBRE BASE DE DATOS CONADI 2011. 1301

1. **Introducción**

La Dirección General de Aguas (DGA), a través de su Dirección Regional ha encargado el estudio "Análisis Integral de Soluciones a la Escasez Hídrica, Región de Arica y Parinacota" a la empresa Ingeniería y Consultoría en Aguas (ICASS) con el objetivo general de levantar y actualizar la información disponible sobre la situación de recursos hídricos de la XV Región de Arica y Parinacota, de manera de generar balances hídricos de las distintas cuencas y unidades existentes considerando los múltiples factores que intervienen a este efecto y estableciendo las principales brechas de información que actualmente existen para la obtención de un Balance Hídrico acabado de la Región.

Frente a un escenario en que las demandas de agua han aumentado en relación directa con el crecimiento económico y desarrollo social de los últimos años, en una zona del país en que ya se encuentran comprometidos los recursos para los usos actuales, es necesario disponer de un conocimiento acabado, tanto de la disponibilidad como de la demanda de agua, para poder tomar las decisiones correctas a la hora de gestionarla.

Cuando se trata de disponibilidad, esto incluye información tanto de la estacionalidad que implica diferencias importantes en la escorrentía durante el año, así como información de la variabilidad hidrológica, generando eventos importantes de crecidas y períodos de escasez que tienen graves consecuencias socio económicas. Por otra parte, también se requiere un conocimiento de iniciativas y proyectos tendientes a buscar nuevas fuentes, entre ellas la desalinización del agua de mar.

En el caso de la demanda, se requiere información precisa de los recursos comprometidos a través de derechos de aprovechamiento de agua, así como de la forma en que se están utilizando por parte de los distintos tipos de usuario. El conocimiento acerca de la demanda del recurso también debe incluir la estimación de las necesidades de agua del medio natural, de manera que los balances permitan una gestión sostenible en el tiempo.

Este diagnóstico será una herramienta fundamental que dispondrá la DGA para plantear planes de gestión del recurso hídrico de la Región, que consideren soluciones

a nivel multisectorial y permitan gestionar adecuadamente el agua frente a períodos de sequía como el que se ha vivido en los últimos años en nuestro país.

Este documento corresponde a la entrega de la segunda etapa del proyecto, en el que se actualizan y estiman las demandas hídricas superficiales y subterráneas de cada una de las cuencas de la región, tanto en términos de demandas legales vigentes (derechos de agua) como de las demandas de uso real, y en el que además se realizan las proyecciones de las demandas futuras.

2. **Objetivos**

El objetivo general del presente estudio es establecer un diagnóstico acabado y multidimensional de la situación de los recursos hídricos de la región a partir de catastros, levantamientos hidrológicos e hidrogeológicos, recopilación de información primaria y actualización y análisis de la información disponible relacionada con el recurso, determinando las brechas de información en función de la necesidad de establecer un balance hídrico en la región.

Los objetivos específicos son los siguientes:

- Realizar una recopilación de todos los antecedentes de las cuencas en estudio, a través de una revisión exhaustiva de la información existente, estudios anteriores y los que se hayan desarrollado en el transcurso del presente estudio.
- Actualizar las demandas hídricas de los sistemas: extracciones de aguas superficiales y subterráneas: Uso real (demanda evapotranspirativa), demanda legal vigente (Derechos de aguas) y realizar las proyecciones de demandas futuras, para lo cual se realizarán.
- Realizar los estudios de las transacciones realizadas de los derechos de aguas, analizando sus consistencias en cuanto a los derechos originales. Desarrollar una herramienta (plataforma) que permita seguir, analizar en forma fácil y rápida estas transacciones y la cual permita su actualización periódica con el ingreso de nuevas transacciones o derechos (Utilizando Teoría de Grafos), determinando la cadena de transferencias de un título vigente desde su origen.
- Actualizar las ofertas hídricas de los sistemas: considerando la estadística hidrológica, estudios, balances existentes, estudios en curso, entre otros, con lo que se obtendrán las recargas, caudales medios mensuales, isoyetas, calidad de agua y toda la información que permita una aceptada inteligencia de los volúmenes y caudales disponibles.
- Generar los balances de entrada y salida de cada una de las fuentes, tanto legales (Derechos) como efectivas (consumo). Para el consumo efectivo debe obtenerse la demanda mensual de cada uno de los actores en cada una de las

fuentes teniendo en consideración la estacionalidad y temporalidad de los cultivos, industrial y sanitaria, identificando periodos críticos.

3. **Localización de la zona de estudio**

El área de influencia del estudio se ubica en la Región de Arica y Parinacota (Figura 3.1) abarcando cada una de sus cuencas principales. La XV Región de Arica y Parinacota es la más septentrional de las quince regiones en las que se encuentra dividido Chile. Limita al norte con Perú, al este con Bolivia, al sur con la Región de Tarapacá y al oeste con el océano Pacífico.

La Región cuenta con una superficie de 16.800 km^2 y una población de 235.081 habitantes según la proyección del INE de 2014. La región está compuesta por las provincias de Arica y Parinacota, y la capital regional es la ciudad de Arica. La Región de Arica y Parinacota fue creada el 8 de octubre de 2007, segregando su territorio de la antigua Región de Tarapacá, al entrar en vigor la ley N°20 175. Se caracteriza por ser una zona de extrema aridez, y que es atravesada por una serie de quebradas con pequeños a nulos cauces temporales. La distribución temporal de las aguas superficiales, responde claramente al régimen de precipitaciones proveniente del periodo estival, con mayores caudales entre los meses de diciembre a marzo.

Figura 3.1 Localización de la zona de estudio. Fuente: elaboración propia.

4. **Presentación a las Comunidades**

Los procesos de Participación Comunitaria son esenciales para el logro de proyectos con pertinencia sociocultural, pero también que consideren las perspectivas y visiones que la comunidad sostiene respecto a su propio entorno sociocultural, biológico y medioambiental. Esto forma parte de diversos procesos ocurridos en toda Latinoamérica, ligados a la democratización del Estado, los que, entre otros resultados, han impactado fuertemente en la gestión gubernamental de los Estados latinoamericanos. Estas transformaciones de gestión han cristalizado en la creación y promoción de mecanismos para la participación de la sociedad civil, tanto en políticas y decisiones públicas, como en la gestión de diversos servicios o programas públicos[1].

La participación ciudadana se puede entender como el involucramiento de la ciudadanía en procesos de toma de decisiones "en temas y actividades que se relacionan al desarrollo económico, social y político, así como el involucramiento en la ejecución de dichas decisiones, para promover, en conjunto con actores sociales e institucionales, acciones, planificaciones y decisiones hacia el Estado"[2].

De este modo, los procesos de generación y aplicación de políticas públicas deben considerar, de forma transversal, el diálogo con la comunidad que se relaciona directa y/o indirectamente con ellas, ya que es parte fundante y central de estos procesos, puesto que éstos son los actores que conforman los escenarios en los que estos procesos se producen. De este modo, es fundamental conocer quiénes conforman la comunidad con la que nos encontraremos en esta región, especialmente porque se solicita un cierto número de reuniones y actividades que la considera, y que deben ser realizadas a la luz de sus características generales.

1 Pérez Ordóñez, Demetrio, en "Manual de capacitación de la Ley de CDUR 2002" Programa de Participación y Democracia FLACSO Guatemala - Universidad Rafael Landivar. En Participación Ciudadana y Políticas Públicas. Una problematización acerca de la relación Estado y Sociedad Civil en América Latina en la última década. Alejandro Escobar L. http://mingaonline.uach.cl/scielo.php?pid=S0718-17952004000100007&script=sci_arttext

2 Íbid

En primer lugar, este proyecto considera trabajar con población indígena, que es mayoritaria en 3 de las 4 comunas que conforman la región de Arica y Parinacota. De acuerdo a los datos proporcionados por el Instituto Nacional de Estadísticas (INE) del 2002, cuya distribución étnica de la región se presenta en la Tabla 4.1, se obtuvo que del total de 189.644 habitantes de la región de Arica y Parinacota, los grupos indígenas representan un 15,5%. En cifras regionales, el pueblo aymara cuenta con el 13,6% del total de la población de la región. En relación a la población indígena total de la región, el porcentaje de adscripción al grupo aymara alcanza un 87,3% del total de los grupos étnicos. De este modo, es posible decir que los aymaras representan la mayoría de la población étnica en la región de Arica y Parinacota[3].

Tabla 4.1 Distribución étnica en la región de Arica y Parinacota. Fuente: INE (2002).

Se considera perteneciente a:	Región de Arica y Parinacota		
	Sexo		Total
	Hombre	Mujer	
Alacalufe	21	18	39
Atacameño	266	228	494
Aymara	12.643	13.087	25.730
Colla	109	63	172
Mapuche	1.388	1.183	2.571
Quechua	204	190	394
Rapa Nui	24	13	37
Yámana	21	26	47
Ninguno de los anteriores	79.917	80.243	160.160
Total	94.593	95.051	189.644

3 Diagnóstico Propuesta Ejes Estratégicos Área Desarrollo Indígena Alto Andino Región de Arica y Parinacota en Base a Participación Dirigencial en Asambleas Territoriales Comunales. Kimsa Wara Consultores. 2010.

Según se puede observar en la Tabla 4.2, el Censo del año 2012 mostró un aumento de la población y de la distribución indígena de la región.

Tabla 4.2 Distribución étnica en la región de Arica y Parinacota. Fuente: INE (2012).

Se considera perteneciente a:	Región de Arica y Parinacota		
	Sexo		Total
	Hombre	Mujer	
Mapuche	3.173	2.911	6.084
Aymara	23.727	26.218	49.945
Rapa Nui	12	11	23
Likan Antai	80	72	152
Quechua	702	755	1.457
Colla	106	120	226
Diaguita	511	543	1.054
Kawésqar	11	4	15
Yagán o Yámana	6	13	19
Otro	1.267	1.453	2.720
Ignorado	315	308	623
Total	29.910	32.408	62.318

Por otra parte, según se puede observar en la Tabla 4.3 de la Encuesta de Caracterización Socioeconómica Nacional (CASEN) del año 2013, ésta muestra un aumento sostenido de la población indígena regional.

Tabla 4.3 Evolución de la Población Indígena en la Región de Arica y Parinacota. Fuente: Casen 2013. Pueblos Indígenas. Síntesis de Resultados. Ministerio de Desarrollo Social. 15 Marzo 2015.

Año / %Variación	2006	%	2009	%	2011	%	2013	%
Población Indígena	40.052	3,8	45.376	4,0	46.187	3,4	54.075	3,5

Los Censos y los datos de la Encuesta CASEN muestran, para todas las comunas de esta región, un aumento de la población indígena, dada no necesariamente por un aumento de nacimientos, sino por un fuerte proceso de autoadscripción y reconocimiento que se ha producido en la zona en los últimos años.

Se observa también una población configurada mayoritariamente por adultos mayores; las comunas rurales de esta región no muestran señales de altos nacimientos, sino

más bien de un proceso gradual de envejecimiento, el que se profundiza por la opción progresiva de las personas que residen en las ciudades, por el regreso a sus comunas de origen luego de jubilar o terminar su vida productiva 'urbana'[4].

Respecto a la distribución de la población regional, en la Tabla 4.4 se presenta la distribución por comunas.

Tabla 4.4 Distribución de la población en la región de Arica y Parinacota. Fuente: http://sir.mideplan.cl Marzo de 2009.

Provincia	Comuna	Sede comunal	Población	Superficie	Densidad
Arica Capital: Arica	Arica	Arica	185.268	4.799,4	38,60
	Camarones	Cuya	1.220	3.927,0	0,31
	Total Provincial		186.488	8.726,4	19,52
Parinacota Capital: Putre	Putre	Putre	1.977	5.902,5	0,33
	General Lagos	Visviri	1.179	2.244,4	0,53
	Total Provincial		3.156	8.146,9	0,47
Total Regional			189.644	16.873,3	11,24

En este contexto, el presente estudio releva lo establecido por el Convenio 169 de la OIT, sobre Pueblos Indígenas y Tribales en Países Independientes, aprobado por el Congreso Nacional, el 15 de septiembre de 2009, que es parte de la legislación chilena, establece un mecanismo de consulta a los pueblos indígenas, obligatorio de implementar por el Estado de Chile, que considere a las instituciones y organizaciones representativas de los pueblos, para que participen libremente de las decisiones que les afecten, las que deben realizarse en contexto de buena intención y de clara evidencia de lograr consentimiento o acordar una medida específica. En esta propuesta, las acciones que se realizarán estarán en todo momento observando la pertinencia y coherencia con el marco y el espíritu que este convenio promueve.

[4] Íbid

4.1 Reuniones **Informativas PAC's**

La entrega de información se realizó en formato de reunión participativa a las organizaciones comunitarias (indígenas y no indígenas) vinculadas al recurso hídrico de las siguientes cuencas:

- Cuenca del río San José
- Cuenca del río Lluta
- Cuenca del Río Camarones
- Cuencas Costeras: Chaca- Vítor
- Cuencas de la quebrada de La Concordia
- Cuencas Hidrográficas del Altiplano

Se realizaron reuniones bajo la siguiente estructura: 5 reuniones de presentación del proyecto en la zona, distribuidos en tres semanas de trabajo en terreno por parte del equipo responsable del PAC, incluidas las reuniones de coordinación interinstitucional, difusión y ejecución de estas reuniones y su respectivo informe de sistematización, cuyas Fichas de los Talleres de Difusión se adjuntan en el Anexo I. Estas reuniones se estructuraron en el orden indicado en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5 Estructura de la distribución de las reuniones de la presentación del proyecto a las comunidades. Fuente: elaboración propia.

Cuencas	Lugar de Realización- Comuna	Reunión 1 Poconchile	Reunión 2 Arica	Reunión 3 Putre	Reunión 4 Codpa	Reunión 5 Camarones
Cuenca del Río San José	Poblado de Azapa		X			
Cuenca del Río Lluta	Poblado de Poconchile	X				
Cuenca de la Q. Camarones	Poblado de Camarones				X	X
Cuencas Costeras: Chaca- Vítor	Poblado de Chaca				X	X
Cuencas de la Quebrada de la Concordia	Ciudad de Arica		X			
Cuencas Hidrográficas del Altiplano	Poblado de Caquena			X		
Todas las Cuencas	Ciudad de Arica		X	X		

El flujo básico que ha seguido este proceso tiende a generar una apropiada difusión de las reuniones, coordinando la acción territorial con las distintas instituciones públicas y privadas que operan en la región, teniendo como marco de acción la pertinencia sociocultural de las reuniones (en horarios y lugares, entre otras consideraciones) y la representatividad de las organizaciones y comunidades convocadas.

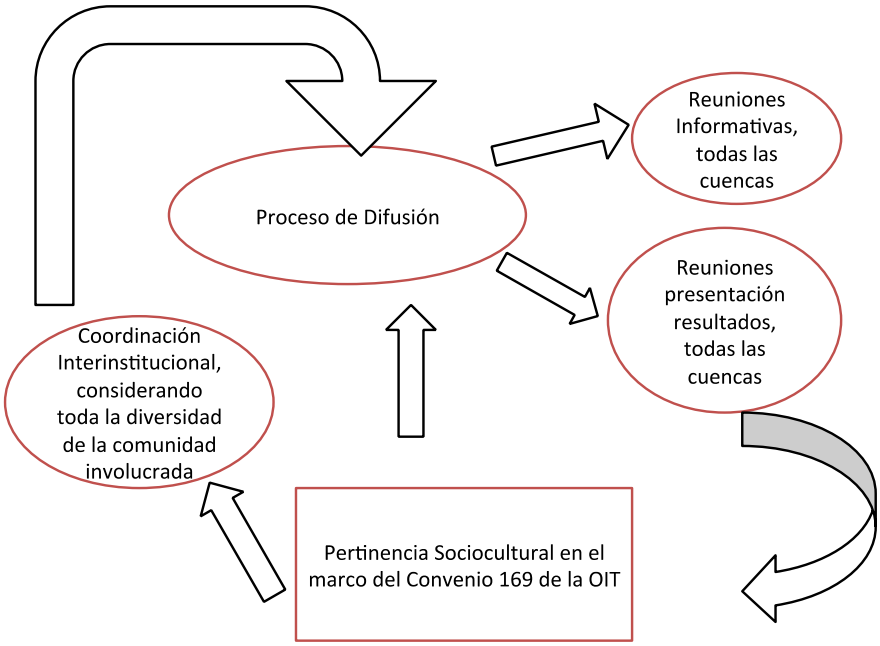


Figura 4.1 Flujo básico del proceso de presentación a las comunidades. Fuente: elaboración propia.

4.1.1 Metodología de Trabajo de reuniones

La reunión de presentación tuvo una misma estructura para todas las cuencas. En los sectores rurales se trabajó con mayor fuerza con las facilitadoras interculturales, especialmente para la convocatoria a las reuniones, ya que se explicaron los objetivos del proyecto a la comunidad desde sus propias características socioculturales. Además, las facilitadoras fueron responsables de traducir al aymara los términos técnicos que se trabajarían en las reuniones. Esto se realizó a partir de un glosario básico con los términos recurrentes a utilizar a lo largo de todo el proyecto, el que fue desarrollado por el equipo de técnicos que forman parte del equipo de trabajo, el que fue traducido por las facilitadoras interculturales y que fue entregado en papel a todos los participantes a las reuniones, el que se anexa al final del Informe.

La metodología ajustada y finalmente realizada, fue discutida y revisada por la DGA, el MOP y el equipo ejecutor, en conjunto con las facilitadoras interculturales, cuya estructura de las reuniones fue la indicada en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6 Estructura de las presentaciones del proyecto a las comunidades. Fuente: elaboración propia.

Fases	Actividades
Primera Fase	- Presentación del equipo ejecutor y de los participantes de la reunión, así como de los objetivos y metodología del trabajo.
Segunda Fase	- Trabajo Expositivo del Equipo ejecutor respecto a los objetivos y alcance del proyecto. - Expuso Héctor Flores, Director Regional de la DGA, dando cuenta de los principales aspectos del proceso a desarrollar. - Expuso Bernardo Capino, Jefe de proyecto, con los aspectos operativos que se desarrollarán en el territorio entre Septiembre 2015 y Diciembre 2016. - Se entregó al inicio de cada reunión un glosario escrito con los términos técnicos básicos para comprender a cabalidad la propuesta de trabajo.
Tercera Fase	- Ronda Plenaria de Preguntas y Consultas. - Explicitación de principales 'nudos problema' expresados por la comunidad. - La consultora y las organizaciones públicas presentes responden las consultas expresados por la comunidad.
Cuarta Fase	- Cierre de la reunión, haciendo una síntesis del trabajo realizado, agradeciendo la participación y aporte de las organizaciones.

4.1.2 Lugares de realización reuniones

Los lugares específicos para realizar las reuniones se buscaron en coordinación con otras instituciones públicas, algunos municipios, como el de Putre, docentes y directores de escuelas ubicadas en las zonas de trabajo. En el que finalmente, las reuniones se realizaron en los lugares[5] indicados en la Tabla 4.7.

5 El detalle de cada una de estas reuniones, junto a los respectivos verificadores, se encuentra en el Anexo I de este informe.

Tabla 4.7 Lugares y fechas de las presentaciones a las comunidades. Fuente: elaboración propia.

Reunión	Lugar	Fecha y Hora
Reunión 1 Poconchile	Escuela G-35 Poconchile	Lunes 26 de Octubre 2015, 17:30 hrs.
Reunión 2 Putre	Salón Sergio Dini, Municipalidad de Putre	Martes 27 de Octubre 2015, 20:30 hrs.
Reunión 3 Arica	Hotel del Valle	Miércoles 28 de Octubre 2015, 16:30 hrs.
Reunión 4 Codpa	Salón Registro Civil Codpa	Jueves 29 de Octubre 2015, 12:30 hrs.
Reunión 5 Camarones	Junta de Vecinos N° 3	Jueves 29 de Octubre 2015, 18:30 hrs.

4.1.3 Convocatoria

Respecto a la convocatoria, ésta se realizó sobre los datos secundarios disponibles en las dos instituciones públicas vinculadas directamente con este estudio; asimismo, se contactó a las ONG's, Consultoras y organismos públicos y privados para detectar representantes de organizaciones comunitarias vinculadas con esta iniciativa, líderes formales e informales, organizaciones rurales que funcionen en la ciudad de Arica, organizaciones urbanas que se vinculen con este proyecto, entre otros posibles. Los facilitadores interculturales jugaron un papel central en este proceso, por cuanto apoyaron este proceso con un bagaje de conocimientos y redes que ya poseían.

La convocatoria se realizó básicamente utilizando dos premisas:

- Debe entregarse una invitación física, en papel.
- Debe ser una convocatoria 'cara a cara'.

Esto, sobre la base del conocimiento que se tiene de las comunidades, especialmente las rurales, donde es fundamental establecer un lazo de comunicación que motive la asistencia a las reuniones de este tipo.

En la ciudad de Arica, las convocatoria siguió este patrón, apoyados con un vehículo que permitió que una de las facilitadoras lograra contactar con 128 Asociaciones Indígenas, 69 Comunidades Indígenas, 16 Consejeros Aymaras, 14 Consejeros Regionales y todos los servicios públicos ligados directa o indirectamente con esta

iniciativa[6]. Luego de entregadas las invitaciones en un período de tres días, se las contactó telefónicamente para confirmar la asistencia a la/las reuniones. Esto, porque en varios casos se entregaron invitaciones a una o dos reuniones, en vista de la residencia urbana de algunos dirigentes que trabajan por alguna comuna rural, lo que permitía que, de no poder asistir a alguna de las reuniones en la zona rural, pudieran estar en la reunión que se realizaría en la ciudad de Arica, que de algún modo centralizó la participación de la dirigencia.

En los sectores rurales se realizaron tres series de viajes para la convocatoria, el primero para verificar lugares de realización de las reuniones, así como posibles fechas y horarios, el segundo para la entrega de invitaciones bajo las dos premisas establecidas y un tercero para re- confirmar la participación de los convocados, lo que fue realizado por otra facilitadora intercultural.

A este énfasis por lograr un contacto cercano con los convocados a las reuniones informativas, se agregó la utilización de afiches informativos, que tenían como objetivo respaldar la invitación realizada de forma presencial con las comunidades.

4.2 Coordinación Interinstitucional

Se realizó un proceso de coordinación con las instituciones públicas que se hacen parte de este proyecto, de acuerdo a sus respectivas funciones institucionales, lo que aportó en información organizacional, lugares de realización de reuniones, así como en contactos de todo tipo para apoyar este proceso.

De este modo, fue central el vínculo con la Unidad de Gestión Ambiental y Territorial de la Secretaría Regional Ministerial de Ministerio de Obras Públicas, quiénes fueron fundamentales para la difusión en los medios de comunicación, como Arica Tv y la Radio Cappíssima.

6 Se anexa verificador de entrega de invitaciones a distintos Servicios Públicos y Municipios de la región.

Ya se ha establecido la gran cantidad de indígenas, especialmente aymaras, que residen en la región. Por ello, con la Corporación de Desarrollo Indígena, CONADI, fue fundamental en la identificación de agrupaciones indígenas, asociaciones gremiales, asociaciones de regantes, asociaciones de mujeres y especialmente en el contacto con Consejeros del Área de Desarrollo Indígena (ADI) de la región.

Asimismo, se consideró involucrar a otras instituciones públicas vinculadas a este proyecto, especialmente con el Municipio de Putre y con la Unidad de Desarrollo Social, del Ministerio de Desarrollo Social. Con los primeros se coordinó la reunión de Putre y con los segundos se obtuvo listados actualizados de Juntas de Vecinos y otras organizaciones de la región.

4.3 Proceso y Estructura de la Difusión Comunitaria

La específica forma de trabajo para difundir el proyecto, tanto en su inicio, proceso y finalización, se elaboró en concordancia a las sugerencias que todas las instituciones públicas realizaron. No obstante, se consideraron dos estrategias distintas para las organizaciones que residen en sectores urbanos y/o en sectores rurales del territorio.

Los posibles recursos comunicacionales consideran, entre otros:

- TV. En el noticiero nocturno del canal Arica TV, de cobertura urbana. Se entrevistó al Director Regional sobre los principales elementos del proyecto a realizar y sobre el proceso de reuniones a la comunidad.
- Radio. En las radios de cobertura local y comunal más escuchadas por las organizaciones y/o población indígena. En la ciudad de Arica, se entrevistó al Director Regional de la DGA en radio Cappíssima por parte de José Toribio Vergara, quién expresó su apoyo para otras entrevistas cuando el proyecto vaya teniendo sus primeros resultados.
- Afiches informativos. Tanto del proyecto como de las instancias de reuniones y de los avances e incidencias que presente la ejecución del proyecto en lugares visibles y de gran asistencia de público.

5. **Recopilación y Revisión de Antecedentes**

La recopilación de antecedentes ha incluido informes publicados en el catálogo bibliográfico de la Dirección General de Aguas, antecedentes correspondientes a evaluaciones de impacto ambiental, informes y estudios de las empresas sanitarias, de instituciones públicas, de revistas científicas, y de antecedentes solicitados a las empresas mineras del área. Posterior a la recopilación se han revisado 146 estudios y artículos sugeridos en las bases, donde además se incluyeron estudios y publicaciones científicas relevantes para el proyecto. Para cada uno de los antecedentes se confeccionó una ficha donde se destaca la relevancia y se realiza un análisis crítico de la información presentada. En el Anexo II se presentan las fichas asociadas a cada uno de los antecedentes anteriormente mencionados.

En la Figura 5.1 se presenta el rango del número de informes relacionados con los recursos hídricos de cada cuenca. Se observa que las cuencas con mayor número de antecedentes son las cuencas de los ríos Lluta y San José, mientras que la cuenca con menor información es la cuenca de la quebrada Chaca-Vítor. A continuación se presenta un breve resumen de la información revisada y analizada hasta el momento, a nivel regional y en las diferentes cuencas de la región de Arica y Parinacota.

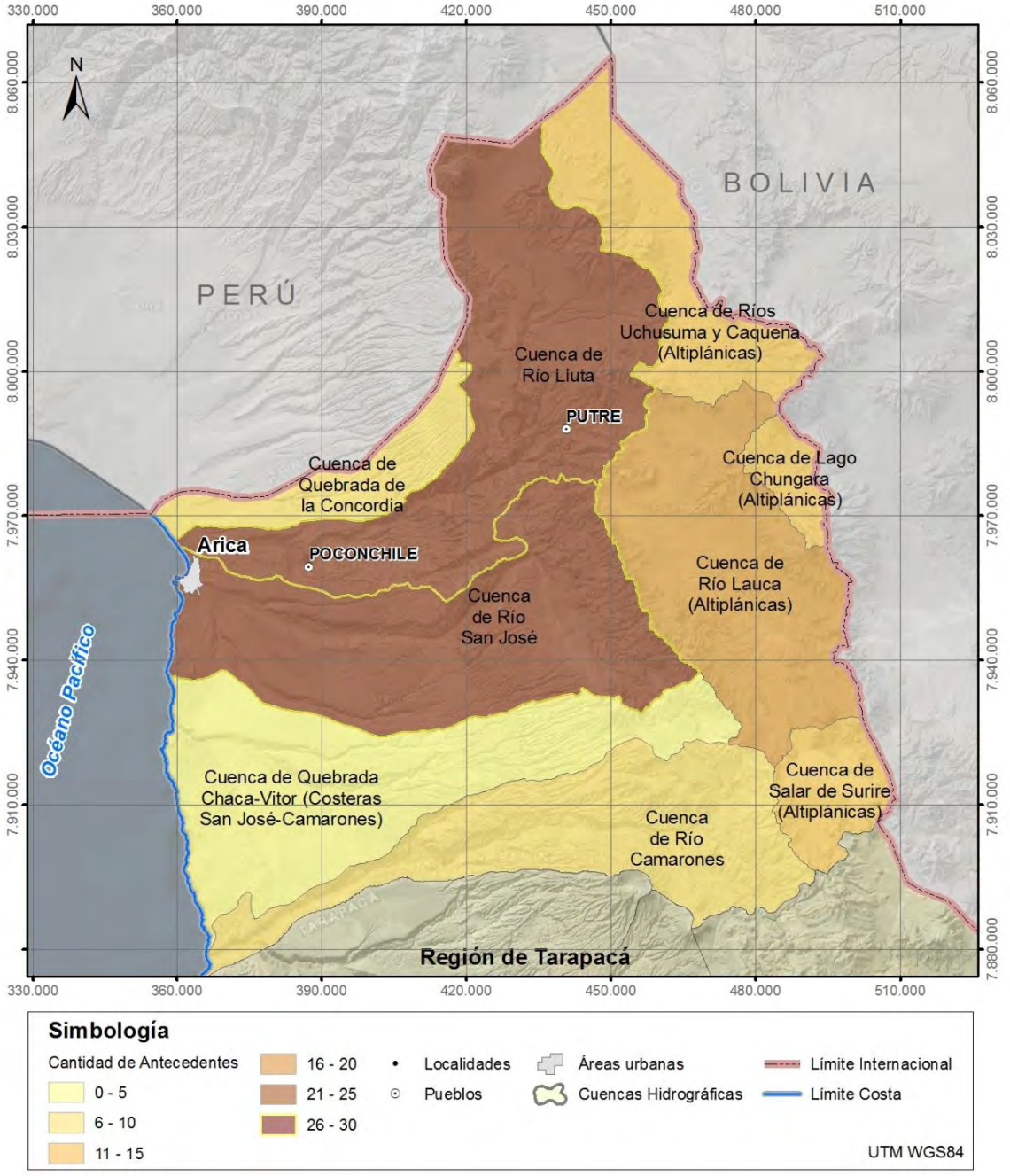


Figura 5.1 Distribución del número de informes existentes en cada cuenca relacionados con los recursos hídricos en la región de Arica y Parinacota. Fuente: elaboración propia.

5.1 Regional

A nivel nacional y regional se ha revisado varios estudios referentes a los recursos hídricos entre los cuales se mencionan los siguientes, que se refieren tanto a temas técnicos específicos como a documentos de planificación regional:

- GRILLI, A. (1986). Evaluación de la evaporación desde salares, utilizando trazadores naturales ambientales.
- GRILLI, A. y VIDAL, F. (1986). Evaporación desde salares: Metodología para evaluar los recursos hídricos renovables. Aplicación a las regiones I y II. Revista de la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica, Vol. 1, Año 1, No 2.
- IPLA Ingenieros Consultores (1986). Estudio del Mapa Hidrogeológico Nacional. Escalas 1:1.000.000 y 1:2.500.000. Ministerio de Obras Públicas. Dirección General de Aguas.
- DGA (1986). Mapa Hidrogeológico de Chile. Escala 1:2.500.000. Texto Explicativo. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Departamento de Hidrología, Subdepartamento de Estudios Hidrológicos, Santiago, Chile, Realizado por: Ingeniería y Planificación IPLA Ltda.
- DGA (1987). Balance Hídrico de Chile. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Departamento de Hidrología, Subdepartamento de Estudios Hidrológicos, Santiago, Chile. Realizado por: Dirección General de Aguas.
- BF INGENIEROS CIVILES (1989). Investigación de eventos hidrometeorológicos extremos. Precipitaciones máximas en 24, 48 y 72 horas.
- GRILLI, A. (1989). Recursos Hídricos en las Provincias de Arica y Parinacota.
- DGA (1989). Mapa Hidrogeológico. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Departamento de Hidrología. Realizado por: Dirección General de Aguas.
- BF INGENIEROS CIVILES (1991a). Actualización de la estadística meteorológica. Temperaturas diarias.
- REG (1991). Estudio de síntesis de catastros de usuarios de aguas e infraestructuras de aprovechamiento.
- INYGE (1991). Estudio análisis de los recursos de agua de la primera región de Tarapacá.
- DGA (1992). Situación de Recursos Hídricos I Región. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Departamento de Hidrología. Realizado

por: Servicio Agrícola y Ganadero, Dirección de Riego, Dirección General de Aguas.

- AYALA, CABRERA y ASOCIADOS (1994a). Análisis redes de vigilancia calidad aguas terrestres estadística hidroquímica nacional. Etapa I.
- IPLA (1996). Análisis uso actual y futuro de los recursos hídricos de Chile.
- DGA (1997) Estadísticas de caudales, estaciones fluviométricas. Hoya Lluta, Caquena, San José, Laguna Chungara-Lauca, Quebrada Vítor. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Departamento de Hidrología. Realizado por: Dirección General de Aguas.
- ANDRADE GUTIERREZ – LUSAC (1999). Estudio reúso agrícola de las aguas servidas de Arica. Prefactibilidad.
- ARAVENA *et al.* (1999). Isotopic composition and origin of the precipitation in Northern Chile.
- REG (1999). Diagnóstico situación actual de las organizaciones de usuarios de aguas a nivel nacional.
- AYALA, CABRERA y ASOCIADOS (2001). Actualización de recursos hídricos para restablecimiento de derechos ancestrales indígenas I y II Regiones. Informe Final. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Santiago, Chile. S.I.T. N°73.
- AC ING. y AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (2003). Diagnóstico del Riego y Drenaje en la Primera Región. Comisión Nacional de Riego.
- GARCÍA, M. *et al.* (2004). Hoja Arica – Región de Tarapacá. Carta Geológica.
- LOUCKS Y VAN BEEK (2005). Water resources systems planning and management
- AC ING. y AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (2006). Análisis y determinación de caudales de reserva para abastecimiento de la población y usos de interés nacional. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Santiago, Chile. S.I.T. N°116.
- AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (2007). Estimaciones de Demanda de Agua y Proyecciones Futuras. Zona I Norte. Regiones I a IV.
- AC ING. y AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (2007). Levantamiento de derechos de agua afectos al pago de patente etapa III: Regiones I, II y III S.I.T. N°128.
- AGUILERA, F. (2008). Origen y naturaleza de los fluidos en los sistemas volcánicos, geotermales y termales de baja entalpía de la zona volcánica central.

- CONADI (2009). Seminario: "Defensa de los derechos ancestrales sobre las aguas de las personas y comunidades indígenas".
- TRIVELLI, M. Y VALDIVIA, V. (2009). Alcances sobre flora y vegetación de la cordillera de los Andes.
- GORE ARICA Y PARINACOTA (2009). Estrategia regional de desarrollo, Región de Arica y Parinacota.
- DGA (2010). Plan de acción estratégico para el desarrollo hídrico de la región de Arica y Parinacota. S.D.T. nº 306. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación. Santiago, Chile. Realizado por: División de Estudios y Planificación.
- UTA-DGA (2010a). Apoyo técnico para la mesa regional del agua en la región de Arica y Parinacota, y desarrollo de estrategias regionales del recurso hídrico. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Panificación, Arica, Chile. Realizado por: Universidad de Tarapacá.
- GCF Ingenieros Ltda. (2010). Metodología para la estimación de recarga de cuencas altiplánicas y precordilleranas de vertiente pacífica en el norte de Chile, XV, I II y III regiones.
- MOP (2010). Región de Arica y Parinacota 2020. Obras públicas para el desarrollo.
- AQUATERRA (2011). Estimación de recargas en cuencas altiplánicas y precordilleranas de vertiente Pacífica.
- SUBDERE (2013). Guía, análisis y zonificación de cuencas hidrográficas para el ordenamiento territorial.

Respecto al tema hidrológico, existen estudios que estiman la recarga de cuencas altiplánicas, precordilleranas y cordilleranas (AQUATERRA, 2011, GCF ING., 2010)

Por otra parte se han desarrollado estudios que elaboran metodologías para la estimación de evaporación en salares y así favorecer la estimación de recursos hídricos en estos medios (Grilli y Vidal, 1986; Grilli, 1986).

Existen una serie de documentos que dan cuenta de la calidad físico química del agua en las principales cuencas, su origen (AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS, 1994a; Aravena, 1999) y caracterización de aguas termales (Aguilera, 2008).

El mayor énfasis en estudios regionales está puesto en la estimación de demandas del recurso (IPLA, 1996; AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS, 2001; AC ING., y AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS, 2006, 2007; AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS, 2007), en que se diferencian los tipos de uso, los derechos concedidos, derechos ancestrales y las necesidades hídricas confrontado con la disponibilidad del recurso.

Se ha recopilado información acerca de documentos de diagnóstico y/o planificación regional en que se plantean acciones estratégicas y soluciones estructurales con el objetivo de aliviar la disponibilidad y seguridad de abastecimiento del agua (Grilli, 1989; INYGE, 1991;, GORE Arica y Parinacota, 1992; Andrade Gutiérrez – LUSAC, 1999; DGA, 1992; 2010; UTA-DGA, 2010a; MOP, 2010), así como de planificar y gestionar recursos hídricos a partir de distintos tipos de modelos (Louck y van Beek, 2005).

Se recopiló información meteorológica, entre la que se cuenta una evaluación de eventos hidrometeorológicos extremos (BF Ingenieros Civiles, 1989), una actualización de las estadísticas meteorológicas (BF Ingenieros Civiles, 1991).

Dentro de otros estudios regionales, se cuenta con un estudio de flora y vegetación de la cordillera de los andes (Trivelli y Valdivia, 2009), una guía para el ordenamiento territorial según el análisis y zonificación de cuencas hidrográficas (SUBDERE, 2013)

Respecto a la información hidrológica e hidroquímica, en la región se dispone de la información de las estaciones fluviométricas, meteorológicas, sedimentológicas y calidad de aguas, cuyo resumen se presenta en la Tabla 5.1, además de un estudio en el que se entregan estadísticas de caudales y estaciones fluviométricas (DGA, 1997).

Tabla 5.1 Resumen de estaciones fluviométricas, meteorológicas, sedimentológicas y de calidad de aguas controladas por la DGA.

Tipo	Estado	Cantidad
Fluviométrica	Vigente	21
	Suspendida	17
	Total	38
Meteorológica	Vigente	25
	Suspendida	16
	Total	41
Sedimentológica	Vigente	1
	Suspendida	0
	Total	1
Calidad de aguas	Vigente	32
	Suspendida	59
	Total	91

Para la revisión de los datos existentes relacionados con el catastro de derechos se ha tomado el Catastro Público de Aguas (CPA) de la Dirección General de Aguas, los estudios específicos relacionados con el catastro, como el de REG (1991), IPLA (1996), REG (1999), AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (2001), AC ING. y AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS; (2007), CONADI (2009) y los levantados y analizados de las Inscripciones del Conservador de Bienes Raíces de Arica.

Por otro lado, se han recopilado las siguientes cartas cartográficas del Instituto Geográfico Militar (IGM) de escala 1:50.000: Aguas Calientes, General Lagos, Visviri, Cerro Tabajchuño, Villa Industrial, Casopilla, Portezuelo Achuta, Sierra de Huaylillas, Putre, Cerro Larancagua, Volcán Parinacota, Arica, Poconchile, Estación Central, Belén, Cerro Tejene, Volcán Guallatiri, Cerro Camaraca, Valle de Azapa, Santuario Las Peñas, Pampa de Oxaya, Tignámar, Uncaliri, Punta Madrid, Chaca, Pintatane, Codpa, Sucuna, Surire, Quilhuiri, Caleta Camarones, Cuya, Hacienda Camarones, Miñimiñi, Embalse Caritaya, Cerro Pumiri y Volcán Isluga. Y las cartas cartográficas del Instituto Geográfico Militar (IGM) de escala 1:250.000: Visviri, Arica, Pisagua y Pisiga-Chile.

La información geológica se ha obtenido del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN). Las cartas geológicas que corresponden a la zona de estudio son: la Hoja Arica, Región de Tarapacá de escala 1:250.000 (García, 2004); de escala

1:100.000 las cartas Visviri y Villa Industrial, Cuadrángulos Arica y Poconchile, la geología del área Cuya y la carta Camiña; y de escala 1:50.000 son la Geología del volcán Parinacota, la geología del complejo volcánico Taarapacá, los cuadrángulos Camaraca y Azapa. Además, existe la espectrometría de rayos gamma de potasio, torio y uranio de la carta de Chaca, Codpa y Surire de escala 1:100.000 y la carta magnética de Chaca, Codpa y Surire de escala 1:100.000. También se ha considerado como base el Mapa Geológico de Chile de escala 1:1.000.000.

Para la información hidrogeológica se ha tomado como base la carta hidrogeológica de escala 1:1.000.000.

Y finalmente se cuenta con el balance hídrico general de las cuencas en DGA (1987).

5.2 Cuenca de la quebrada La Concordia

La cuenca de la quebrada de La Concordia o Escritos se encuentra ubicada al norte de la región y limita al norte con Perú, al sur y al este con la cuenca del río Lluta y al oeste con el océano Pacífico. En la cuenca existen dos quebradas, la de Escritos y la de Caunire o Gallinazos de Concordia. La cuenca tiene una superficie de 2880 km^2, en el que sólo 720 km^2 se desarrollan en el lado chileno, y el resto en el lado peruano. La cuenca no se encuentra muy poblada, y sólo existen los asentamientos del aeropuerto, los controles fronterizos, y los 4 lotes que ha concesionado el Ministerio de Bienes Nacionales por 25 años.

Los informes específicos relacionados con la cuenca de la quebrada La Concordia revisados y analizados hasta el momento son:

- HENRIQUEZ, H. *ET AL.* (1976). Reconocimiento hidrogeológico del extremo norte de la provincia de Arica.
- AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (1998b). Estudio hidrogeológico quebrada de Escritos.
- INGESA (2006). Barrio industrial Chacalluta Zofri S.A. Evaluación de la vulnerabilidad del acuífero.
- PEÑA, F. *et al.* (2009). Hidrogeología de la cuenca del río Caplina, Región Tacna.
- DGA (2011a). Evaluación de los recursos hídricos subterráneos en el sector acuífero de La Concordia. S.D.T. Nº 314. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Departamento de Administración de Recursos Hídricos. Santiago, Chile. Realizado por: Departamento de Administración de Recursos Hídricos. Santiago.
- AUTORIDAD NACIONAL DEL AGUA (2012). Atlas de recursos hídricos del Perú.

La cuenca no cuenta con información hidrológica, ya que no existen estaciones pluviométricas ni fluviométricas en la misma cuenca. Según la información recopilada en el sector bajo (zona chilena) no presenta un flujo de agua superficial continúo. Sin embargo, según DGA (2011) se han presentado algunos eventos extremos en el sector alto (Perú) en el que han desviado las aguas hacia la quebrada y estas han bajado hasta el sector chileno. Las precipitaciones se producen sobre los 3000 m.s.n.m. y varían entre 50 a 200 mm por año.

En la cuenca La Concordia dominan las rocas volcánicas de la Formación Oxaya del Mioceno-Plioceno. La unidad acuífera corresponde al relleno del valle, que se encuentra constituido por 400 m de arenas de granulometría fina a media y de sedimentos marinos que aumenta hacia la línea de costa.

Según los antecedentes, los niveles freáticos se han mantenido constantes durante los últimos 40 años. Los niveles medidos en los pozos se localizan entre los 13 m en la zona próxima a la línea de costa hasta 84 m en la zona media. El flujo regional tiene dos direcciones, una dirección noreste desde la cuenca del río Caplina, con un gradiente aproximado de 1,1 ‰, y una dirección sureste desde la cuenca del río Lluta, con un gradiente entre 2 a 8 ‰. En el estudio de la DGA (2011) se considera que la transmisividad promedio es de 400 m^2/día, un gradiente hidráulico de 2,4 ‰ y un ancho de sección de 9.000 m, obteniendo un flujo subterráneo de 100 l/s. Por otro lado, un estudio específico de la quebrada de Escritos (Ayala, Cabrera y Asociados, 1998b) considera una transmisividad media de 350 m^2/día, un gradiente de 2,6‰ y un ancho de la sección de 5.000 m, obteniendo un flujo subterráneo de 52 l/s. A su vez, un estudio de vulnerabilidad de acuífero en el barrio industrial de ZOFRI S.A. (INGESA, 2006) calcula una transmisividad de 0,50 m^2/hora, y un coeficiente de almacenamiento que varía entre 0,01 a 0,35 y de éste se concluye una vulnerabilidad media. El espesor del acuífero en la zona, según un mapa recopilado de un estudio de la cuenca del río Caplina en Perú (Peña, 2009), varía de 120 a 310 m en sentido NE-SW. Además de los estudios ya presentados, se tiene también uno que entrega estimaciones de manera general del sector peruano de la cuenca (Autoridad Nacional del Agua, 2012).

La hidroquímica de las aguas varía según la fuente de recarga. Las aguas del acuífero bajo del sector norte provenientes de la cuenca del Caplina presenta una buena calidad. Sin embargo, la zona sur del acuífero bajo es de peor calidad, presentando un alto contenido salino, como el río Lluta. Henríquez *et al.* (1976) indica que la salinidad las aguas subterráneas en este sector se ha mantenido estable entre 600 y 1.500 mg/L de sólidos disueltos totales, excepto en el pozo SG-1 que es de 2690 mg/L de sólidos disueltos y en el pozo SL-1 (aeropuerto) que aumentó de 1080 a 13.233 mg/L desde 1960 a la fecha del informe, producto de la disolución de la percolación de las aguas de regadío a través de una capa superficial salina. Se estima la potencialidad del área en 300 l/s.

CORFO realizó en la década de los 60 una serie de pruebas de bombeo para analizar según el grado de explotación del acuífero la relación de equilibrio entre el agua dulce y agua salada. A partir de esta información se llevó a cabo un modelo hidrogeológico. En la Figura 5.2 se muestra la variación de la interfaz agua dulce-agua salina con una condición de explotación del 100% de la demanda y sin explotación.

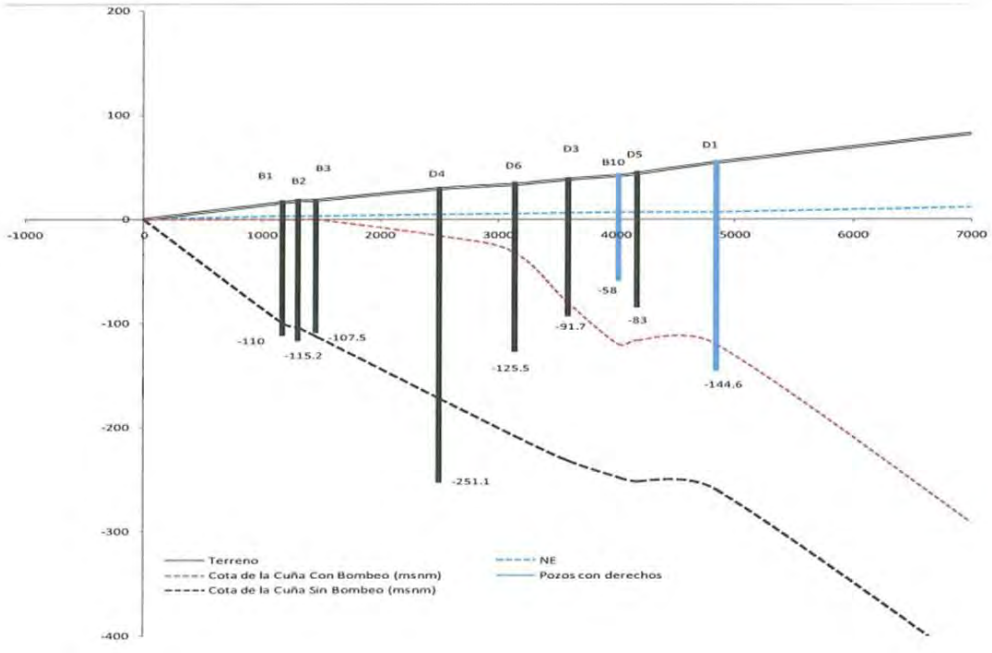


Figura 5.2 Representación de la relación z=40hd en condición estacionaria sin explotación y bajo explotación del 100% de la demanda de agua. Fuente: DGA (2011).

La zona no presenta una extracción intensiva, y pese que existen sondajes de los años 60, la mayor explotación se comenzó a realizar recién el año 2012 con las concesiones de las parcelas del sector de La Concordia. En la Figura 5.3 se presentan los pozos existentes en la frontera con Perú, estos pozos son propiedad de: uno de la Dirección General Aeronáutica Civil, 7 pozos del Fisco y uno de Zofri S.A.

En la cuenca sólo se cuenta con infraestructura hidráulica de tipo impulsiones, las que van desde los pozos de bombeo hasta cada uno de los usuarios. Las impulsiones en su mayoría son de HDPE en diámetros de 4"-10".

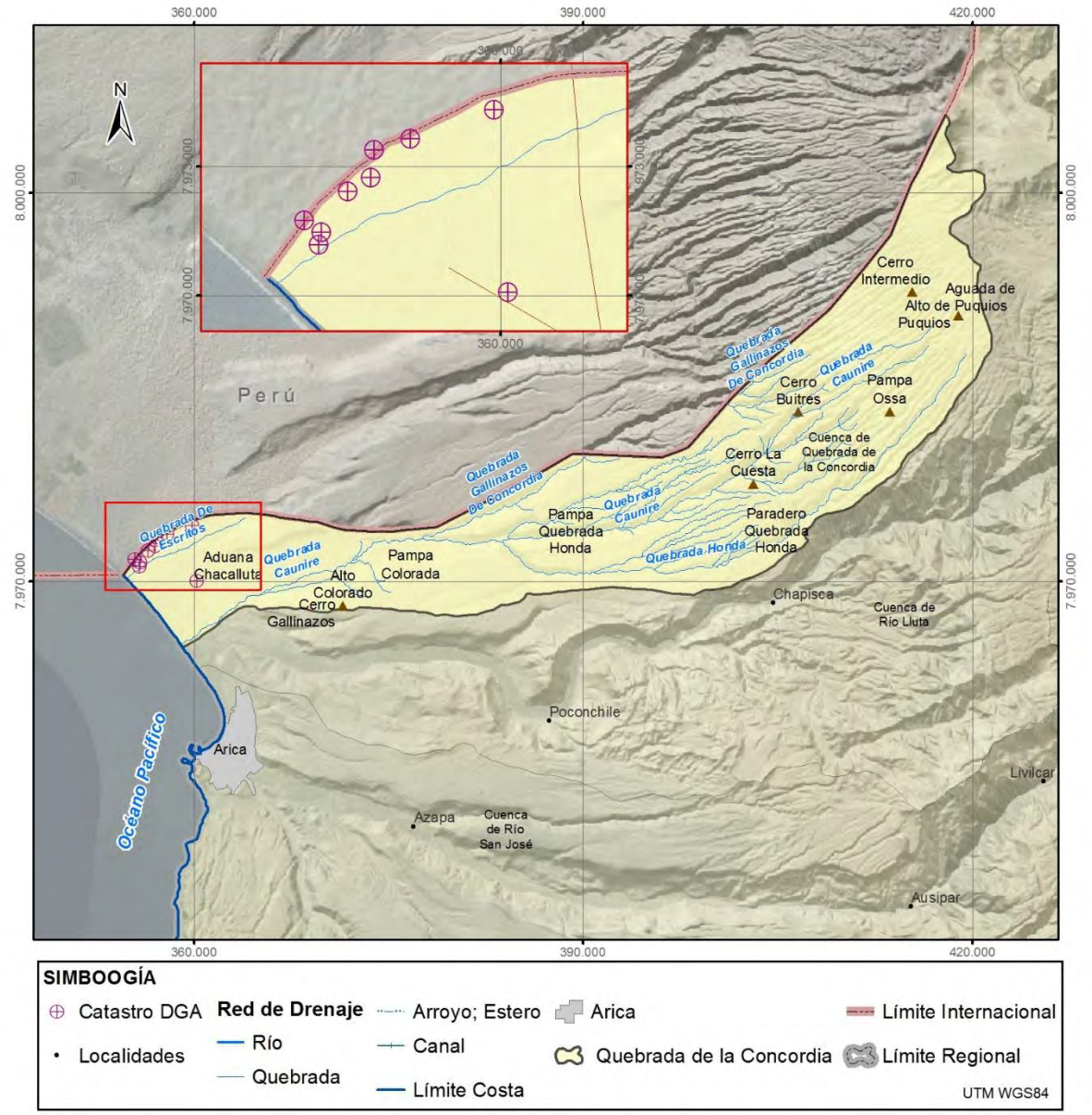


Figura 5.3 Ubicación de los puntos de las captaciones existentes en la cuenca de la quebrada La Concordia. Fuente: elaboración propia.

5.3 Cuenca del río Lluta

La cuenca del río Lluta tiene una superficie de 3.479 km^2 y limita al norte con la cuenca de la quebrada La Concordia y la frontera con Perú, al este con la cuenca del río Caquena, al sur con la cuenca del río San José y al oeste con el océano Pacífico. El río Lluta nace de la confluencia de los ríos Azufre y Caracarani en Humapalca, y sus ríos tributarios importantes son el río Colpitas, las quebradas Allane, Socoroma, Putre, Aroma, Cascavillane, Teleschuño, Guancarane y Chuquiananta. El río Lluta presenta una dirección norte-sur hasta el sector de Socoroma, donde cambia de dirección a este-oeste. Las precipitaciones varían entre 350 mm en el sector de la cabecera a nula en la desembocadura de la cuenca.

Los informes específicos de esta cuenca que han sido recopilados y analizados hasta el momento son los siguientes:

- NIEMEYER, H. (1968). Valle del río Lluta.
- HENRIQUEZ, H. *ET AL.* (1976). Reconocimiento hidrogeológico del extremo norte de la provincia de Arica.
- INDERCO LTDA (1980). Estudio de la red de drenaje del valle del río Lluta.
- INGENDESA (1993). Análisis de descontaminación y embalse en río Lluta. Volumen 3/4.
- AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (1994a). Análisis redes de vigilancia calidad aguas terrestres estadística hidroquímica nacional, I Región. Etapa I.
- JICA, PACIFIC CONSULTANTS INTERNATIONAL, TOKIO (1995). El estudio sobre el desarrollo de los recursos de agua en la parte norte de Chile.
- AC ING. Y AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (1997). Monitoreo de las cuencas de los valles de Azapa y Lluta. Arica-I región.
- AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (1998a). Estudio prueba de larga duración valle del río Lluta, Arica, I Región.
- AC ING. Y AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (1998). Plan director para la gestión de los recursos hídricos en la cuenca del río San José.
- AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (1998c). Estudio hidrogeológico y modelo de simulación valle del río Lluta Arica, I Región.
- ESSAT (1998). Declaración de impacto ambiental, proyecto aguas de descarte en el curso bajo del río Lluta.
- MOP (2000). Instalación sistema de agua potable rural de Coronel Alcérreca.

- ESSAT – UNAP (2001). Programa de Monitoreo Ambiental. Proyecto Ampliación de la Producción de Agua en Arica. Segundo Semestre.
- AC ING. Y AYALA Y CABRERA CONSULTORES (2002). Estudios básicos de los recursos hídricos valles Lluta, Azapa, Vítor y Camarones, primera región.
- LUIS ARRAU (2003). Plan maestro de aguas lluvias de Arica. Manejo de los cauces de los ríos Lluta y San José y sus desembocaduras. Arica. I Región.
- CADE-IDEPE (2004). Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad, cuenca del río Lluta.
- INGEDENSA (2004). Estudio de Factibilidad de Embalses para los Valles de Lluta y Azapa.
- CONTRERAS, C. (2005). Régimen legal de las aguas del valle de Lluta.
- VECTOR CHILE (2005). Estudio de impacto ambiental proyecto Chantacollo.
- DICTUC (2008a). Evaluación preliminar de alternativas de mitigación de contaminantes en el río Lluta a partir de una caracterización de las fuentes de contaminación.
- DICTUC (2008b). Propuesta de calidad objetivo y análisis general de impacto económico y social-cuenca río Lluta.
- TORRES, A., ACEVEDO, E. (2008). El problema de salinidad en los recursos suelo y agua que afectan el riego y cultivos en los valles de Lluta y Azapa en el norte de Chile
- DICTUC (2009a). Estudio de calidad de aguas cuenca del río Lluta.
- DEPARTAMENTO DE CIENCIAS AMBIENTALES Y RECURSOS NATURALES RENOVABLES (2009). Gestión integrada de los recursos hídricos en Chile.
- AQUACONSULT (2010). Informe 1: Caracterización hidrogeológica área proyecto Los Pumas
- SGA (2011). Estudio impacto ambiental manganeso Los Pumas. Capítulo 2, línea base.
- HIDALGO, M. (2012). Evaluación de la eficiencia de riego por surcos en el cultivo del maíz (Zea mays L.) y su relación con la salinidad de los suelos en el valle de Lluta.
- INH (2013). Mejoramiento sistema de gestión y control río Lluta. Resumen ejecutivo. Proyecto 11BPC-10034
- AMEC (2014). Estudio caracterización hidrogeológica de la cuenca del río Colpitas, XV Región.

Datos hidrológicos, tales como la estadística de caudales medios mensuales, estadística de precipitaciones mensuales, estadísticas de muestreos de calidad de agua en la cuenca del río Lluta se presentan en el estudio AC ING. y AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (1998). Según el estudio de AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (1998c), donde se caracterizan los recursos superficiales disponibles a partir de un análisis hidrológico de los cauces en la estación río Lluta en Chapisca, para un año con probabilidad de excedencia del 85%, el caudal medio anual del río Lluta es 1,5 m^3/s, en tanto que para una probabilidad de excedencia del 50% el caudal medio anual es 2,0 m^3/s. El aumento indicado se debe a variaciones del caudal medio mensual en los meses de diciembre a marzo.

Según JICA-DGA (1995), existen dos acuíferos. Por un lado un acuífero superior libre constituido por depósitos aluviales del valle bajo que se extiende desde Rosario hasta la carretera Panamericana y un acuífero profundo confinado. El acuífero confinado tiene un espesor que varía entre 50 y 100 m, la anchura varía entre 800 y 3.000 m, la permeabilidad es de $3{,}63x10^{-3}$ cm/s y un rendimiento específico de 1,72 l/s/m. Este estudio estimó que la recarga anual promedio del acuífero es de 542 l/s. El estudio de AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (1998a), en el que se realiza una prueba de larga duración para estimar el efecto que tendría la extracción de agua subterránea en el acuífero del río Lluta, se estima un gradiente hidráulico de 4‰, una permeabilidad de $3x10^{-5}$ m/s, un espesor de 120 m y un ancho promedio de 1.150 m, obteniendo un flujo subterráneo de 166 l/s, mientras que en el estudio de AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (1998c), la estimación de la permeabilidad es de $2{,}2x10^{-5}$ m/s. En el estudio que AC ING. y AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS realiza el año 2002, elaboran una caracterización geológica-geomorfológica, de los recursos hídricos superficiales y subterráneos, de la calidad físico-química del agua, de los sedimentos y un catastro de obras y extracciones de áridos, junto con una exhaustiva recopilación de antecedentes.

La calidad de las aguas de la cuenca del río Lluta ha sido estudiada en varias ocasiones debido a la alta concentración de boro, arsénico, metales y compuestos inorgánicos. Esta contaminación natural del río Lluta ha sido analizada en varios informes, entre los que encuentra AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (1994), CADE-IDEPE (2004), DICTUC (2008a, 2008b) y R&Q (2012), cuyas campañas de muestreos se presentan en la Figura 5.4. Henríquez *et al.* (1976) también entrega datos de calidad de aguas, uno por cada curso de agua de la cuenca del río Lluta. AMEC (2014) llevó a cabo un estudio

exclusivamente de la cuenca del río Colpitas por la particularidad de la calidad de sus aguas. El río Colpitas aporta al río Lluta aguas con una concentración elevada de boro, debido a que el río en su parte alta atraviesa borateras. En este estudio se presenta la caracterización agronómica, hidrológica, hidroquímica y geoquímica de la cuenca del río Colpitas, a partir de los datos registrados en las campañas de aforos, del muestreo hidroquímico e isotópico de aguas superficiales, subterráneas y aguas de lluvia y de una campaña de tomografía eléctrica (Figura 5.5).

La presencia de fauna ha sido estudiada por DICTUC (2009a), describiendo la biota acuática de la cuenca del río Lluta en 9 estaciones de muestreo de calidad y biota acuática y los parámetros de calidad de agua. Y por otro lado, también se tipifica el sustrato de los cauces. Uno de los problemas principales en el valle del río Lluta es la alta salinidad de sus aguas y el alto contenido de Boro, los cuales limitan las posibilidades de cultivo en la zona (Torres y Acevedo, 2008). Se reconoce como una de las principales fuentes de contaminación al río Colpitas y en menor medida el río Azufre. Hidalgo (2012) estudia la eficiencia de riego por surcos y su relación con la salinidad de los suelos, donde entrega datos de permeabilidad y conductividad eléctrica del suelo y el agua en varios sectores.

Desde el punto de vista de infraestructuras dentro de la cuenca, Niemeyer (1968), además de describir la geología, el clima, la hidrografía, la hidroquímica y otras características de la cuenca del río Lluta, analiza la posibilidad de un embalse en varias angosturas de la misma proponiendo, finalmente, su ubicación entre Sora y la mina Jamiralla. El estudio de INDERCO Ltda. (1980) evalúa la situación de la red de drenaje y determina que la gran longitud de las líneas y colectores, junto con la maleza existente, dificultan la accesibilidad y mantención de la red. Concluye que es necesaria una mayor implicancia por parte de las organizaciones de usuarios para una mejor mantención. El estudio de INGENDESA (1993) propone, por un lado, medidas de descontaminación de las aguas del río Lluta y, por otro, el manejo del río y el diseño de prefactibilidad de obras civiles, en el que se concluye que la construcción de un embalse es técnicamente viable, pero no económicamente, dado que la rentabilidad de la agricultura en el valle del río Lluta es baja. También se evalúa la instalación de un sistema de agua potable rural en Coronel Alcérreca (MOP, 2000) y las posibles obras de protección fluvial en el cauce y las obras de evacuación de las aguas para evitar la inundación de Arica (LUIS ARRAU, 2003). Este análisis se hace en el río Lluta, además

del río San José, por la creciente expansión de la ciudad hacia su desembocadura. INGENDESA (2004) presenta estudios técnicos, económicos y ambientales, a nivel de factibilidad, de embalses de regulación para los ríos Lluta y San José, con los propósitos de controlar las crecidas y los sedimentos, y por otro lado, asegurar y extender el riego en valles Lluta y Azapa. En éste se seleccionó como la alternativa más interesante el sector de Chironta en el río Lluta y el sector de Livilcar en el río San José.

Respecto de los aspectos legales, el estudio de Contreras (2005) presenta las regulaciones aplicadas a los usuarios desde tiempos de la colonia hasta la actualidad, correspondiente al código de aguas.

Se realizó un modelo tanto de aguas superficiales como de aguas subterráneas (AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS, 1998c), en el que se evalúa la recarga del acuífero desde el río Lluta y los sectores de riego para una año con una probabilidad de excedencia del 85% en dos escenarios: uno en el que se supuso bombeo continuo desde los sondajes de Empresa de Servicios Sanitarios de Tarapacá S.A. (ESSAT)(actualmente Aguas del Altiplano S.A.) y todos los otros pozos existentes en el área modelada, tanto con derechos otorgados como solicitudes en trámite; y otro en el que se consideran solamente los sondajes ESSAT. Del modelo se concluye que el efecto del bombeo sobre los recursos superficiales produce un flujo desde el río a los pozos del orden de 30 l/s, lo que es cerca de un 8% del total bombeado por los pozos, y en el que la extracción de 370 l/s de los pozos de ESSAT es sustentable en el tiempo.

El estudio de AC ING. y AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (1997) monitoreó durante ese año la cuenca de Lluta, tanto en los sistemas subterráneos como los superficiales, con el fin de poder tomar medidas frente a las variaciones que producirían las nuevas captaciones en el valle del río Lluta. En tanto, el estudio de ESSAT-UNAP (2001) monitorea la flora y fauna del valle, el estuario y la parte baja del río Lluta en el marco de dos proyectos, en el que se concluye que las componentes de flora y fauna no presentan resultados extraños y los análisis de calidad de agua del estuario no presentan grandes diferencias con respecto a la línea base del proyecto.

Uno de los aspectos de mayor importancia dentro de la cuenca del río Lluta es la gestión de sus recursos hídricos (Departamento de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales Renovables, 2009; INH, 2013), con el fin de permitir un manejo más

eficiente de los mismos, fomentar su uso sostenible, proteger el recurso, reducir su contaminación y mitigar los efectos de las sequías e inundaciones, de acuerdo a su demanda industrial, doméstica y ambiental.

Existen otros estudios locales, ubicados dentro del área de la cuenca de Lluta. El estudio de ESSAT (1998) incluyó la descripción de las características físicas, químicas y bacteriológicas en el curso bajo del río Lluta. A su vez, el estudio de Vector (2005) realizó una línea base del medio físico de Chantacollo, incluyendo el clima, la hidrología, la geomorfología, la geología y la hidrogeología. Por otra parte, y con el fin de evaluar el impacto ambiental del proyecto "Los Pumas", un yacimiento de manganeso, se realiza una caracterización hidrogeológica del área del proyecto (AQUACONSULT, 2010; SGA, 2011).

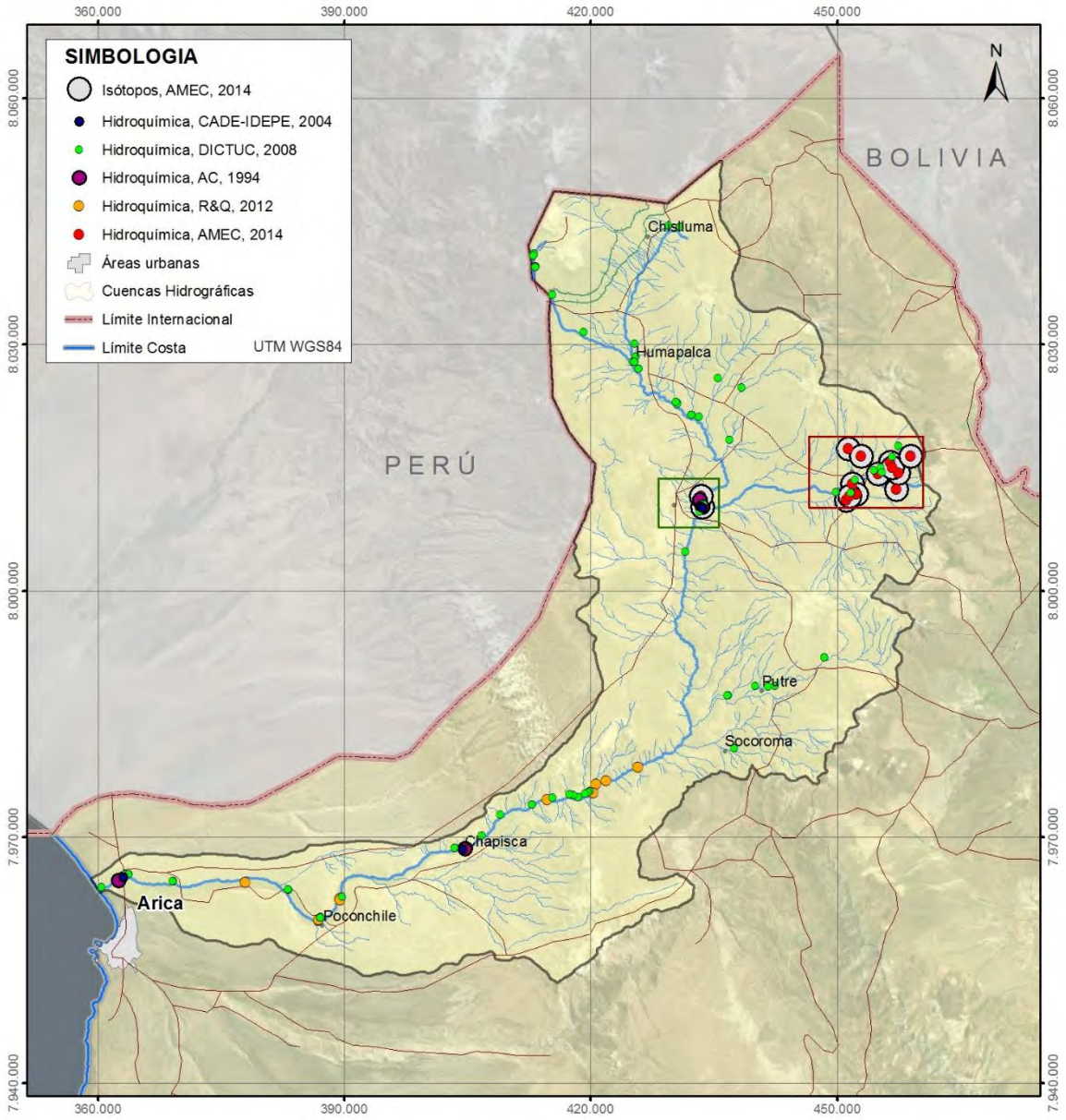


Figura 5.4 Ubicación de los puntos muestreados para el análisis hidroquímico e isotópico en la cuenca del río Lluta. Fuente: elaboración propia.

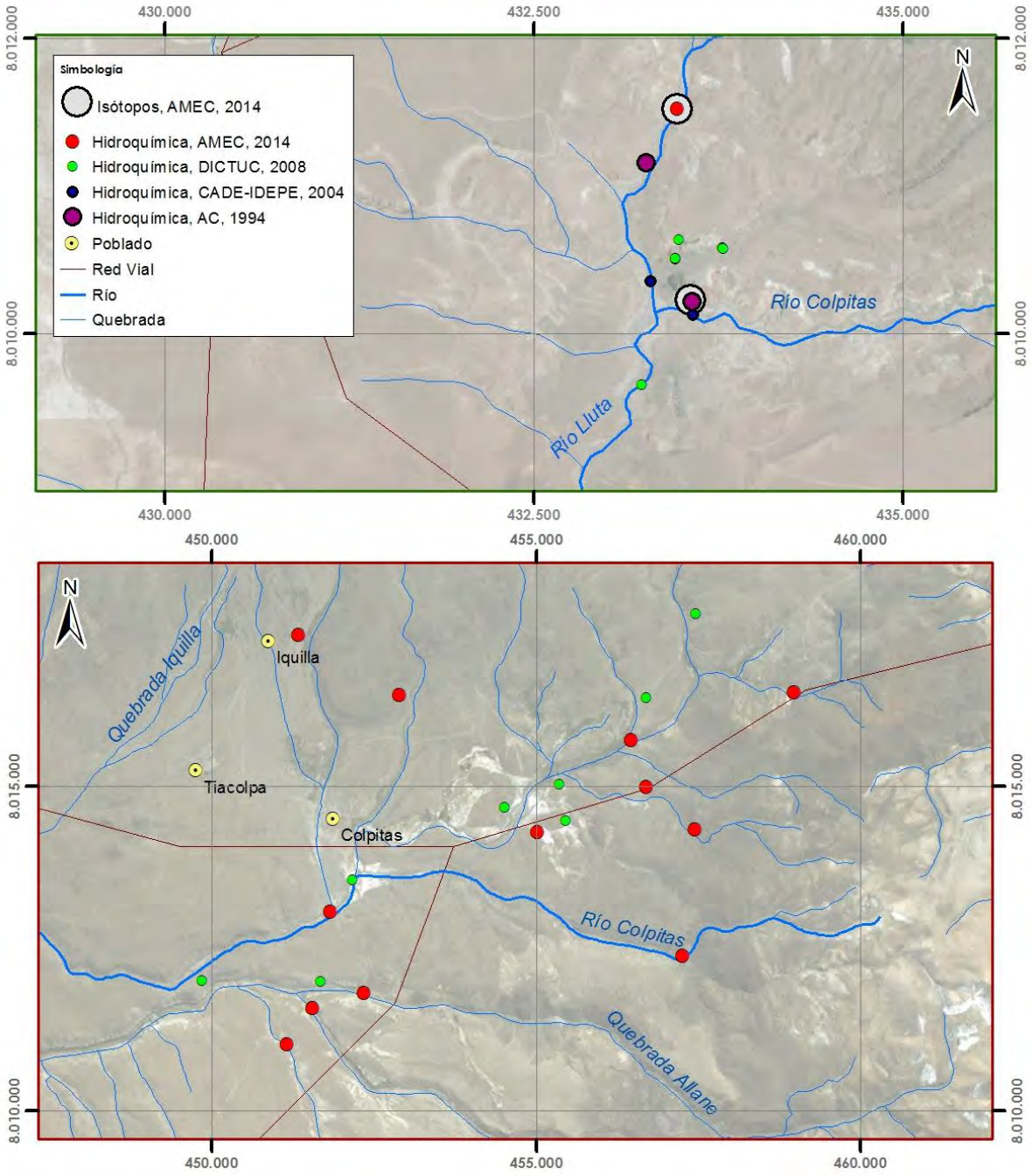


Figura 5.5 Ubicación de los puntos muestreados para el análisis hidroquímico e isotópico en el río Colpitas y en la confluencia entre el río Colpitas y el río Lluta. Fuente: elaboración propia.

5.4 Cuenca del río San José

La cuenca del río San José posee una superficie de 3.187 km^2 y limita al norte con la cuenca del río Lluta, al sur con la cuenca de la quebrada Chaca-Vítor, al oriente con la cuenca del río Lauca y al poniente con el océano Pacífico. El cauce principal de la cuenca es el río San José, cuyos tributarios más importantes en la cabecera de la cuenca son los ríos Laco, Seco y Tignamar. El agua desviada del río Lauca a través del canal Lauca llega a la central hidroeléctrica Chapiquiña, la que luego de pasar por la central se incorpora al río San José.

Esta cuenca junto con la del río Lluta es la más estudiada de la Región. En ésta se han elaborado numerosos estudios con la finalidad de favorecer la gestión de los recursos hídricos. A continuación se citan los informes revisados hasta el momento:

- DÍAZ, G. *ET AL.* (1972). Recurso de agua y su aprovechamiento en el valle de Azapa. Anexos.
- REG Y KARZULOVIC, J., (1981). Plan maestro de acción inmediata para el sistema de riego del Valle de Azapa. Región de Tarapacá. Instancia Final.
- AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (1989). Modelo de simulación de las aguas subterráneas del valle de Azapa. Estudios básicos modelo de simulación. Anexos.
- PEREZ, F. (1990).Operación del Modelo de Simulación de Recursos Hídricos del Valle de Azapa. Análisis de Situaciones Hidrológicas Extremas y su impacto en los Recursos Subterráneos. Ministerio de Obras Públicas. Dirección General de Aguas.
- BF INGENIEROS CIVILES (1991b). Diagnóstico de pérdidas en canales de riego Lauca-Azapa.
- AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (1994a). Análisis redes de vigilancia calidad aguas terrestres estadística hidroquímica nacional. Etapa I.
- BF INGENIEROS CIVILES (1995). Estudio de factibilidad de un embalse y sistema de recarga de la napa en el Río San José.
- JICA, PACIFIC CONSULTANTS INTERNATIONAL, TOKIO (1995). El estudio sobre el desarrollo de los recursos de agua en la parte norte de Chile.
- DHV, INFOR, ICSA Y BF INGENIEROS CIVILES (1995). Estudio de factibilidad programa manejo de cuencas hidrográficas, cuenca río San José.

- AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS Y AC ING. (1995). Monitoreo cuenca valle de Azapa-Arica
- PEÑA, SALAZAR, POLLASTRI (1995). Estudio del origen y procesos de salinización de las aguas subterráneas en el valle de Azapa. I región. Chile
- CAPTAGUA (1996). Construcción sondaje 6-A Costero Urbano.
- CONIC-BF (1996). Análisis Operacional del Sistema Lauca-Azapa, I Región.
- ARANEDA *et al.* (1997). Estructura del basamento subterráneo en la ciudad de Arica.
- LUIS ARRAU (1997). Modelo de simulación hidrológico operacional Cuenca del Río San José.
- AC ING. Y AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (1997). Monitoreo de las cuencas de los valles de Azapa y Lluta. Arica-I región
- AC ING. Y AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (1998). Plan director para la gestión de los recursos hídricos en la Cuenca del Río San José.
- CONIC-BF (2000). Construcción barreras de goma río San José.
- AC ING. Y AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (2002). Estudios básicos de los recursos hídricos valles Lluta, Azapa, Vítor y Camarones, primera región.
- LUIS ARRAU (2003). Plan maestro de aguas lluvias de Arica. Manejo de los cauces de los ríos Lluta y San José y sus desembocaduras.
- INGENDESA (2004) Estudio de factibilidad de embalses para los valles de Lluta y Azapa. I Región.
- TORRES, A., ACEVEDO, E., (2008). El problema de salinidad en los recursos suelo y agua que afectan el riego y cultivos en los valles de Lluta y Azapa en el norte de Chile
- AC ING. (2009). Definición de estrategias de manejo sustentable para el acuífero de Azapa, XV Región. Resumen ejecutivo. S.I.T. N°201.
- SUBDERE, (2010). Planta desaladora de Arica
- MN INGENIEROS (2011). Diseño embalse Livilcar. Región de Arica y Parinacota.
- JIMENEZ, G. (2013). Caracterización de la cuenca del río San José en Arica para la evaluación a nivel de perfil de un sistema de recarga artificial de acuíferos.
- INH (2014a). Caracterización de la cuenca del río San José para la implementación de un programa de recarga artificial de acuíferos.
- INH (2014b) Caracterización de la Cuenca del río San José para la implementación de Programa de Recarga Artificial de Acuíferos. Proyecto Innova Corfo cód. 12BPC2-13504.

- BALIC, I. (2015). Modelación numérica de los efectos de la variabilidad climática sobre la utilización sustentable del acuífero de la cuenca del río San José, Arica
- INERCO (2015). Declaración impacto ambiental proyecto fotovoltaico Los Manolos. Anexo 6: Caracterización del medio físico

Se ha estudiado el funcionamiento de la cuenca desde el punto de vista hidrológico – hidrogeológico, de calidad de aguas y de operación del sistema Lauca – Azapa en los estudios de AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (1989), AC ING. Y AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (2002), ARRAU (1997) y Araneda (1997).

Respecto a la hidrología, en el diseño del embalse Livilcar (MN Ing., 2011) se realizó un estudio de crecidas para el cual se hizo un análisis de distribución de frecuencias de caudales con datos hasta el año 2009 con estadística de la estación San José en Ausipar. La serie de datos se encuentra entre los años 1936-2009. Por otra parte se realizó el estudio de crecidas mediante el método del hidrograma unitario sintético. Luego se realizó una estimación de caudales diarios a partir de un modelo precipitación escorrentía (Kuhlmann, 1995).

Respecto a la hidrogeología, se han elaborado modelos de flujo subterráneo (AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS, 1989; ARRAU, 1997; AC ING. y AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS, 1998; AC ING., 2009). En el más reciente de estos estudios (AC ING., 2009), a partir de los estudios existentes, la prospección geofísica con 31 estaciones TEM, geomorfología y geología, se elaboran perfiles hidrogeológicos. Este considera diferentes valores de transmisividad dependiendo del tramo del río, el valor del coeficiente de almacenamiento se considera según el tipo de material ya que no existen pruebas de bombeo. El mapa piezométrico se elabora con los valores obtenidos en los pozos de control de niveles de la DGA.

El problema de la salinidad del suelo y las aguas es estudiado en Peña *et al.* (1995) y Torres y Acevedo (2008). En el primero, utilizando técnicas de hidrología isotópica y metodologías convencionales se estudia el origen y movimiento de las aguas subterráneas y el posible impacto de los trasvases desde el sector altiplánico en el deterioro de la calidad del agua. En éste se describe la geología, la hidrogeología y el clima de la zona de manera general. Se caracterizan las aguas superficiales, subterráneas y la infraestructura del aprovechamiento de aguas. En el segundo, se

presentan antecedentes de la agricultura, los suelos y el agua de riego de los valles de Lluta y Azapa. De la documentación recopilada se dispone de diversas campañas de muestreo hidroquímico e isotópico realizadas en esta cuenca (AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS, 1994; AC ING y AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS, 1997). En la Figura 5.6 se presenta la distribución espacial de estos puntos.

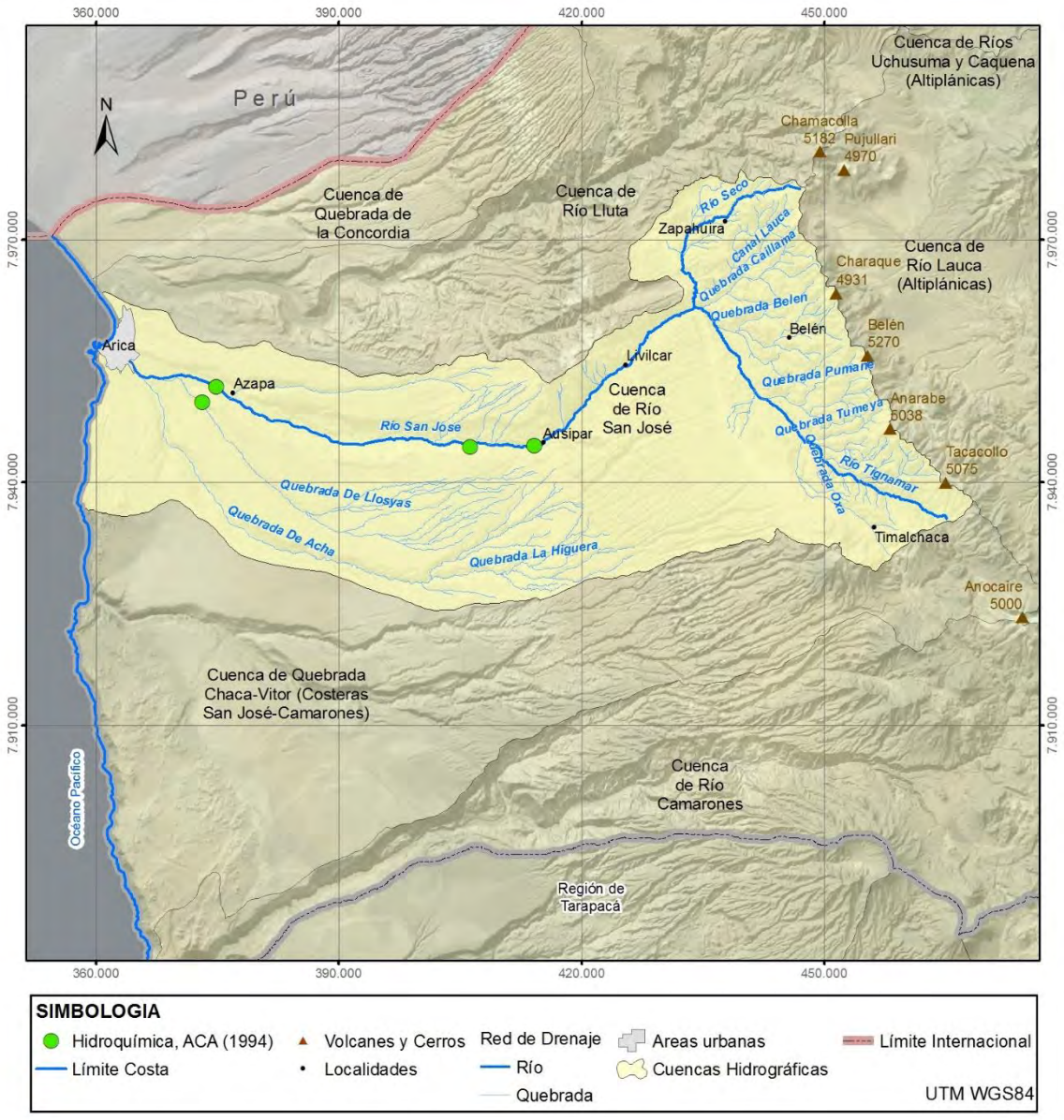


Figura 5.6 Ubicación de los puntos muestreados para el análisis hidroquímico e isotópico en la cuenca del río San José. Fuente: elaboración propia.

Sobre la demanda del recurso hídrico se recopilan los Anexos de un estudio (Díaz *et al.*, 1972) que incluyen las fichas resumen de los documentos revisados, el catastro de

pozos, las superficies de cultivo estimados en la región de Arica y Parinacota y muestra la estimación de la demanda de agua en las ciudades de Arica y otras de la región de Iquique hasta el año 2020.

Se han desarrollado proyectos de almacenamiento de aguas tanto superficial (CONIC BF, 1996; BF ING., 1995; ARRAU, 1997; CONIC-BF, 2000; INGENDESA, 2004; MN, 2011) como subterráneo (CONIC BF, 1996; BF ING., 1995; Jiménez, 2013; INH, 2014), estudios con respecto al canal Azapa (BF ING., 1991) y proyectos en el área costera (LUIS ARRAU, 2003; SUBDERE, 2010). La infraestructura presente en la cuenca se relaciona principalmente con las aguas aportadas artificialmente desde la cuenca del Lauca hacia el río San José. Este río entrega sus aguas al canal Azapa, el que abastece al riego de tierras agrícolas del valle de Azapa. Dentro de los proyecto se ha buscado evitar las pérdidas del canal de Azapa y buscar alternativas al abastecimiento de agua en la ciudad de Arica por medio de una planta desaladora.

Se han realizado modelos computacionales de la cueca, entre los que cuentan CONIC-BF (1996) y Luis ARRAU (1997), donde se desarrolló un modelo de simulación computacional que permitiera efectuar un seguimiento y planificación de la operación del sistema. A su vez, el estudio de AC ING. (2009) elabora un modelo de flujo subterráneo para cuantificar la disponibilidad de aguas en distintos escenarios que podrían presentarse en el futuro, con el fin de definir estrategias para el manejo sustentable de los recursos hídricos del valle de Azapa. Por otro lado, el estudio de Balic (2015) tiene por objetivo entender cómo los cambios en las precipitaciones, producto del cambio climático, pueden afectar la recarga del acuífero del valle de Azapa para determinar la sustentabilidad del sistema en el mediano y largo plazo.

La cuenca del río San José ha sido monitoreada con el fin de cuantificar los efectos de la explotación de agua subterránea en el valle de Azapa en los estudios de AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS y AC ING. (1995) y AC ING. y AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (1997).

Se dispone de documentos estratégicos de planificación (REG y Karzulovic, 1981; DHV *et al.*, 1995; AC ING. y AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS, 1998; AC ING., 2009) en que se definen estrategias de gestión para la cuenca. En el plan maestro de REG y Karzulovic (1981) se definen, describen y calculan las distintas alternativas que existen para el plan de acción inmediata que requiere la población de Arica y el sistema de

riego del valle de Azapa con el fin de poder suplir el déficit hídrico que se ha presentado durante los últimos años. El estudio de DHV *et al.* (1995) identifica los principales problemas de control forestal y describe la situación del déficit del recurso hidrológico. Caracteriza el acuífero libre desde Cabuza hasta Arica y realiza un perfil del nivel freático y del cauce del río, estimando valores de transmisividad y de coeficiente de almacenamiento. Además, realiza un balance entre disponibilidad y demanda, obteniendo un déficit de recurso hídrico. Describe las infraestructuras de riego, agua potable y uso industrial y de la central hidroeléctrica Chapiquiña. En el estudio de Plan Director de la cuenca (AC ING. y AYALA, Cabrera Y ASOCIADOS, 1998) se realiza una completa revisión de los antecedentes de estudios anteriores a la fecha de ese estudio, incluyendo la estadística de caudales medios mensuales, pluviométricas y de muestreos de estaciones de calidad de agua controladas por la DGA, que se ubican en las cuencas de los ríos San José, Lluta, Lauca y Caquena. Se dispone de la estadística de niveles de los pozos controlados por la DGA y que se ubican en la cuenca del río San José y de la quebrada de la Concordia. Se realiza un diagnóstico de los recursos hídricos en los aspectos de disponibilidad, calidad, usos y demandas, balance hídrico y situación legal. Se identifican y analizan las alternativas de solución y se plantea el Plan Director de la Cuenca del río San José.

Dentro de la cuenca del río San José también se estudiaron sectores locales por proyectos específicos que entregan valiosa información. Entre estos se cuenta el estudio de CAPTAGUA (1996), que describe la perforación de un pozo de 120 m de profundidad en la ciudad de Arica donde se tomaron muestras para determinar la granulometría en forma detallada. Describe el filtro de grava, el desarrollo y las pruebas de bombeo de gasto constante y variable. Y en el que finalmente se Identifica un acuífero libre con una transmisividad de 1,72 m^2/hora y un coeficiente de almacenamiento de 0,25.

En el marco del proyecto fotovoltaico Los Manolos, INERCO (2015) estudia el medio físico de la geomorfología, geología, hidrogeología, hidrografía y edafología, donde el área de influencia para cada una es la subcuenca del río San José. La hidrogeología señala que la profundidad de la napa subterránea en el valle de Azapa, llega entre 30 y 35 m en el sector de San Miguel, y a unos 15 m en frente a la Quebrada de Las Llosyas.

5.5 Cuenca de la quebrada Chaca-Vítor

La cuenca de la quebrada Chaca-Vítor posee una superficie de 2.769 km^2 y limita al norte con la cuenca del río San José, al sur con la cuenca del río Camarones, al oriente con la cuenca del río Lauca y al poniente con el océano Pacífico. El cauce principal de la cuenca es el río Codpa y las quebradas Sibitaya y Apanza. En régimen natural presenta un escurrimiento superficial permanente en la parte alta de la cuenca, mientras que en la parte baja es esporádico.

A continuación se citan los informes revisados hasta el momento:

- AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (1994a). Análisis redes de vigilancia calidad aguas terrestres estadística hidroquímica nacional, I Región.
- AC ING. Y AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (2002). Estudios básicos de los recursos hídricos valles Lluta, Azapa, Vítor y Camarones, primera región.
- MAYCO (2013). Balance hídrico en sectores acuíferos de mediana criticidad (Quebrada Chaca-Vítor).
- AGROLEY CONSULTORES (2015). Saneamiento y Regularización de Derechos de Agua en Arica y Parinacota. Comisión Nacional de Riego.

La información en esta cuenca es muy escasa, y sólo se cuenta con cuatro estudios. El informe de AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (1994a) analiza la composición química en un punto de la quebrada Vítor. El estudio de AC ING. Y AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (2002) caracteriza los recursos hídricos superficiales y subterráneos y las infraestructuras para riego y explotación de áridos. En el estudio "Balance hídrico en sectores acuíferos de mediana criticidad (Quebrada Chaca-Vítor)" realizado por MAYCO en 2013 se realiza un balance hídrico a dos posibles acuíferos localizados en la parte baja de la cuenca del río Codpa o quebrada Chaca Vítor, los que fueron denominados acuíferos intermedio y costero. Por lo tanto, no se ha encontrado un estudio que analice toda la cuenca por completo.

Para analizar la hidrología de la cuenca, en AC ING. Y AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (2002) se tomaron los caudales registrados en la única estación vigente, estación Codpa en Cala-Cala. En MAYCO (2013) se realizó un tratamiento estadístico a la información fluviométrica y pluviométrica, lo que entregó como resultado

precipitaciones medias y caudales en la zona de estudio. Además se llevó a cabo una campaña donde se midieron 5 aforos.

En MAYCO (2013) se describió el sistema acuífero en estudio y se caracterizó la hidrogeología del área. Se consideró que el espesor de la unidad acuífera sedimentaria varía entre los 20 a 30 m, el gradiente hidráulico del acuífero intermedio es de 1,7% mientras que el acuífero costero es de 2% y la dirección de flujo subterráneo es de este a oeste, es decir desde las cotas altas hacia el océano Pacífico. A partir de las pruebas de bombeo en 5 pozos se estimó que la conductividad hidráulica del acuífero varía entre $7{,}09 \times 10^{-4}$ y $2{,}81 \times 10^{-2}$ cm/s, mostrando unidades hidrogeológicas muy heterogéneas. Los valores de coeficiente de almacenamiento varían entre $2{,}22 \times 10^{-5}$ y $7{,}35 \times 10^{-3}$.

Hidroquímicamente, se realizaron análisis hidroquímicos y de isótopos de ^{18}O y deuterio a 5 puntos de agua superficial, resultando ser aguas sulfatadas sódicas o sulfatadas cálcicas. Anteriormente, AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (1994a) analizó 6 muestras de agua superficial en el río Codpa en Chitita durante los años 1985 a 1987. En la Figura 5.7 se muestra la ubicación de los puntos muestreados para el análisis hidroquímico e isotópico en la cuenca de la quebrada Chaca-Vítor.

En la zona existe actividad agrícola de poca extensión espacial en la cuenca. En el sector del pueblo Codpa se riega con las aguas superficiales del río Codpa mediante un sistema de canales, mientras que el sector de Chaca y la caleta Vítor se riega con el agua que se extrae de los pozos. AC ING. Y AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (2002) elaboró un catastro de captaciones, en el que 64 pozos se ubican entre el sector de Chaca y de Caleta Vítor, y 2 pozos en Codpa. MAYCO (2013) obtuvo información acerca de los usuarios y derechos asociados, realizando un catastro de derechos de aprovechamiento de agua superficial y subterránea otorgados y solicitados, un catastro de usuarios y un catastro de infraestructura asociada al uso.

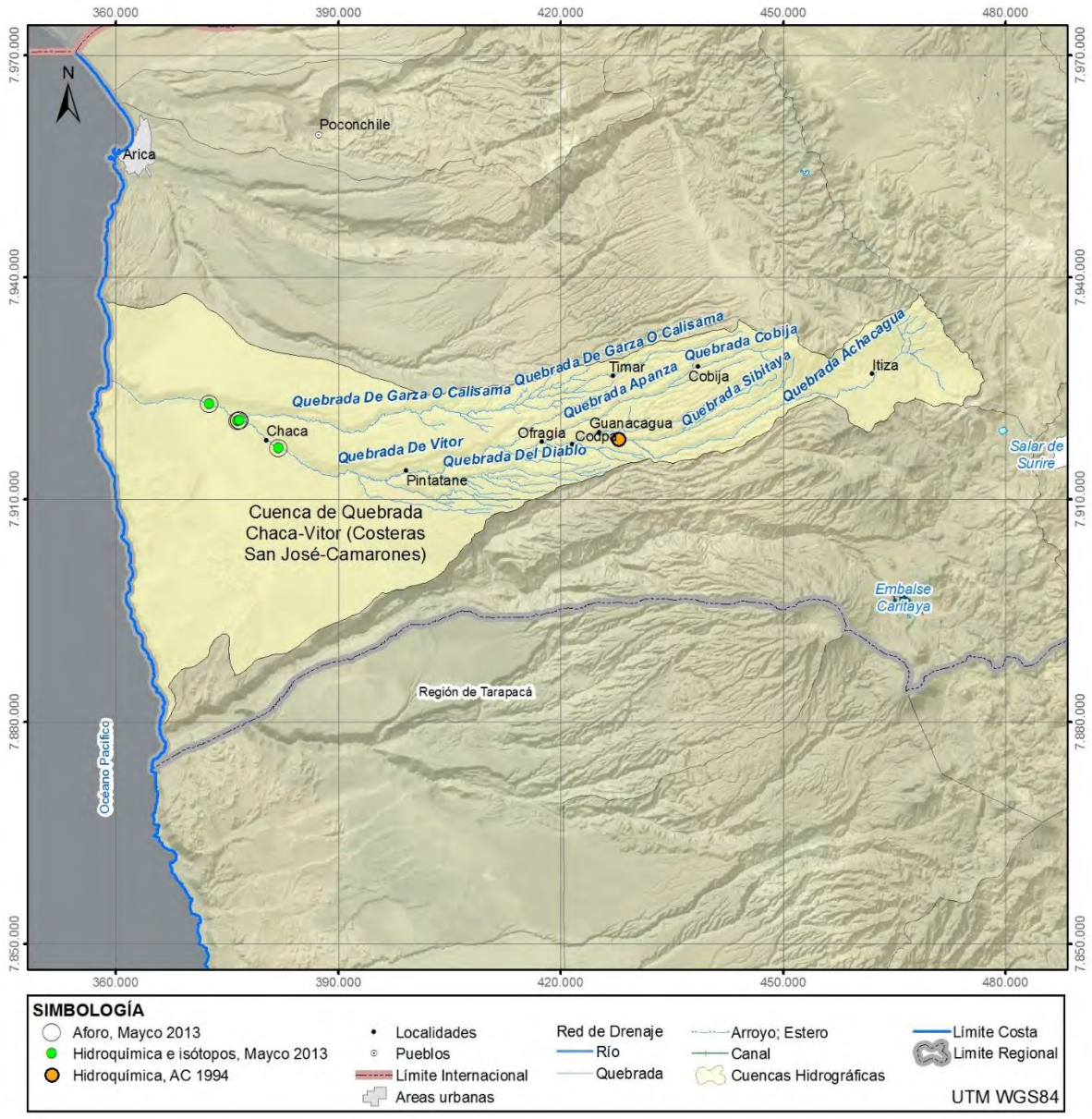


Figura 5.7 Ubicación de los puntos muestreados para el análisis hidroquímico e isotópico en la cuenca de la quebrada Chaca-Vítor. Fuente: elaboración propia.

5.6 Cuenca del río Camarones

La cuenca del río Camarones alcanza una superficie de 2.223 km^2 y se ubica al sur de la región. Limita al norte con la cuenca de la quebrada Chaca-Vítor, al sur con la región de Tarapacá, al oriente con la cuenca del salar de Surire y al poniente con el océano Pacífico. Los ríos Ajatama, por el norte, y el río Caritaya, por el sur, se unen en el sector de Arepunta y originan el río Camarones. Con el objetivo de regular las aguas se construyó en 1936 el embalse Caritaya en la cabecera del río Caritaya, cuya obra cuenta con una capacidad de 42.171.000 m^3.

En esta cuenca existen varios informes realizados en los últimos años:

- AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (1994a). Análisis redes de vigilancia calidad aguas terrestres estadística hidroquímica nacional, I Región. Etapa I.
- AC ING. Y AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (2002). Estudios básicos de los recursos hídricos valles Lluta, Azapa, Vítor y Camarones, primera región.
- SMI (2008). Diagnóstico y diseño definitivo reparación embalse Caritaya provincia de Arica, I Región, contrato ES-REC-01
- UTA-DGA (2010b). Cuenca de Camarones: identificación y caracterización de fuentes que condicionan la calidad de las aguas superficiales: rol del tranque Caritaya.
- ARRAU INGENIERIA (2013). Estudio básico diagnóstico de obras hidráulicas y fluviales quebrada de Camarones, región de Arica y Parinacota.
- GEOHIDROLOGÍA (2014). Diagnóstico de la subcuenca aportante al embalse Caritaya.
- CON POTENCIAL CONSULTORES (2016). Estudio diagnóstico de disponibilidad hídrica, cuenca del río Camarones.

La hidrología de la cuenca fue estudiada en SMI (2008), donde se recopilaron las series de precipitaciones mensuales, y se realizaron los análisis de frecuencia de las precipitaciones diarias máximas, de la precipitación máxima probable y de los caudales medios mensuales.

Hidroquímicamente, las aguas del río Caritaya presentan aguas de mala calidad, con conductividades que varían entre 3.000 y 4.000 µS/cm, altas concentraciones de arsénico y boro. Esto se debe a los aportes de las lagunas de Amuyo y por la incorporación de elementos químicos provenientes de la lixiviación o disolución de

minerales durante su tránsito aguas arriba de las lagunas de Amuyo. Estas fuentes presentan conductividades eléctricas entre 15.240 y 21.180 µS/cm y un alto contenido de arsénico y boro. Aguas arriba de las lagunas de Amuyo, el río Caritaya ya tiene una calidad deficiente, mientras que el arroyo de Veco aporta aguas de buena calidad. En el estudio de AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (1994a) se tomaron muestras de agua superficial durante la década de los 80 y los primeros años de los 90 en varias estaciones de calidad de agua de la DGA. Este informe concluyó que el río Camarones muestra una alta conductividad, un pH alcalino y altos contenidos de boro y arsénico. Posteriormente, en el estudio de la UTA-DGA (2010) se realizó un muestreo a lo largo del río Camarones y del río Caritaya para el análisis hidroquímico de 42 muestras de agua y de 47 muestras de sedimento en 47 puntos de la cuenca. Además, se realizaron aforos en 26 puntos diferentes de los cauces de los ríos Caritaya, Blanco, Ajatama y Camarones y de las quebradas Macuza, Anocarire y Taruquiere. El estudio de Con Potencial (2016) concluye que el agua del río Camarones, al igual que la del río Caritaya es de tipo clorurada sódica, con alto contenido de boro y arsénico. El agua del río Ajatama es sulfatada cálcica y es apta para la mayoría de suelos y cultivos. Las concentraciones de los elementos químicos del Río Camarones se mantienen constantes hasta el sector de Pampanune, pero comienzan a aumentar hacia el sector de Conanoxa y aún más hacia el tramo hasta Cuya. El análisis isotópico de las aguas de la cuenca reveló los siguientes procesos: Intercambio geotermal de oxígeno en las Lagunas de Amuyo; evaporación en ambiente de poca humedad en el Embalse Caritaya y la parte alta de la cuenca; evaporación en ambiente húmedo en la parte baja de la cuenca.

En el estudio de Geohidrología (2014) se entrega un análisis muy local del sector del embalse de Caritaya. Este estudio determina las fuentes de contaminación de las aguas aportantes al embalse de Caritaya, confecciona un modelo hidrogeológico conceptual de funcionamiento de la subcuenca de Caritaya, propone medidas de mitigación/remediación para mejorar la calidad de las aguas embalsadas y la construcción de una estación fluviométrica. La información levantada incluye la descripción de las unidades y estructuras geológicas, la medición de aforos, la caracterización físico-química de las aguas superficiales, perfiles geofísicos (NanoTEM y de tomografías eléctricas) y un levantamiento topográfico en el sector de las lagunas de Amuyo.

Desde el punto de vista hidrogeológico, la subcuenca de Caritaya está compuesta por rocas volcánicas y por rellenos de depósitos aluviales y fluviales mal consolidados que se depositaron en las quebradas y en una amplia llanura fluvial localizada inmediatamente aguas arriba del embalse Caritaya. Estos depósitos albergan un acuífero con una baja capacidad de almacenamiento, el cual fluye libremente hacia el embalse Caritaya y es recargado fundamentalmente por la infiltración del río Caritaya.

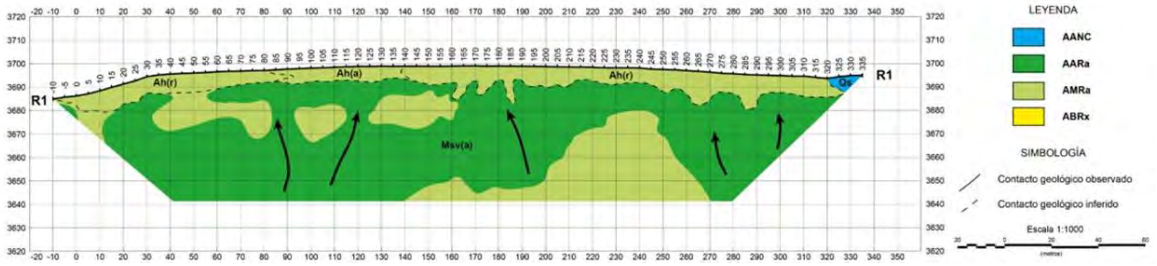


Figura 5.8 Perfil hidrogeológico embalse Caritaya. Fuente: Geohidrología (2014).

En el registro de derechos de aprovechamiento de aguas de la DGA existen 94 derechos concedidos en la cuenca, de las cuales 1 extrae agua subterránea, 28 agua de quebradas, 20 agua de ríos o esteros y 45 de vertientes. Al menos hasta el año 2002, no existían captaciones de pozos en la cuenca del río Camarones (AC ING. Y AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS, 2002). Por otro lado, en el estudio de Con Potencial Ltda. (2016) se levanta e integra información de estudios previos, se realizan tres campañas de aforo, una campaña de muestreo hidroquímico y una de muestreo de isotopos. De este último estudio se extrae que la disponibilidad hídrica real del río Camarones solo puede satisfacer un 12% del volumen anual total de derechos otorgados en la cuenca.

La infraestructura y obras de esta cuenca son estudiadas en detalle en el estudio ARRAU INGENIERÍA (2013). En este estudio se realiza un catastro, destacando la existencia de 33 bocatomas de canales de riego operativos, además de defensas fluviales y obras de encauce del río. Además, se realiza un estudio hidrológico y un análisis hidráulico de los cauces evaluando los caudales en crecida para periodos de 5 a 200 años, obteniendo las alturas de agua para estos periodos de retorno y lograr determinar las zonas afectas a inundación en crecida. Con los antecedentes anteriores se realiza un diagnóstico de las obras en el cauce encontrando que tanto el poblado de Camarones, como las bocatomas de riego y obras existentes en el cauce se encuentran

vulnerables a eventos de crecidas para un periodo de retorno de 100 años. En función del diagnóstico, se definen obras físicas como soluciones para los problemas de inundación y vulnerabilidad ante crecidas, además de mejoras de las bocatomas de riego y de las obras de arte de los canales.

En el estudio de Con Potencial (2016) se realizó un modelo de la cueca, donde se desarrollan tres tipos distintos de balance: el balance conceptual, que corresponde a la caracterización y cuantificación de los procesos físicos que ocurren dentro de la cuenca en estudio; el balance legal, que corresponde al cálculo del caudal necesario para satisfacer la demanda otorgada en términos de derechos de agua con probabilidad de excedencia del 85%; y el balance agronómico, el cual corresponde al cálculo del caudal necesario para optimizar el uso del suelo en función de los distintos métodos de riego utilizados. De este estudio se concluye que existe un déficit de oferta hídrica de un 40% para satisfacer la demanda máxima.

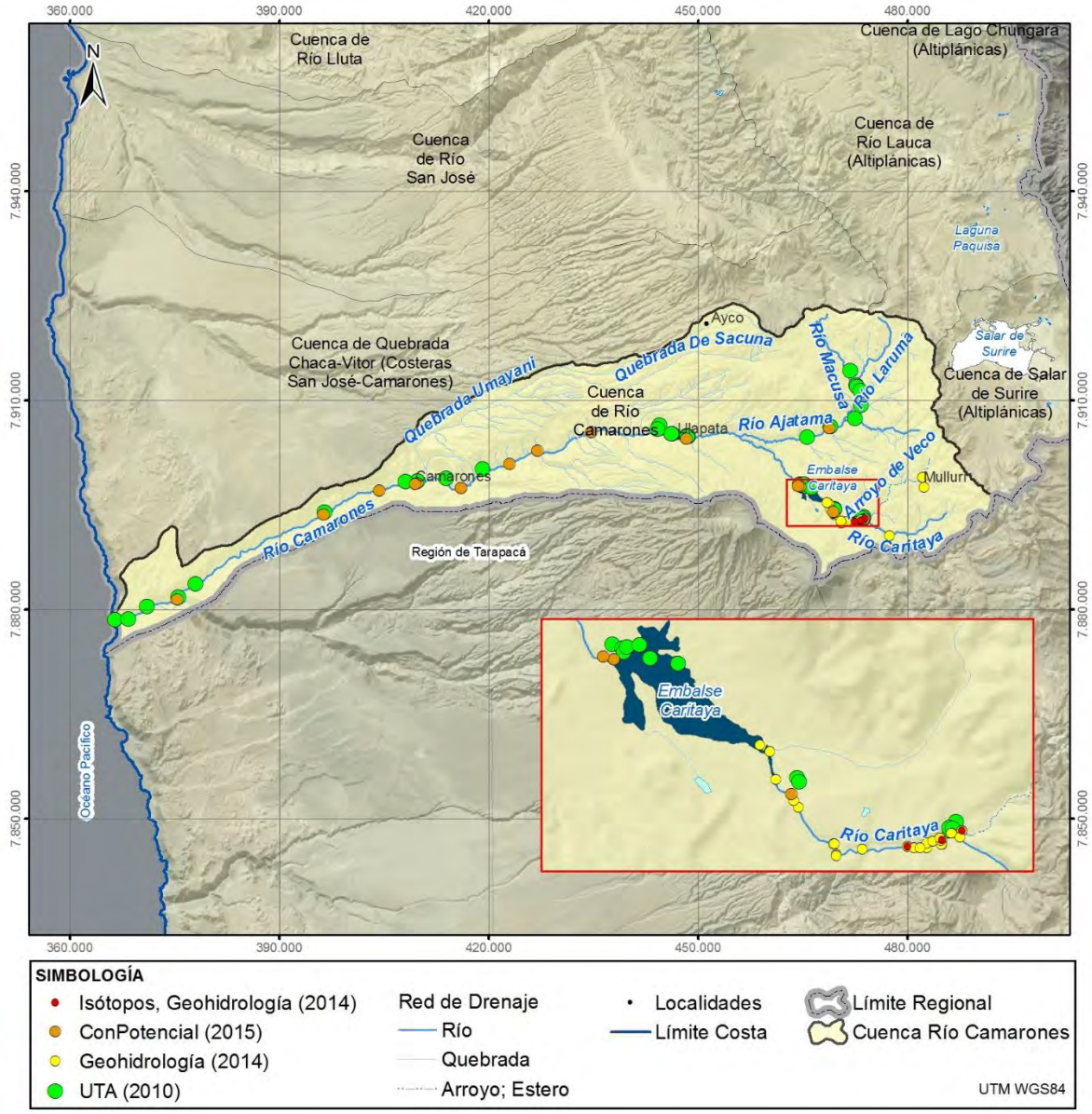


Figura 5.9 Ubicación de los puntos muestreados hidroquímico, isotópico y aforos en la cuenca del río Camarones. Fuente: elaboración propia.

5.7 Cuencas altiplánicas

Las cuencas altiplánicas de la región de Arica y Parinacota consideran las cuencas del río Caquena, del lago Chungara, del río Lauca y del salar de Surire. Los informes compilados hasta el momento son los siguientes:

- NIEMEYER, H. (1964). Ampliación de los recursos del río Lauca.
- BENÍTEZ, A. (1974). Estudio hidrometeorológico de las cuencas del río Lauca y lago Chungara.
- SALAS, R. (1975). Estudio geológico salar de Surire, Chile provincia de Arica, Chile.
- HENRIQUEZ *ET AL.* (1976). Reconocimiento hidrogeológico del extremo norte de la provincia de Arica.
- CUSICANQUI, H. (1979). Estudio geoquímico del área termal de Surire, Provincia de Arica I Región.
- KARZULOVIC J., (1981). Estudio geotécnico e hidrogeológico cuencas altiplánica laguna Chungara – laguna Cotacotani – río Lauca superior.
- QUINTANA, E. (1989). Red nacional mínima de control de lagos primera región. Estudio de los lagos Chungara y Cotacotani.
- GIAVELLI, A. (1989). Gravimetría, prospecto Altiplano de Arica.
- ENAP (1989). Geología altiplano de Arica.
- CASTRO *et al.* (1993). Identificación y ubicación de áreas de vegas y bofedales de las regiones primera y segunda.
- AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (1994a). Análisis redes de vigilancia calidad aguas terrestres estadística hidroquímica nacional, I Región.
- AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (1994b). Minuta hidrogeológica pozos parque nacional Lauca sector río Lauca.
- AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (1996). Estudio de aguas subterráneas sector río Lauca, I Región. Etapa I.
- DIRECCIÓN DE RIEGO (1996). Pruebas de bombeo pozos río Lauca, I Región.
- CONIC-BF (1996). Análisis Operacional del Sistema Lauca-Azapa, I Región.
- ARA Y AMBAR, (1996). Consultoría análisis ambiental del proyecto de explotación de pozos en parque nacional Lauca, I Región
- HAUSER, A. (1997). Catastro y caracterización de las fuentes de aguas minerales y termales de Chile.

- RISACHER, F. *et al.* (1999). Geoquímica de aguas en cuencas cerradas I, II y III Regiones.
- CEA (1999). Planta de lavado de Ulexita en el salar de Surire I Región.
- AMBAR, ÁLAMOS Y PERALTA (2000). Análisis hidrogeológico de la explotación del acuífero y efecto en los bofedales del altiplano ariqueño.
- SALAZAR *et al.* (2000). Análisis de requerimiento hídricos de vegas y bofedales en el norte de Chile.
- DGAS (2002). Evaluación y ordenamiento de los recursos hídricos en cuencas ríos Caplina y Uchusuma. Estudio Hidrológico.
- DGA (2003). Actualización delimitación de Acuíferos que alimentan vegas y bofedales, cuenca del río Caquena. Región de Tarapacá. S.D.T. nº162. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Departamento de Estudios y Planificación. Realizado por: Departamentos de Estudios y Planificación.
- APAZA, V. (2004). Estudo de aqüíferos volcano-sedimentares na sub-bacia hidrográfica do rio Uchusuma (zona de frontera Peru, Bolívia e Chile).
- HERRERA, C *et al.* (2006). Relación de aguas superficiales y subterráneas en el área del lago Chungara y lagunas de Cotacotani, norte de Chile: un estudio isotópico.
- LÓPEZ *et al.* (2006). Hidroquímica del salar de Surire, Chile.
- AHUMADA, M, FAUNDEZ, L. (2009). Guía descriptiva de los sistemas vegetacionales azonales hídricos terrestres de la ecorregión altiplánica.
- DICTUC (2009b). Levantamiento hidrogeológico para el desarrollo de nuevas fuentes de agua en áreas prioritarias de la zona norte de Chile, regiones XV, I, II Y III.
- QUIBORAX (2009). Programa de seguimiento ambiental extracción de ulexita en el salar de Surire.
- DGA (2011b). Evaluación de recursos incrementales aportados al valle de Azapa derivados de aguas subterráneas del acuífero del río Lauca S.D.T. 3015. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile. Realizado por: División de Estudios y Planificación
- CLAVERO, J. *et al.* (2012). Geología del volcán Parinacota, Región de Arica y Parinacota.
- CIREN (2013). Caracterización de humedales altoandinos para una gestión sustentable de las actividades productivas del sector norte del país.

- MATRAZ (2015). Diagnóstico de disponibilidad hídrica en la cuenca del río Lauca, región de Arica y Parinacota.
- AGROLEY CONSULTORES (2015). Saneamiento y Regularización de Derechos de Agua en Arica y Parinacota. Comisión Nacional de Riego.
- Iturra, N. (2016) Hidrogeología del Sistema Hídrico Parinacota-Cotacotani, Altiplano de la XV Región de Arica y Parinacota (2016). Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geología.

El estudio gravimétrico de Giavelli (1989) indica que en el altiplano existe una caída del basamento en el sector central de la cuenca, un alzamiento del basamento metamórfico y el emplazamiento de cuerpos intrusivos en el flanco oeste y una cadena volcánica en el flanco este. El estudio geológico de ENAP (1989) describe la estratigrafía y analiza las facies y el estilo depositacional de las formaciones Livilcar, Chucal, Lupica, Putani y de las unidades de cobertura. Por su parte, el estudio de Clavero *et al.* (2012) describe las unidades estratigráficas tanto de rocas volcánicas como de depósitos sedimentarios, a partir de los resultados de los estudios geoquímicos y petrológicos llevados a cabo en la zona del volcán Parinacota por anteriores autores y de los análisis radiométricos.

Merece especial atención los humedales de la zona, los que han sido estudiados en varias ocasiones. Castro *et al.* (1993) determinó que en la XV región predominan los bofedales, cuyo microrelieve es ondulado y en el que sus especies dominantes forman cojines aplanados o hemisféricos. Incluye ficha de los bofedales y vegas identificados en el área. La DGA-MOP, U. Chile y CCHEN (2000) llevaron a cabo la caracterización hidrobiológica en las formaciones vegetacionales, la caracterización del régimen hidrológico, hidroquímico e isotópico de las aguas que alimentan estos humedales y estiman la evaporación desde las superficies libres en torno a un bofedal en Chungara. Ahumada y Faúndez (2009) elaboran una guía, la cual es una caracterización vegetal de la macrozona altiplánica de los Andes entre las regiones de Arica y Parinacota y el norte de la región de Atacama. Caracteriza el régimen climático y describe los recursos hídricos El estudio del CIREN (2013) describe detalladamente los siguientes aspectos del altiplano de la región de Arica y Parinacota: Áreas protegidas, flora y vegetación, componente biológico, humedales, evaluación de Impacto Ambiental, fauna, condición ambiental, recursos hídricos, antecedentes climáticos, actividades productivas, recursos suelo.

A continuación se detalla la información recopilada que existe en cada una de las cuencas altiplánicas.

5.7.1 Cuenca de los ríos Uchusuma y Caquena

La cuenca de los ríos Uchusuma y Caquena tiene una superficie de 1.320 km^2 y se encuentra ubicada en el límite fronterizo en el que limita al este con Bolivia y al norte con Perú. El río Caquena es el principal curso superficial de la comuna de General Lagos y tiene una dirección sur-norte, aunque también se encuentra el río Putani y el río Uchusuma. El río Caquena nace en el sector norponiente de los volcanes Pomerape y Parinacota, y en el primer tramo de 25 km atraviesa territorio chileno, en los siguientes 25 km el río Caquena constituye la línea fronteriza entre Chile y Bolivia y finalmente pasa a fluir por territorio boliviano. El río Caquena posee un caudal promedio de 3,67 m^3/s y sus principales tributarios son los ríos Colpacagua y Cosapilla.

Son pocos los informes preexistentes analizados que incluyen información de esta cuenca, y ninguno la estudia exclusivamente. El estudio de Henríquez *et al.* (1976) indica que se reconocen dos áreas acuíferas importantes en la zona, una ubicada en el extremo norte y relacionada con los ríos Uchusuma, Colpas y Putani, la que denomina acuífero Visviri y otra más al sur, relacionada con el río Caquena. El acuífero de Visviri está formado por depósitos aluviales y fluviolacustres. La profundidad del agua es más bien somera (4,7 m de profundidad en la estación de Visviri), de muy bajo contenido salino y baja cantidad de boro y arsénico. La recarga del acuífero está asegurada por los cursos perennes de los ríos Uchusuma, Colpas y Putani, cuyas aguas son de bajo contenido salino, entre 255 y 316 mg/l de sólidos disueltos y bajo contenido de boro y arsénico. Se estimó un potencial del acuífero del orden de 500 l/s de agua de buena calidad para uso industrial, agrícola y potable. Por otra parte, el acuífero de Caquena se compone de materiales aluviales aterrazados. Se tomó una muestra del río Caquena que contenía 593 mg/L de sólidos disueltos, un bajo contenido de arsénico, y 2,1 mg/l de boro.

Una tesis de doctorado (Apaza, 2004) estudió la cuenca del río Uchusuma en Perú, parte de Chile y parte de Bolivia, en el que definió la secuencia sedimentaria del sector en tres: (i) el acuífero profundo y semiconfinado Maure en Perú o Mauri en Bolivia, compuesto de sedimentos de tipo lacustre fluvial con intercalaciones de horizontes volcano-sedimentarios y una resistividad de rango 42 ohm*m a 120 ohm*m; (ii) sobre

la capa anterior, una capa confinante de ignimbritas fracturadas de la Fm. Oxaya (nombre en Chile) con una resistividad de 110 a 263 ohm*m; (iii) sobre ésta unidad está el acuífero libre de la Fm. Capillune compuesta por depósitos lacustres y fluvioglaciales, intercalados con horizontes volcano-sedimentarios y aluviales recientes llamada Fm. Charaña en Bolivia, y cuya resistividad es de 62 a 95 ohm*m. Los parámetros hidráulicos de los acuíferos Maure y Capillune corresponden a transmisividades de 1960 m^2/día a 190 m^2/día y capacidades específicas de 14,8 m^3/h*m y 4,8 m^3/h*m respectivamente. Las reservas reguladas estimadas son de 20,6x10^6 m^3/año y las reservas permanentes de 932,3x10^6 m^3 y un flujo de suministro de 1,8 m^3/s. La composición química de las aguas de los acuíferos Maure y Capillune se clasifican como bicarbonatadas cálcicas y sulfatadas cálcicas respectivamente. Finalmente, desarrolló un modelo conceptual del funcionamiento de los acuíferos locales y entregó la información necesaria para la gestión de los recursos subterráneos.

Por otro lado, en la base de datos hidroquímicos del informe del DICTUC (2009) se presentan los datos químicos de 30 muestras de agua superficial tomadas en las estaciones de calidad de la DGA y los datos isotópicos de ^{18}O y deuterio, de una muestra de precipitación dentro de la cuenca. También, en el informe de AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (1994a) se analizan 18 muestras de agua superficial en la estación río Caquena en vertedero. En este informe se concluye que el río Caquena presenta baja conductividad eléctrica, pH alcalino, alto contenido de boro y levemente alto de arsénico.

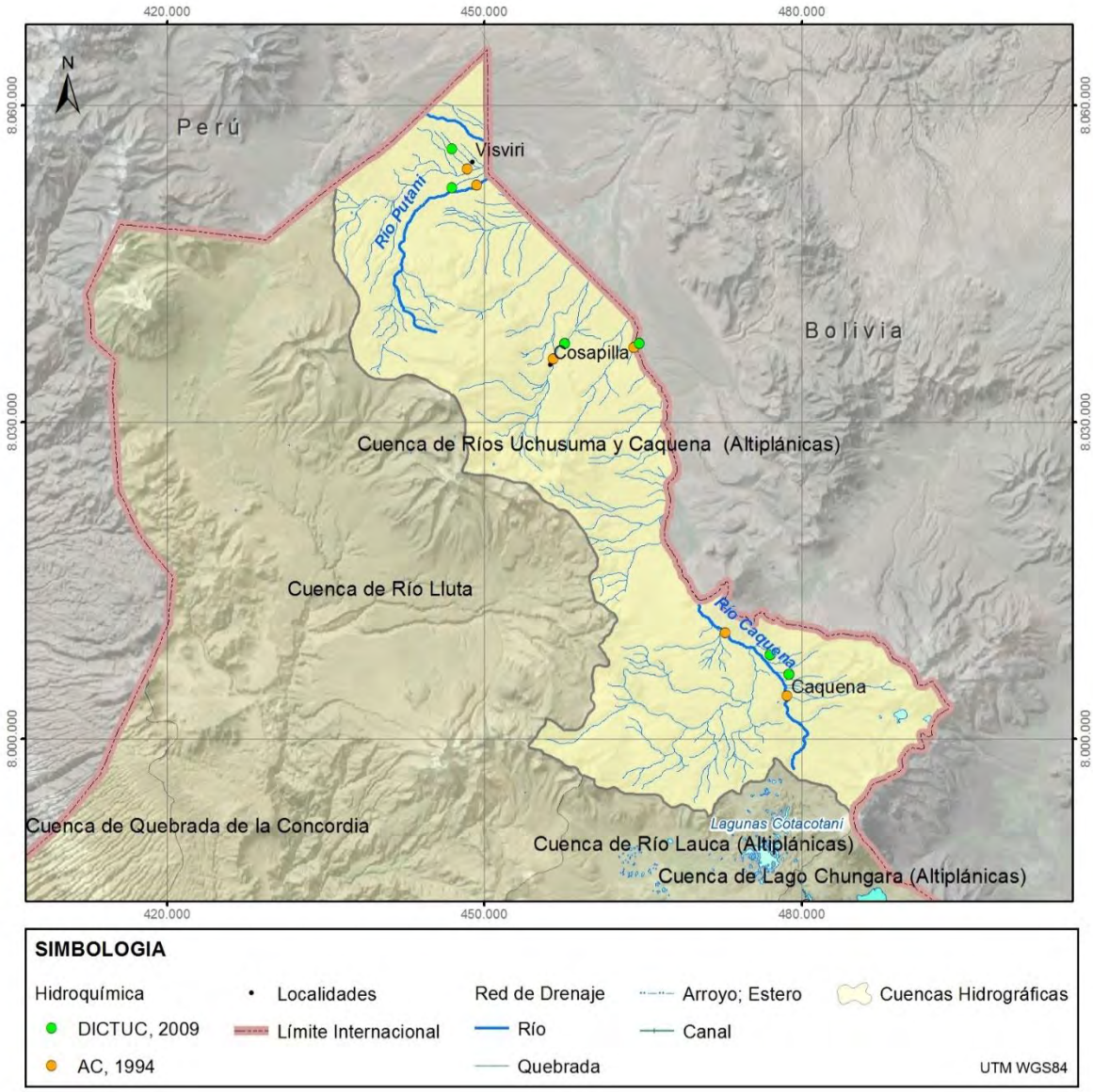


Figura 5.10 Ubicación de los puntos de agua muestreados para el análisis hidroquímico por DICTUC (2009) y AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (1994a) en la cuenca del río Caquena. Fuente: elaboración propia.

5.7.2 Cuenca del lago Chungara

La cuenca del lago Chungara es una cuenca endorreica que posee una superficie de 276 km^2 que dispone de un lago en el norte de aproximadamente 23 km^2. El afluente más importante del lago es el río Chungara, que nace en el volcán Guallatire.

Benítez (1974) estudió las variables hidrometeorológicas del sector entre los años 1959 a 1973.

El estudio de Niemeyer (1964) realiza una completa descripción del sistema de lagunas Chungara, Cotacotani y Ciénagas de Parinacota. Se describe la calidad hidroquímica de distintas fuentes, además de las características físicas de las lagunas y estimaciones del balance hídrico de cada cuerpo de agua.

El primer estudio hidroquímico completo elaborado en la cuenca del lago Chungara fue el de Risacher *et al.* (1999). En este estudio se concluye que el lago Chungara es alimentado por agua alcalina carbonatada desde las vertientes y por agua alcalina sulfatada desde el río Chungara, originando un lago de vía evolutiva alcalina sulfatada. El balance hídrico da un volumen de aporte superficial y subterráneo de 669 l/s y un volumen de infiltraciones de 32 l/s o sea el 5% de los aportes.

Por otro lado, se ha investigado si existe conexión hidráulica desde el lago Chungara hacia las lagunas de Cotacotani. En el estudio de Karzulovic (1981) se realizó un análisis hidrológico e hidrogeológico en base a una recopilación y análisis de antecedentes existentes que indica que existe una conexión entre las lagunas Chungara y Cotacotani, cuyo flujo subterráneo natural es del orden de 250-350 l/s. Además se describe la calidad del agua de las cuencas altiplánicas, en las que se destacan los altos valores de boro y flúor. En el artículo de Herrera *et al.* (2006) se evaluó mediante el análisis isotópico de ^{18}O, deuterio y tritio que existe un flujo de agua subterránea desde el lago Chungara hacia las lagunas de Cotacotani y que aproximadamente un 58% del volumen del agua que alimenta las lagunas proviene del lago Chungara, mientras que el 42% restante lo hace de otros aportes subterráneos. Posteriormente, Matraz (2015) identificó un acuífero superior formado por depósitos de brechas del holoceno y un acuífero inferior constituido por depósitos de avalancha de detritos que mostraría la conexión hidráulica entre ambas masas de agua. Por su parte, Quintana (1989) hace un estudio limnológico de las lagunas Chungara y Cotacotani e incluye parámetros morfométricos, fisicoquímicos, índice de estado trófico y perfiles de temperatura.

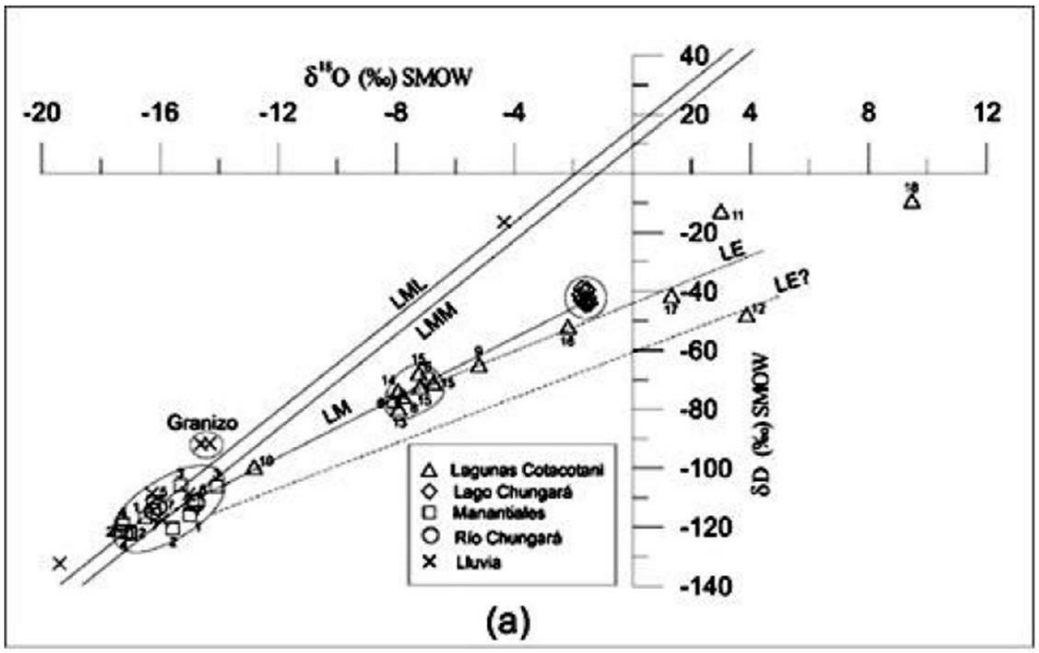


Figura 5.11 Gráfico del análisis isotópico de la conexión hidráulica entre el lago Chungara y las lagunas de Cotacotani. Fuente: Herrera et al. (2006).

En la Figura 5.12 se muestra la ubicación de los puntos muestreados para el análisis hidroquímico e isotópico y de la geofísica realizada en la cuenca del lago Chungara por los diferentes autores.

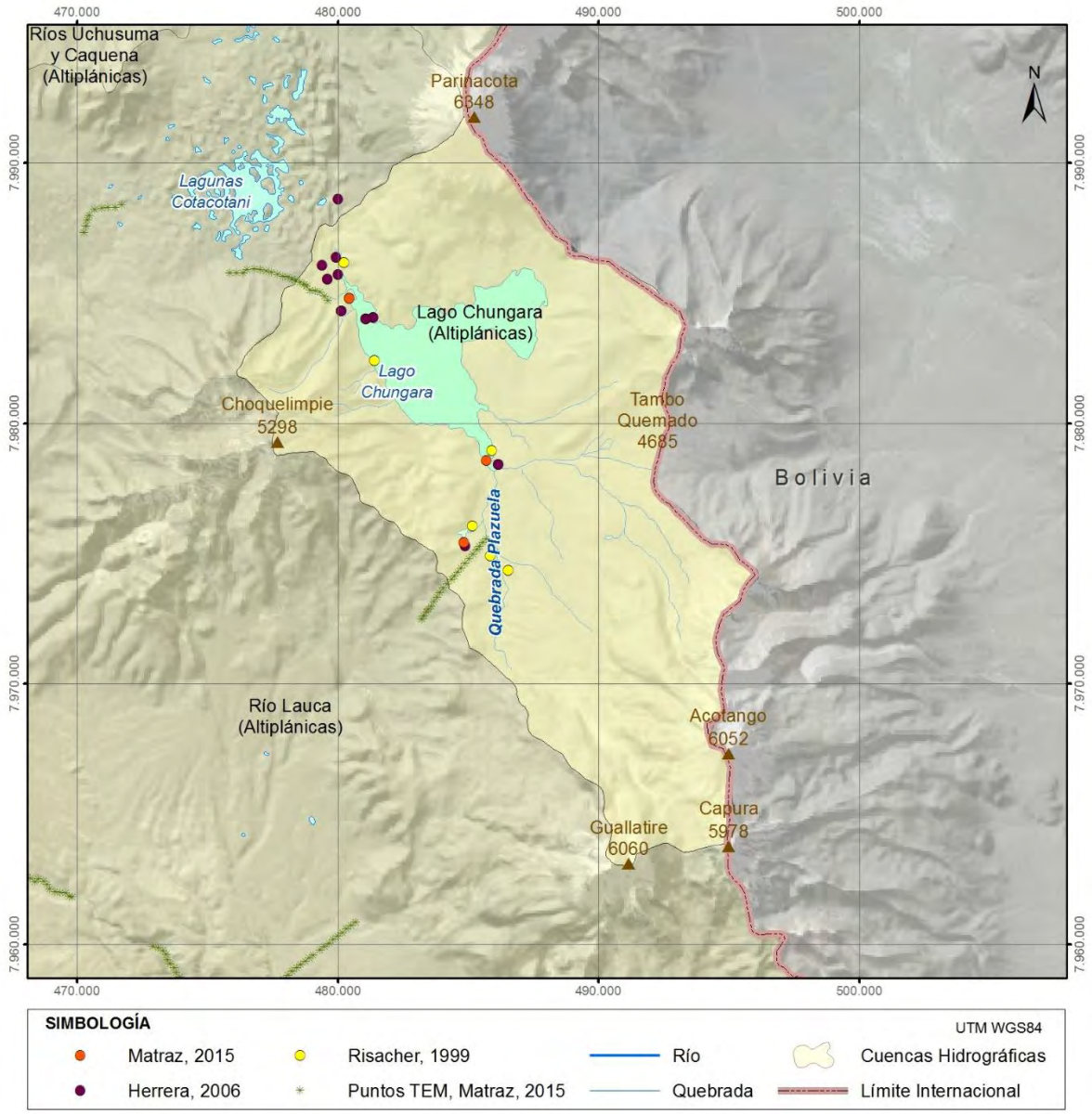


Figura 5.12 Ubicación de los puntos muestreados de hidroquímica e isotopos, y geofísica realizada en la cuenca del lago Chungara. Fuente: elaboración propia.

5.7.3 Cuenca del río Lauca

La cuenca del río Lauca tiene una superficie de 2.427 km^2 y es tributaria de la cuenca del salar Coipasa, la cual se ubica en su mayor parte en el altiplano boliviano. En el sector nororiente de la cuenca se encuentran las lagunas de Cotacotani, las cuales alimentan a las ciénagas de Parinacota a través del río Desaguadero. De las ciénagas de Parinacota nace el río Lauca, cuyo escurrimiento presenta una dirección norte-

sureste. En el nacimiento del río Lauca se construyó el Canal Lauca-Azapa, el cual transvasa agua desde el río Lauca hasta la quebrada de Chusmiza, afluente del río San José. Los principales cauces tributarios son el río Vizcachani, la quebrada Chuba, el río Chusjavida, el río Guallatire, el río Paquisa y las quebradas Uncaliri y Culca.

Las variables hidrometeorológicas fueron estudiadas entre los años 1959 a 1973 (Benítez, 1974). Por su parte, Karzulovic (1981) realizó un análisis hidrológico e hidrogeológico del sistema laguna Cotacotani-río desaguadero-río Lauca en base a la recopilación y análisis de antecedentes existentes y describió las posibles soluciones de conexión entre Chungara y Cotacotani para el aumento de caudal del canal Lauca, dado que el estado del canal Chungara - Cotacotani se describe como no operable.

En el sector norte de la cuenca existen varios estudios debido a que en los años 1992 y 1993 fueron perforados y habilitados 10 pozos en la cuenca de los ríos Lauca y Vizcachani, por orden del Ministerio de Obras Públicas (MOP) y con la finalidad de extraer agua subterránea de la cuenca del río Lauca. En el año 2000 la consultora AMBAR elaboró un Estudio de Impacto Ambiental (EIA) a la Dirección de Riego del MOP para la extracción de agua subterránea, pero la Comisión de Medio Ambiente de la Región de Tarapacá no la aprobó hasta el año 2004. La consultora AMBAR elaboró un par de estudios en este sector de la cuenca, uno en el año 1996 y otro el 2000. En el informe de AMBAR (1996) se presentan las características climáticas, geológicas, edáficas, hidrológicas e hidrogeológicas y del medio biótico, mientras que en el de AMBAR (2000) se explicó detalladamente como se realizaron las pruebas de bombeo y como se reflejó en el río. A partir de la estratigrafía de los sondajes y de la prospección geofísica, se diferenciaron 3 capas: un acuífero superior de carácter libre y una capa semiconfinante que a su vez confina el acuífero inferior. El acuífero superior tiene una potencia de 15-30 m y el nivel saturado se encuentra a 1-7 m de profundidad, el estrato medio semiconfinante tiene un espesor que varía entre 20 y 30 m, mientras que el acuífero inferior presenta una potencia comprendida entre 40 y 120 m.

En la Minuta hidrogeológica de AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (1994b) se proponen caudales de explotación en los pozos de propiedad del MOP. Los caudales estimados a partir de las pruebas de bombeo de gasto variable y gasto constante corresponden a 280,5 l/s en el sector del río Lauca y de 35 l/s en el río Vizcachani. Se calculó una transmisividad del acuífero en el río Lauca y Vizcachani a partir de los valores obtenidos en las pruebas de gasto constante, variando entre 335 m^2/día y 130 m^2/día.

De acuerdo a la estratigrafía de los sondajes, considera un coeficiente de almacenamiento de 3%. También se calculó un gradiente del nivel freático mediante la diferencia entre las cotas del nivel freático y la distancia entre los pozos.

Durante el año 1996, AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (1996) analizó el tramo del río Lauca anterior a la confluencia del río Lauca con el río Vizcachani. En éste incluyó la estadística de caudales mensuales observados desde la década del 60 en las diferentes estaciones, además de columnas estratigráficas y pruebas de bombeo, datos de calidad de aguas subterráneas y superficiales y de análisis de isótopos. A su vez, la Dirección de Riego elaboró un informe detallado de las pruebas de bombeo en sondajes del Parque Nacional Lauca. Ese mismo año, Conic-BF (1996) determinó los recursos hídricos disponibles del sistema Lauca-Azapa, para diferentes probabilidades de excedencia, y en el que se ha considerado el aprovechamiento real, las obras existentes y su operación. Sin embargo, el principal objetivo del estudio fue desarrollar un modelo de simulación computacional que permitiera efectuar un seguimiento y planificación de la operación del sistema.

El primer estudio hidroquímico que se realizó en la cuenca del río Lauca fue Risacher *et al.* (1999). En este informe se determinó que el río Lauca se alimenta de la mezcla de tres tipos de agua: las lagunas Cotacotani con aguas de salinidad relativamente elevada (800 mg/l) y de tipo Mg / HCO_3; aguas muy diluidas (100 mg/l) de tipo Na / HCO_3 que provienen de la lixiviación de las ignimbritas de la Formación Oxaya y aguas de concentración intermedia (500 mg/l) de tipo Na-Ca / SO_4, que drenan las traquitas y andesitas del Cuaternario. Se caracterizan por ser aguas con altos contenidos en arsénico y boro, menos las aguas subterráneas del acuífero asociado a la Formación Oxaya. En el estudio de Risacher *et al.* (1999) no se realizó un balance hídrico en la cuenca del río Lauca.

Por otro lado, el estudio de la DGA (2011) tiene por objeto determinar, desde el punto de vista técnico-económico, el mejor uso de los recursos de agua subterránea del acuífero del Lauca, a partir de la evaluación de proyectos de desarrollo agrícola en el valle de Azapa y para el abastecimiento de agua potable de la Ciudad de Arica. Para efectos de este trabajo se estimó una primera aproximación de caudal sustentable del acuífero en 280 l/s sobre la base de la calibración del Modelo de Simulación Hidrogeológico. En éste se presenta el catastro de derechos de aguas superficiales constituidos y regularizados pertenecientes a las comunidades indígenas, los cuales

suponen un caudal de 2.674,3 l/s, y de los derechos superficiales constituidos pertenecientes a los usuarios del Canal Azapa, que alcanzan un caudal de 1.133 l/s.

El informe más actual y que engloba toda la cuenca es el estudio "Diagnóstico de disponibilidad hídrica en la cuenca del río Lauca, región de Arica y Parinacota" realizado por Matraz (2015). Este estudio realiza un levantamiento de información hidrogeológica e hidroquímica para elaborar un modelo conceptual y un balance hídrico de la cuenca del río Lauca. En este estudio se realiza una campaña de prospección geofísica (9 perfiles con un total de 602 TEM), 4 campañas de aforo y medición de parámetros fisicoquímicos y 2 campañas de muestreo hidroquímico e isotópico, en septiembre de 2014 y en abril de 2015. A partir de esta información se lleva a cabo una caracterización hidrológica, geológica, hidrogeológica e hidroquímica.

En la Figura 5.13 se muestra la ubicación de los puntos muestreados para el análisis hidroquímico e isotópico en la cuenca del río Lauca por los diferentes autores.

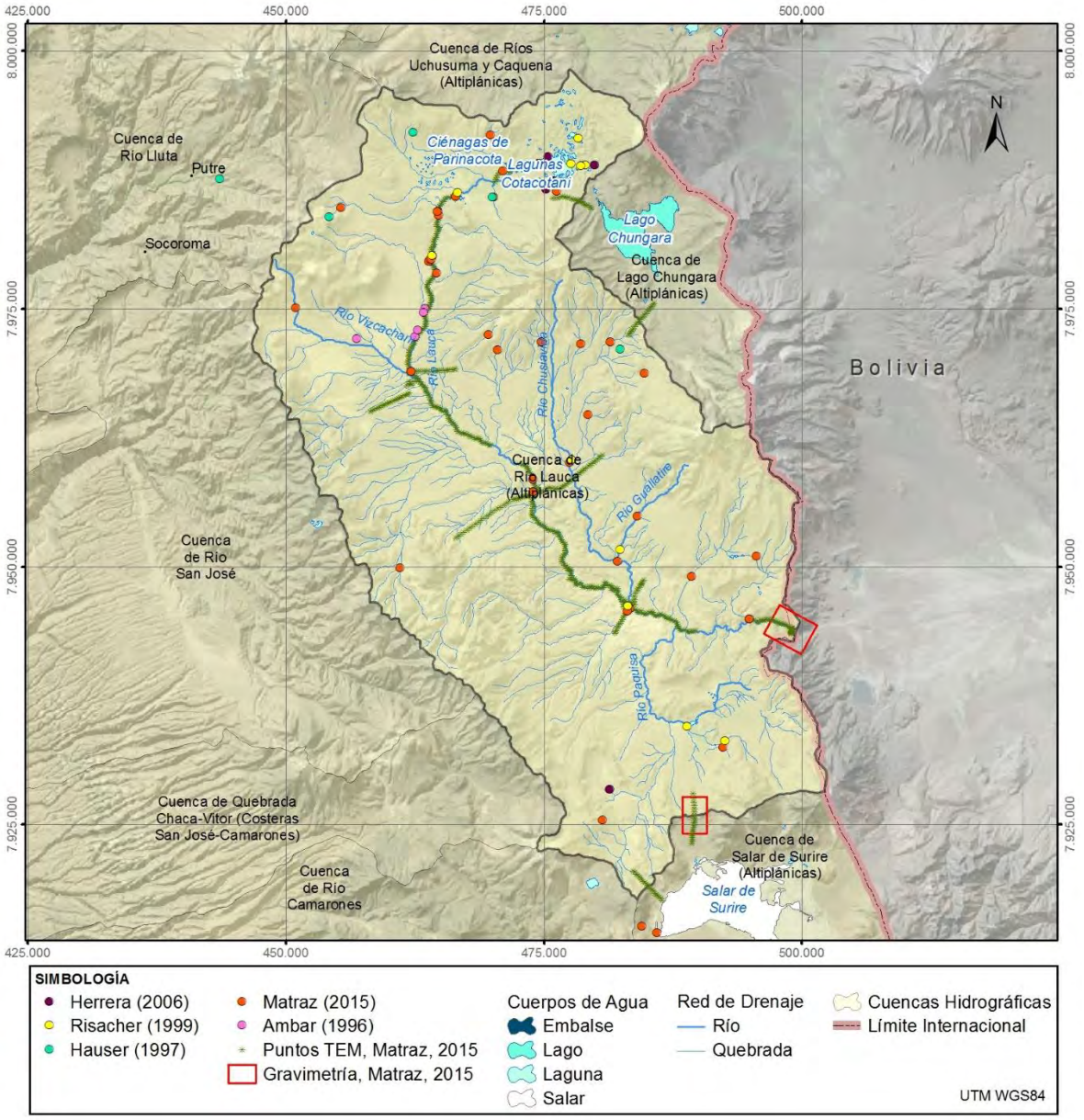


Figura 5.13 Ubicación de los puntos muestreados hidroquímico e isotópico y de la geofísica realizada en la cuenca del río Lauca. Fuente: elaboración propia.

En este estudio se han integrado las caracterizaciones en un modelo conceptual de la cuenca y se han elaborado perfiles hidrogeológicos que atraviesan la cuenca de este a oeste. Se identifica un acuífero libre en el sector de las ciénagas de Parinacota, un acuífero detrítico confinado en el sector alto de la cuenca, un acuífero multicapa en el sector sur de la cuenca y en el paso fronterizo con Bolivia un acuífero de porosidad primaria y secundaria. Los complejos volcánicos se comportan como acuíferos fracturados.

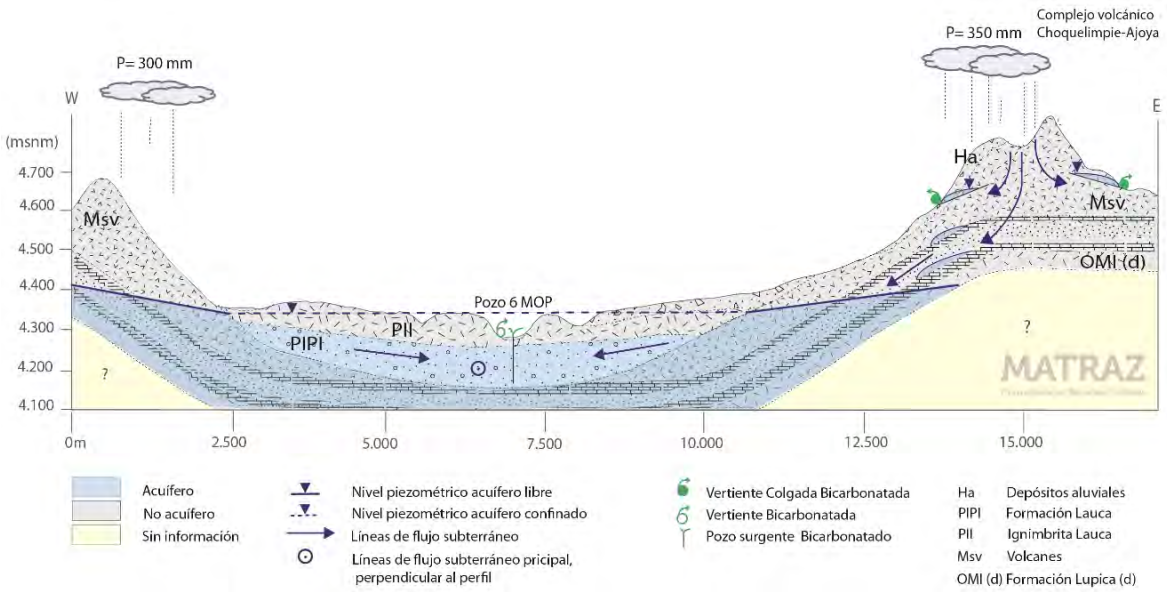


Figura 5.14 Perfil Hidrogeológico del sector alto de la cuenca del río Lauca. Fuente: Matraz (2015).

También se realizó un modelo hidrológico para un año hidrológico promedio o normal, un año húmedo y un año seco. Además, revisa y confecciona un catastro de usuarios de aguas subterráneas y superficiales en la cuenca del río Lauca y de los usuarios del canal Lauca-Azapa.

Finalmente se estima un balance hídrico, considerando que se encuentra en equilibrio, con un caudal disponible de 3.731 l/s. Por un lado, considerando como entrada al sistema: la precipitación (22.454 l/s), el caudal subterráneo desde el lago Chungara (250 l/s) y el caudal subterráneo desde el volcán Guallatire (303 l/s). Por otro lado, las variables de salida del sistema son: la evapotranspiración (18.511 l/s), las extracciones del canal Lauca (764 l/s), el caudal superficial (2.653 l/s) y el caudal subterráneo (1.078 l/s). El estudio de la DGA (2011) también calculó un balance hídrico, pero sólo del sector comprendido entre la estación fluviométrica del río Lauca en Estancia El Lago y después de la confluencia del río Vizcachani con el río Lauca.

Cabe destacar que Matraz (2015) analizó la posible conexión entre la cuenca del río Lauca y la cuenca del lago Chungara, en el que se comprobó que existe conexión. Esto mismo se realizó entre la cuenca del río Lauca y la cuenca del salar de Surire, en la que se identificó que no existe conexión.

5.7.4 Cuenca del salar de Surire

La cuenca del salar de Surire posee una superficie de 552 km^2 y un salar de 62 km^2. Esta se encuentra ubicada al sur de la cuenca del río Lauca, y limita al este con Bolivia, al sur con la región de Tarapacá y al oeste con la cuenca del río Camarones.

El informe de Salas (1975) es un estudio antiguo y únicamente geológico. Este informe pretende dimensionar el depósito de minerales y elaborar un proyecto de factibilidad industrial. Las perforaciones aportan la información geológica para conocer la hidrogeología del salar y de los boratos existentes en el salar, las leyes y la distribución de estos. En este informe se determina que las evaporitas, concretamente el estrato de ulexita, contiene la mayor concentración de boratos y considera que no existen problemas para la explotación del yacimiento. Así mismo, cita como recursos minerales no-metálicos la caolinita, diatomita, azufre y perlita. Por otro lado, identificó en el sector suroriental del salar una actividad termal, del mismo modo que Hauser (1997). El estudio de Cusicanqui (1979) analizó las manifestaciones termales en el sector sureste del salar de Surire. Es el primer estudio geoquímico de detalle llevado a cabo en el salar de Surire, en el que se analizan 13 muestras de fluidos termales correspondientes a 12 manifestaciones, tomadas en octubre de 1978 y 1979. Se presenta el listado de los resultados de los análisis hidroquímicos, sin embargo, no se encuentran las coordenadas de los puntos muestreados.

Hidroquímicamente fue estudiado por Risacher *et al.* (1999). Y éste identificó 4 tipos de aguas que alimentan el salar de Surire y determina que el salar de Surire se originó por la removilización de un antiguo salar y actualmente los aportes de sales son mínimos. No presenta un balance hídrico de la cuenca, pero si un análisis de la relación isotópica entre las muestras analizadas en el salar de Surire con la composición de las precipitaciones en el salar de Ascotán. En el informe de CEA (1999) se realiza un análisis de la calidad del agua en el salar de Surire, donde se evaluaron diversos parámetros. Las 13 estaciones de muestreo se ubican en sectores representativos de los ecosistemas lacustres del salar. El total de muestras se pueden agrupar según su variabilidad en las muestras del interior del salar y las que están en los márgenes. Las que se encuentran dentro del salar presentan una elevada heterogeneidad espacial y temporal de variables fisicoquímicas.

La empresa minera Quiborax extrae ulexita y sus minerales derivados de la superficie poniente del salar de Surire. El informe de QUIBORAX (2009) entrega los resultados del plan de monitoreo estacional del año 1999 hasta el 2009 del salar de Surire y de sus accesos con el fin de determinar cualitativa y cuantitativamente los efectos que puede producir la actividad minera en el ecosistema. Los aspectos evaluados son: calidad físico-química del agua, la biota acuática y biota terrestre de la cuenca. Hasta el 2009 no se detectaron cambios significativos en la estructura y funcionamiento de los ecosistemas.

Posteriormente, López *et al.* (2006) en su estudio hidroquímico del salar de Surire concluye que las características químicas de soluciones termales y salmueras son muy similares, ya que las aguas termales surgen en el interior del salar y, al disolver sales en su ascenso, adquieren proporciones iónicas muy similares a las de las salmueras superficiales muestreadas en el interior del salar. Por otro lado, las aguas de las vertientes muestran una mayor variabilidad iónica, consecuencia del drenaje de las aguas por diferentes tipos de rocas volcánicas y sedimentarias, que confieren una marca química a las aguas que discurren en ellas.

Por otro lado, Matraz (2015) evaluó mediante dos perfiles TEM y dos mallas de gravimetría que no existe conexión hidráulica entre esta cuenca y la cuenca del río Lauca.

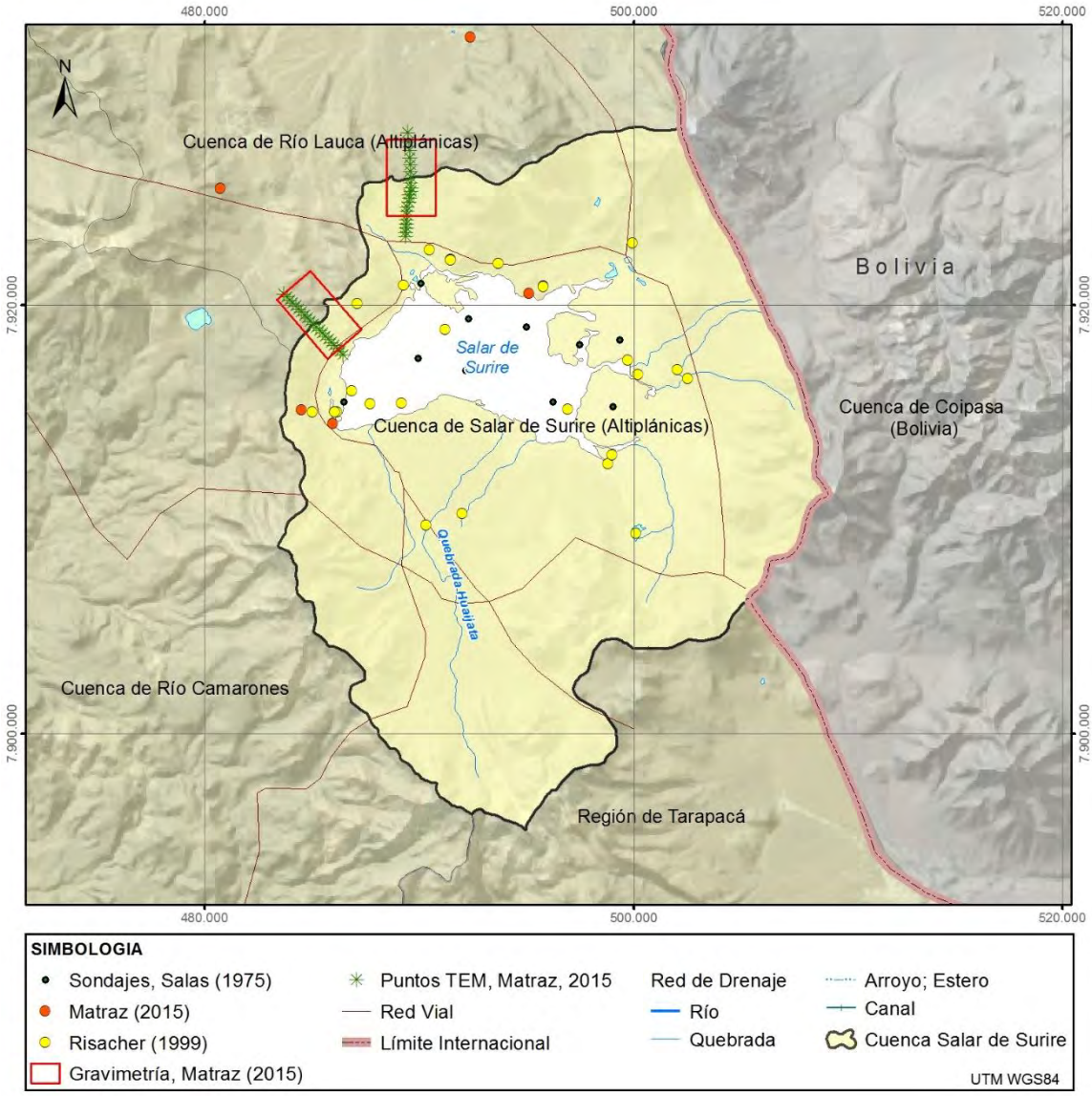


Figura 5.15 Ubicación de los puntos muestreados de hidroquímico e isótopos y geofísica realizada en la cuenca del salar de Surire. Fuente: elaboración propia.

6. **Línea Base de la Demanda**

En este punto se han actualizado las demandas hídricas de los sistemas: extracciones aguas superficiales y subterráneas; uso real, demanda real vigente (Derechos de Aprovechamiento de Aguas) y se han realizado proyecciones a la demanda futura, para ello se ha realizado:

- Una actualización, sistematización, y análisis de la información de cada uno de los derechos de aprovechamiento de aguas (DAA), tanto superficiales como subterráneos, entregados en la región, bajo los diferentes mecanismos (2° transitorio, 4° transitorio, Nuevo Derecho, SAG, Comunidades de Aguas, etc.).
- Para el consumo real se ha obtenido la demanda mensual de cada uno de los actores en cada una de las fuentes, teniendo en consideración la estacionalidad y temporalidad de los cultivos, industria y sanitaria, en el que además se identifican periodos críticos.
- Se han realizado proyecciones a la demanda hídrica futura, considerando las diferentes fuentes productivas y el crecimiento y proyecciones regionales, desde un análisis de mediano y largo plazo utilizando métodos cualitativos y cuantitativos válidos para cada una de las áreas de estudio.

6.1 Sistematización de la Información de Derechos

6.1.1 Antecedentes Generales

El presente punto tiene por objetivo catastrar los derechos de aprovechamiento de aguas de la Región de Arica y Parinacota. El objetivo particular de este catastro es que, a partir de los datos recopilados de las inscripciones conservatorias del Registro de propiedad de Aguas en el Conservador de Arica, determinar la trazabilidad de las aguas, el balance hídrico y la identificación de la existencia de títulos imperfectos o susceptibles de regularización.

Con este fin se realizaron las siguientes actividades:

1) Recopilación o levantamiento de información extraídas de los libros del Registro de Propiedad de Aguas del Conservador de Bienes Rices (CBR) de Arica.

2) Recopilación de información de documentos y antecedentes proporcionados por la Dirección Regional de Aguas.

3) Levantamiento de la regularización de derechos de aguas (NR) en los 1°, 2°, 3° y Ex 4° Juzgados de Letras de Arica, y posterior verificación de la inscripción en el CBR de Arica.

Para el análisis general es necesario identificar los diferentes tipos de solicitudes de derechos, ciñéndose a la siguiente nomenclatura:

- ND= Derechos de Aprovechamiento (Artículos 140 y siguientes del Código de Aguas y artículo 4º y 5º Transitorio.).
- NR= Regularización de Derechos (Artículo 2º Transitorio del Código de Aguas).
- NC= Comunidades de Aguas (Artículo 187 y siguientes del Código de Aguas).
- VPC= Cambio de punto de captación (Artículos 130 y siguientes del Código de Aguas y Articulo 42 de la resolución DGA Nº 425).
- VT = Traslado del Ejercicio de los Derechos de Aprovechamiento (Artículo 163 y siguientes del Código de Aguas).

6.1.2 Desarrollo del Trabajo

El presente catastro comenzó con una visita en terreno a la ciudad de Arica con fecha 11 de octubre del 2015. En ésta los abogados visitaron el CBR de Arica y realizaron una revisión general de la situación de los Libros del Registro de Propiedad de Aguas, como también la forma de operar del conservador de bienes de Arica, para obtener un levantamiento eficiente de la información.

Adicionalmente se sostuvo una reunión inicial del tema, en la que se clarificaron los requerimientos puntuales de la DGA. Ya que en su oportunidad se manifestó para el trabajo de este catastro, el levantamiento de más información, situación que fue acotada en la reunión, debido a esto se replanteó la forma de trabajo y los instrumentos necesarios para la extracción de la información.

Fue así como se planteó que la fuente fundamental de la información serían los Derechos Inscritos en el Registro de Derechos de Propiedad del Conservador de Bienes Raíces de Arica y en caso eventual, cuando se requiriera, se debía consultar las inscripciones del Archivero Regional en Iquique y eventualmente el Archivo Nacional de Santiago. El estatus correspondería a los derechos vigentes al 15 de Octubre del 2015.

Se indicó que este trabajó no corresponde a un estudio de títulos clásico, donde se analizan todas las dimensiones posibles de la inscripción, por ejemplo: modo de adquirir, precio transferencia, etc. No obstante lo anterior, igualmente se levantó esta información para tener un catastro lo más completo posible, en el que con una extracción de información se pueden establecer los parámetros o puntos de conexión.

La extracción de información se realizó año a año con una revisión de los libros, y lo que fue llevado a fichas especialmente diseñadas para este efecto, para luego analizarlas y sistematizarlas en una planilla Excel, la que corresponde a la base de información de la Plataforma que se presenta más adelante. Este último requiere de puntos de conexión que corresponde a la información del derecho de aprovechamiento de agua y de las transferencias (FS, N°, AÑO).

La información que se ha extraído ha sido:

1) Caso de Titulares individuales del derecho. Personas naturales, jurídicas y comunidades hereditarias.

- Inscripción foja, número y año.
- Individualización de titular(es)
- Característica del uso y ejercicio; puntos captación, caudal, fuente.
- Transferencias y transmisiones, al margen
- Resolución DGA (N°, fecha)
- Otras observaciones.

2) Caso Organizaciones de Usuarios de Aguas. Individualización de OUAS.

- Inscripción foja, número y año.
- Individualización de OUA.
- Individualización de su titular (es)
- Característica del uso y ejercicio; puntos captación, caudal, fuente.
- Resolución DGA (N°, fecha)
- Transferencia y/ o transmisiones individuales observadas al margen
- Otras observaciones.

Una vez transcrita la información correspondiente a la asignación originaria del derecho, se revisó la existencia de anotaciones al margen que dieran cuenta de transferencias y/o transmisiones del mismo, que correspondieran a la totalidad del derecho o a una parte de este.

Esta información es la se ha utilizado de parámetro o puntos de conexión, para seguir la trazabilidad del derecho de Aguas con el fin de establecer la situación del balance hídrico, como asimismo determinar la existencia de títulos imperfectos o susceptibles de regularización.

6.1.3 Análisis General

Se levantaron 5.623 registros o inscripciones, en la que no se incluyen las Comunidades de Aguas, sino que solamente aquellas inscripciones individuales de los comuneros o accionistas que se encuentran legalmente inscritos, ya que en el punto 6.1.7 del presente informe se analiza la situación de éstas. De la revisión de las inscripciones se pudo determinar que existen 888 derechos de aprovechamiento de aguas originarios (DAA). Para determinar estos derechos originarios, se consideraron las siguientes vías de constitución:

- Constituidos mediante Resolución administrativa de la Dirección General de Aguas (DGA).
- Constituidos mediante Sentencia Judicial.
- Constituidos mediante Resolución del Servicio Agrícola Ganadero (SAG).

Tal como se observa en la Tabla 6.1, ésta contiene la totalidad de los derechos originarios de aprovechamiento de aguas superficiales y subterráneas que han sido constituidos en la región de Arica y Parinacota por Resoluciones de la Dirección General de Aguas, que hemos individualizado como solicitudes del tipo "ND", estas se tramitan por procedimiento administrativo en la Dirección General de Aguas (DGA) según procedimiento indicado en el artículo 140 y siguientes, como también al artículo 4° y 5º Transitorio correspondientes al Código de Agua (CA). Asimismo se observan aquellos derechos de aguas constituidos por Resolución Judicial de acuerdo a lo indicado en el artículo 2º transitorio del CA que corresponden a la sigla "NR". De éstos, 546 corresponden a derechos superficiales y 342 a derechos subterráneos, por lo tanto, de la totalidad un 61% corresponden a los primeros y 39% a los segundos. De la misma manera, en la Tabla 6.1 se señalan que las unidades de caudal de estos derechos corresponden a Litros por segundo (l/s), Acciones o Minutos (tiempo de riego que se ha uniformado en minutos).

Tabla 6.1 Derechos de aprovechamiento originarios, caudal en l/s, acciones y minutos. Fuente: elaboración propia.

Derechos de aprovechamiento Derechos Originarios	Cantidad de Derechos	l/s	Acciones	Minutos
Derechos superficiales	546	10.955	22.620	954
Derechos subterráneos	342	3.435	6	0
Total	888	14.391	22.626	954

Por otra parte se corroboró que existen 33 derechos constituidos e inscritos en el CBR que corresponden a Nuevos Derechos (ND) en virtud del procedimiento señalado en los artículo 140 siguientes y 250 correspondientes al procedimiento indicado en el artículo 4° y 5º Transitorio del CA, así como mercedes de aguas y otros. Así mismo las Regularizaciones (NR) inscritas en el CBR que corresponden a 286 en virtud de lo señalado en el artículo 2° Transitorio del CA.

En la Tabla 6.2 se puede ver reflejado como se distribuyen los ND y NR en derechos superficiales y subterráneos, así mismo la cantidad de caudal constituidos en litros por segundo, acciones y minutos (tiempo de riego que se ha uniformado en minutos).

Tabla 6.2 Derechos de aprovechamiento de aguas y su distribución en ND y NR, superficiales y subterráneos, Caudales en l/s, acciones y minutos. Fuente: elaboración propia.

Derechos de aprovecha-miento	ND				NR			
	Cantidad	l/s	Acciones	Minutos	Cantidad	l/s	Acciones	Minutos
Derechos superficiales	349	3.972,74	22.564,44	0	197	6.982,34	56,01	954
Derechos subterráneos	253	2.181,1	0	0	89	1.254,33	6	0
Total	602	6.153,84	22.564,44	0	286	8.236,67	62,01	954

A. Expedientes Dirección General de Aguas ND

Los expedientes ND corresponden a solicitudes de constitución de Derechos de Aprovechamiento de Aguas en virtud del procedimiento señalado en los artículos 140 y siguientes, 4º y 5º Transitorios del CA, mercedes de aguas y otros. Revisados estos expedientes, de aquellos derechos constituidos por resolución DGA, el 63 % fue debidamente inscrito en el CBR, lo que significa que existe un 37% que se encuentra pendiente de terminar el proceso de tramitación. En el Anexos III se adjuntan los Expedientes ND constituidos por Resolución DGA y no inscritos en el Registro de Aguas del Conservador.

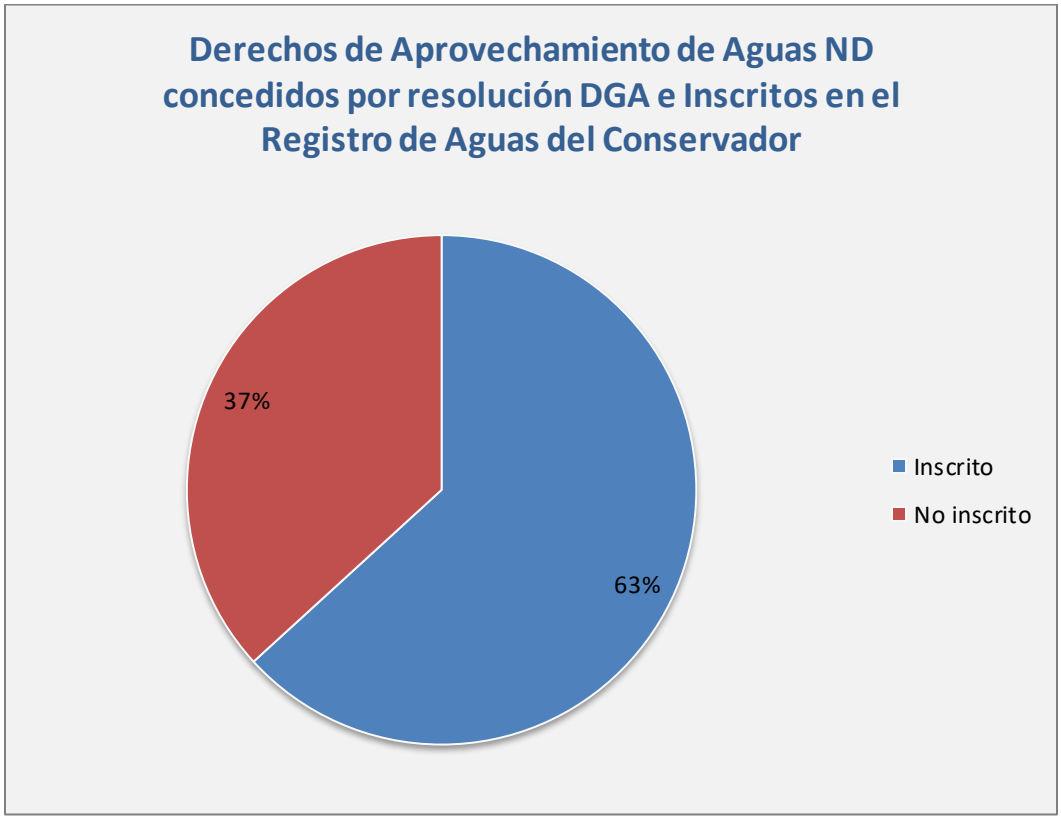


Figura 6.1 Derechos de Aprovechamiento de Aguas ND concedidos por Resolución DGA y su % de inscripción en el Registro de Aguas del Conservador.

B. Expedientes Dirección General de Aguas NR.

Los expedientes NR corresponden a solicitudes de constitución de Derechos de Aprovechamiento de Aguas en virtud de lo señalado en el artículo 2º Transitorio del CA. Revisados estos expedientes tramitados ante la Dirección Regional de Aguas de Arica y Parinacota (DGA), de aquellos solicitados y que luego fueron derivados mediante oficio de la DGA a los tribunales, solo el 37% obtuvo sentencia judicial positiva y fueron debidamente inscrito en el CBR, lo que significa que existe un 63% que se encuentran en distintas instancias procesales en los Juzgados de Letras. El detalle de los NR inscritos y en cada uno de los procesos se presenta en la Tabla 6.3 y en la Tabla 6.4.

En el Anexos III se adjuntan los Expedientes NR enviados a sede judicial y no inscritos, y en otra planilla del Anexo III se muestra el estado en detalle de cada uno de los Expedientes NR, en el que se presentan el número del expediente, los datos del titular, la naturaleza del derecho, los Roles de las causas, y el estado en que se encuentra.

Tabla 6.3 Estado de Regularización de Derechos NR, superficiales y subterráneos. Fuente: elaboración propia.

Derecho de Aprovechamiento	Solicitud presentada	Archivada	Sentencia	Desistida	Tramitación Judicial	Sin Información
Superficial	396	142	103	16	19	116
Subterránea	205	75	63	4	10	53
Sin Información	181	47	20	1	97	16
Total	782	264	186	21	126	185

Tabla 6.4 Regularización de Derechos NR solicitados, derechos inscritos y expedientes encontrados según su naturaleza superficial o subterránea, caudales en l/s, acciones y minutos. Fuente: elaboración propia.

Derecho de Aprovechamiento	Derechos Solicitados				Derechos Inscritos en CBR (planilla)				Expedientes de NR			
	Cantidad	l/s	Acc.	Min.	Cantidad	l/s	Acc.	Min.	Cantidad	l/s	Acc.	Min.
Superficial	316	56.758	1.481	0	197	6.982	56	954	39	4.139	0,2	0
subterránea	177	3.347	0	0	89	1.254	6	0	52	664	0	0
Sin Información	24	1.224	0	0	1	0	0	0	4	28	0	0
Total	517	61.329	1.481	0	287	8.237	62	954	95	4.832	0,2	0

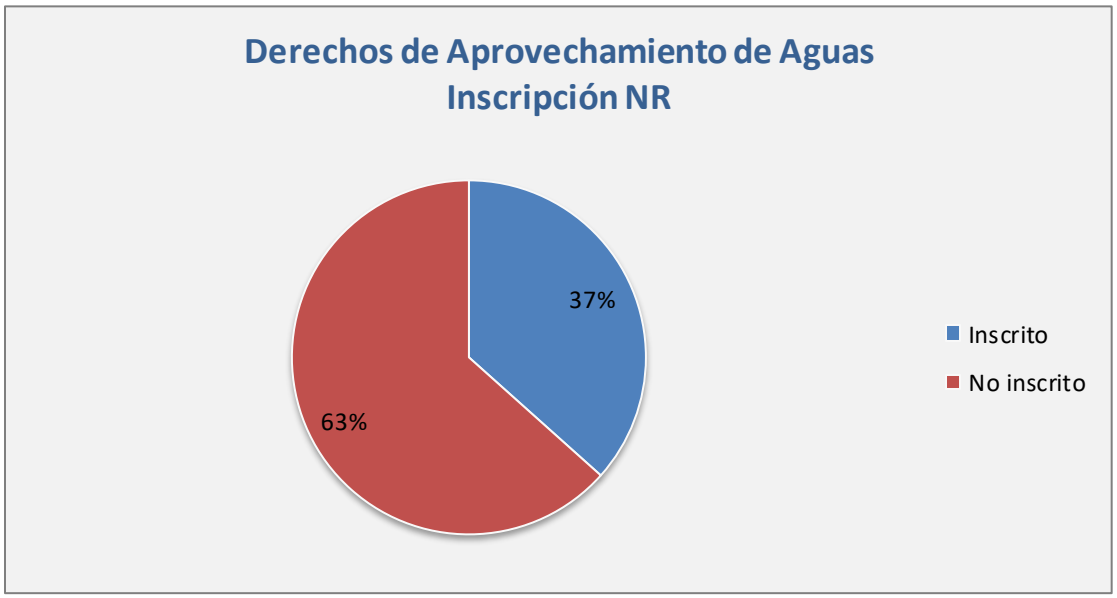


Figura 6.2 Derechos de Aprovechamiento de Aguas NR derivados a Tribunales y su % de inscripción en el Registro de Aguas del Conservador.

En el Anexos III se adjuntan los Expedientes NR constituidos por Resolución DGA y no inscritos en el Registro de Aguas del Conservador, como los NR enviados a sede judicial y no inscritos.

En una revisión posterior a los derechos regularizados (NR), la que incluyó la planilla de las inscripciones en el CBR elaborada en el presente estudio, los expedientes de las demandas de NR, el catalogo público de aguas de la DGA publicado en su página web, con fecha 13 de junio de 2016, y la página web de consulta de causas civiles del poder judicial, se observó que de la totalidad de NR inscritos en la planilla del Anexo III, sólo se cuenta con un 35% de los expedientes, que incluyen el caudal otorgado e inscrito en el CBR y el código NR correspondiente. Estos corresponden al 59% del total de litros por segundo otorgados. La información respecto de acciones y minutos concedidos es casi nula.

Además, se encuentran inscritos en el CBR un total de 7 NR de los que no se conoce la cuenca a la que pertenecen. De estos, se cuenta con el expediente de uno de ellos, lo cual equivale al 14%. Sin embargo, la información en litros por segundo es casi nula respecto de los inscritos. Ninguno de estos NR de cuenca desconocida está medidos en acciones o minutos.

6.1.4 Análisis de la información por cuenca

6.1.4.1 Cuenca Quebrada de La Concordia

Tal como se observa en la Tabla 6.5, ésta contiene la totalidad de los derechos de aprovechamiento de aguas superficiales y subterráneas consuntivos constituidos e inscritos en la cuenca de la Quebrada de La Concordia en virtud de Resoluciones de la DGA, de acuerdo al artículo 140 y siguiente, 4° y 5º Transitorio (ND), mercedes de aguas y otros. Y los constituidos por Resolución Judicial en virtud del artículo 2° Transitorio (NR). En esta cuenca se da la particularidad de que sólo existen derechos subterráneos correspondientes a 100 l/s. De la misma manera en la Tabla 6.5 se señalan que cantidad de derechos corresponden a litros por segundo (l/s), Acciones o Minutos.

Tabla 6.5 Derechos de aprovechamiento de aguas y su distribución en superficiales y subterráneos. Caudales en l/s, acciones y minutos en la cuenca de Quebrada de La Concordia. Fuente: elaboración propia.

Derechos de aprovechamiento cuenca Quebrada de La Concordia	Cantidad	l/s	Acciones	Minutos
Derechos superficiales	0	0	0	0
Derechos subterráneos	4	100	0	0
Total	4	100	0	0

En la Tabla 6.6 se puede ver reflejado como se distribuyen los ND y NR inscritos en derechos superficiales y subterráneos, así mismo la cantidad de caudal constituidos en Litros por segundo, acciones y minutos.

Tabla 6.6 Derechos de aprovechamiento de aguas y su distribución en ND y NR, superficiales y subterráneos. Caudales en l/s, acciones y minutos en la cuenca de la Quebrada de La Concordia. Fuente: elaboración propia.

Derechos de aprovechamiento cuenca quebrada de La Concordia	ND				NR			
	Cantidad	l/s	Acciones	Minutos	Cantidad	l/s	Acciones	Minutos
Derechos superficiales	0	0	0	0	0	0	0	0
Derechos subterráneos	3	92	0	0	1	8	0	0
Total	3	92	0	0	1	8	0	0

La Tabla 6.7 contiene la totalidad de los derechos de aprovechamiento de aguas ND inscritos y como se distribuyen, señalando diferenciadamente los que han sido constituidos de acuerdo al artículo 140 y siguientes; 4° y 5º (ND); mercedes de aguas y otros, así como las resoluciones SAG. Se puede ver reflejado como se distribuyen los ND y así mismo la cantidad de caudal constituidos en litros por segundo.

Tabla 6.7 Derechos de aprovechamiento de aguas ND y su distribución según procedimiento. Caudales en l/s, acciones y minutos en la cuenca de Quebrada de La Concordia. Fuente: elaboración propia.

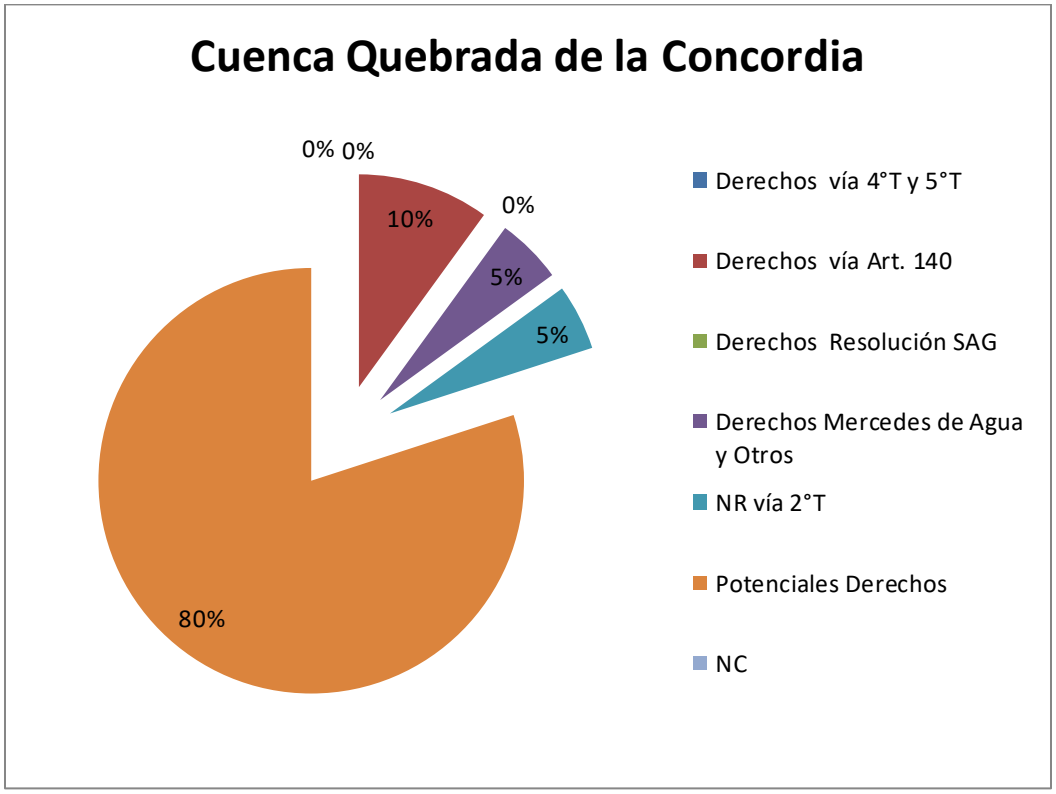
Derechos ND cuenca Quebrada de La Concordia	ND (cantidad)	l/s	Acciones	Minutos
Derechos vía 4°T y 5º	0	0	0	0
Derechos vía Art. 140	2	77	0	0
Derechos Resolución SAG	0	0	0	0
Derechos Mercedes de Agua y Otros	1	15	0	0
Total	3	92	0	0

La Tabla 6.8, además de señalar en detalle los derechos inscritos en el Registro de Aguas del Conservador, muestra la existencia de derechos ND constituidos por Resolución DGA, así como derechos NR que fueron derivados a sede judicial y que no se encuentran inscritos en el Conservador de Bienes Raíces, lo que significa que son "Derechos Potenciales".

En la cuenca no se presentan Comunidades de Aguas, que se rigen por el Artículo 187 y siguientes del CA.

Tabla 6.8 Resumen Derechos de aprovechamiento de aguas ND y su distribución según procedimiento. Caudales en l/s, acciones y minutos en la cuenca de Quebrada de La Concordia y Derechos Potenciales. Fuente: elaboración propia.

Derechos de aprovechamiento cuenca Quebrada de La Concordia	Cantidad	l/s	Acciones	Minutos
Derechos 4° y 5º T	0	0	0	0
Derechos vía Art. 140	2	77	0	0
Derechos Resolución SAG	0	0	0	0
Derechos Mercedes de Agua y Otros	1	15	0	0
NR vía 2ºT	1	8	0	0
Potenciales Derechos	16	No se puede determinar	No se puede determinar	No se puede determinar
NC	0	0	0	0
Total	20	100	0	0



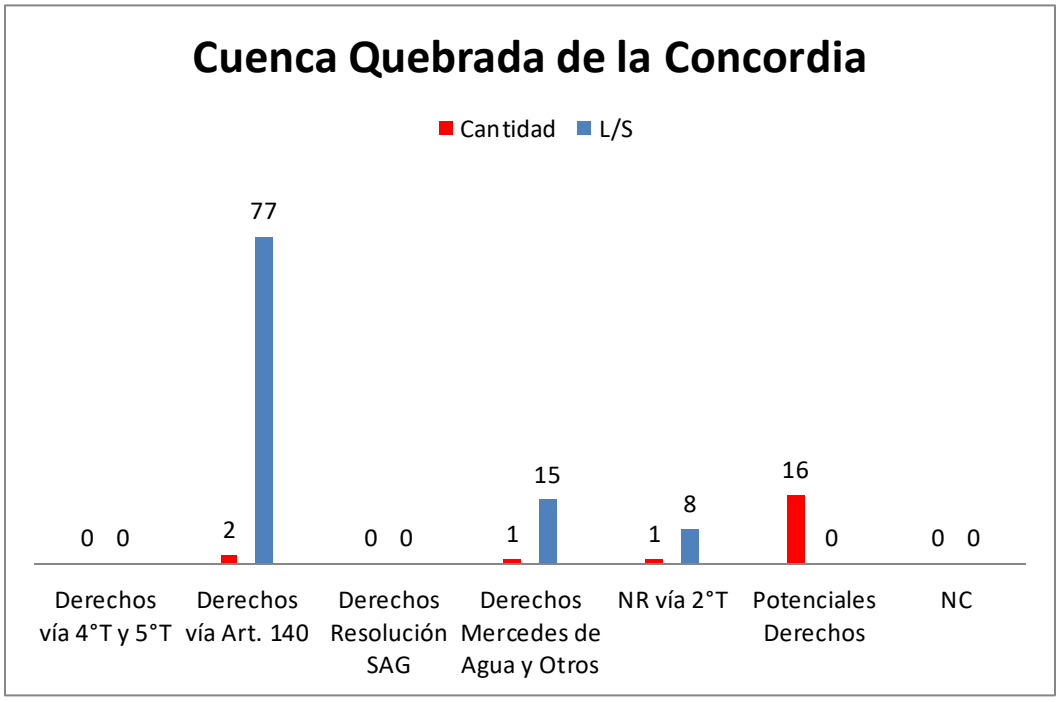


Figura 6.3 Caudales otorgados en la cuenca de la Quebrada de La Concordia. Fuente: elaboración propia.

En la cuenca La Concordia se cuenta con el expediente del único derecho otorgado por regularización, el que corresponde a 8 litros por segundo de naturaleza subterránea. La Tabla 6.9 y la Tabla 6.10 muestran el detalle del estado de la información.

Tabla 6.9 Estado de Regularización de Derechos NR, superficiales y subterráneos en la cuenca de La Concordia. Fuente: elaboración propia.

Cuenca	Derecho de Aprovechamiento	solicitud presentada	archivada	Sentencia	Denegada	Tramitación Judicial	Sin Información
Concordia	Superficial	0	0	0	0	0	0
	subterránea	5	2	1	0	0	2
	Total	5	2	1	0	0	2

Tabla 6.10 Regularización de Derechos NR solicitados, derechos inscritos y expedientes encontrados según su naturaleza superficial o subterránea, caudales en l/s, acciones y minutos en la cuenca de La Concordia. Fuente: elaboración propia.

Derecho de Aprovechamiento	Derechos Solicitados				Derechos Inscritos en el CBR planilla				Expedientes de NR			
	Cantidad	l/s	Acc.	Min.	Cantidad	l/s	Acc.	Min.	Cantidad	l/s	Acc.	Min.
Superficial	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
subterránea	4	285	0	0	1	8	0	0	1	8	0	0
Total	4	285	0	0	1	8	0	0	1	8	0	0

6.1.4.2 Río Lluta

Tal como se observa en la Tabla 6.11, ésta contiene la totalidad de los derechos de aprovechamiento de aguas superficiales y subterráneas consuntivos constituidos e inscritos en la cuenca del Río Lluta en virtud de las Resoluciones de la DGA, de acuerdo al artículo 140 y siguiente, 4° y 5º Transitorio (ND), mercedes de aguas y otros. Y los constituidos por Resolución Judicial en virtud del artículo 2° Transitorio (NR). Del total de éstos, 146 corresponden a derechos superficiales y 30 a derechos subterráneos. De la misma manera en la Tabla 6.11 se señala que cantidad de derechos corresponden a litros por segundo (l/s), Acciones o Minutos.

Tabla 6.11 Derechos de aprovechamiento de aguas y su distribución superficiales y subterráneos. Caudales en l/s, acciones y minutos en la cuenca del Río Lluta. Fuente: elaboración propia.

Derechos de aprovechamiento cuenca Río Lluta	Cantidad	l/s	Acciones	Minutos
Derechos superficiales	146	3.821,8	1.846,59	0
Derechos subterráneos	30	312,68	0	0
Total	176	4.134,48	1.846,59	0

En la Tabla 6.12 se puede ver reflejado como se distribuyen los ND y NR en derechos superficiales y subterráneos, así mismo la cantidad de caudal constituido en litros por segundo, acciones y minutos.

Tabla 6.12 Derechos de aprovechamiento de aguas y su distribución en ND y NR, superficiales y subterráneos. Caudales en l/s, acciones y minutos en la cuenca del Río Lluta. Fuente: elaboración propia.

Derechos de aprovechamiento cuenca Río Lluta	ND				NR			
	Cantidad	l/s	Acciones	Minutos	Cantidad	l/s	Acciones	Minutos
Derechos superficiales	97	3.071,17	1.846,59	0	49	750,63	0	0
Derechos subterráneos	28	293,68	0	0	2	19	0	0
Total	125	3.364,85	1.846,59	0	51	769,63	0	0

La Tabla 6.13 contiene la totalidad de los derechos de aprovechamiento de aguas ND inscritos y como se distribuyen, señalando diferenciadamente los que han sido constituidos de acuerdo al artículo 140 y siguientes; 4° y 5º Transitorio (ND); mercedes de aguas y otros, así como las resoluciones SAG. Se puede ver reflejado como se distribuyen los ND y así mismo la cantidad de caudal otorgado en litros por segundo.

Tabla 6.13 Derechos de aprovechamiento de aguas ND y su distribución según procedimiento. Caudales en l/s, acciones y minutos en la cuenca del Río Lluta. Fuente: elaboración propia.

Derechos de aprovechamiento cuenca Río Lluta	ND (cantidad)	l/s	Acciones	Minutos
Derechos vía 4°T y 5º	7	2,23 (*)	0	0
Derechos vía Art. 140	12	3.254,28	0	0
Derechos Resolución SAG	79	0	1.468,59	0
Derechos Mercedes de Agua y Otros	27	99,41	378	0
Total	125	3.355,93	1.846,59	0

Nota: (*) Caudal instantáneo otorgado por 11,16 l/s, cuyos derechos obtenidos por el 4° Transitorio consideran sólo un 20% del volumen total anual.

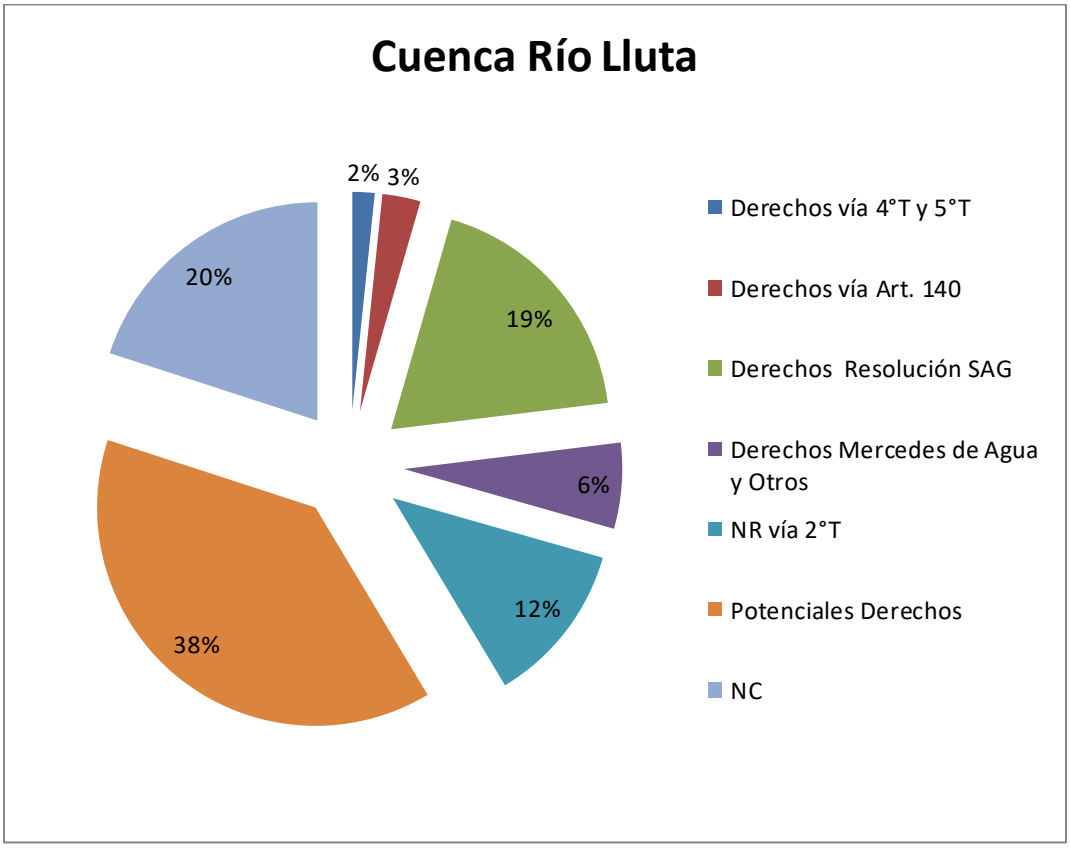
La Tabla 6.14, además de señalar un detalle de los derechos inscritos en el Registro de Aguas del Conservador, muestra la existencia de derechos ND constituidos por Resolución DGA, así como derechos NR que están inscritos en el CBR y de otros que fueron derivados a sede judicial y que no se encuentran inscritos en el CBR, lo que significa que son "Derechos Potenciales".

En la cuenca se presentan 85 Comunidades de Aguas, 15 en Lluta Alto y 70 en Lluta Bajo, que se rigen por el Artículo 187 y siguientes del CA, las que se describen en el punto 6.1.7 y cuyos caudales en litros por segundo o acciones o minutos se presentan en la Tabla 6.14.

Tabla 6.14 Resumen Derechos de aprovechamiento de aguas ND y su distribución según procedimiento. Caudales en l/s, acciones y minutos en la cuenca del Río Lluta y Derechos Potenciales. Fuente: elaboración propia.

Derechos de aprovechamiento cuenca Río Lluta	Cantidad	l/s	Acciones	Minutos
Derechos vía 4°T y 5°T	7	2,23 (*)	0	0
Derechos vía Art. 140	12	3.254,28	0	0
Derechos por Resolución SAG	79	0	1.468,59	0
Derechos Mercedes de Agua y Otros	27	99,41	378	0
NR vía 2º T	51	769,63	0	0
Potenciales Derechos	164	No se puede determinar	No se puede determinar	No se puede determinar
NC	85	5.114	39,3	
Total	425	9.239,55	1.855,89	0

Nota: (*) Caudal instantáneo otorgado por 11,16 l/s, cuyos derechos obtenidos por el 4° Transitorio consideran sólo un 20% del volumen total anual.



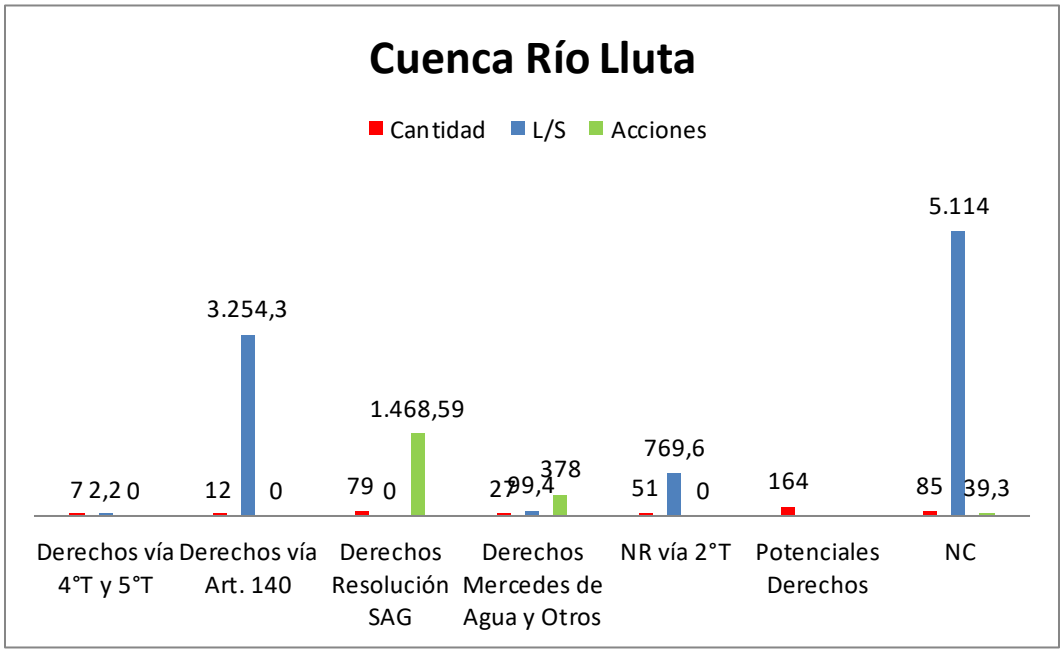


Figura 6.4 Caudales otorgados en la cuenca del Río Lluta. Fuente: elaboración propia.

Para la cuenca del río Lluta se cuenta con el 31% de los expedientes de los NR, cuyo caudal corresponde a un 82% de los litros por segundo otorgados. Esta cuenca no cuenta con acciones o minutos otorgados por regularización. LaTabla 6.15 muestra el estado en los que se encuentran los derechos de regularización solicitados en la cuenca del río Lluta. La Tabla 6.16 muestra los derechos solicitados, los inscritos en el CBR y de los cuales se tiene el expediente.

Tabla 6.15 Estado de Regularización de Derechos NR, superficiales y subterráneos en la cuenca del río Lluta. Fuente: elaboración propia.

Cuenca	Derecho de Aprovechamiento	solicitud presentada	archivada	Sentencia	Denegada	Tramitación Judicial	Sin Información
Lluta	Superficial	96	48	20	1	2	25
	subterránea	11	4	1	1	1	4
	Sin información	4	0	3	0	0	1
	Total	111	52	24	2	3	30

Tabla 6.16 Regularización de Derechos NR solicitados, derechos inscritos y expedientes encontrados según su naturaleza superficial o subterránea, caudales en l/s, acciones y minutos en la cuenca del río Lluta. Fuente: elaboración propia.

Derecho de Aprovechamiento	Derechos Solicitados				Derechos Inscritos en el CBR planilla				Expedientes de NR			
	Cantidad	l/s	Acc.	Min.	Cantidad	l/s	Acc.	Min.	Cantidad	l/s	Acc.	Min.
Superficial	67	1.613,065	1.475,5	0	44	753,19	0	0	10	594,63	0	0
subterránea	11	155,62	0	0	1	0,25	0	0	1	0,25	0	0
Sin información	4	29,21	0	0	0	0	0	0	3	20,3	0	0
Total	82	1.797,895	1.475,5	0	45	753,44	0	0	15	615,18	0	0

6.1.4.3 Río San José

Tal como se observa en la Tabla 6.17, ésta contiene la totalidad de los derechos de aprovechamiento de aguas superficiales y subterráneas consuntivos constituidos e inscritos en la cuenca del Río San José en virtud de las Resoluciones de la DGA, de acuerdo al artículo 140 y siguiente, 4° y 5º Transitorio (ND), mercedes de aguas y otros. Y los constituidos por Resolución Judicial en virtud del artículo 2° Transitorio (NR). Del total de éstos, 52 corresponden a derechos superficiales y 218 a derechos subterráneos. De la misma manera en la Tabla 6.17 se señalan que cantidad de derechos corresponden a litros por segundo (l/s), Acciones o Minutos.

Tabla 6.17 Derechos de aprovechamiento de aguas y su distribución en superficiales y subterráneos. Caudales en l/s, acciones y minutos en la cuenca del Río San José. Fuente: elaboración propia.

Derechos de aprovechamiento cuenca Río San José	Cantidad	l/s	Acciones	Minutos
Derechos superficiales	52	1.647,34	7	0
Derechos subterráneos	218	2.190,3	6	0
Total	270	3.837,64	13	0

En la Tabla 6.18 se ve reflejado como se distribuyen los ND y NR en derechos superficiales y subterráneos, así mismo la cantidad de caudal constituido en litros por segundo, acciones y minutos.

Tabla 6.18 Derechos de aprovechamiento de aguas y su distribución en ND y NR, superficiales y subterráneos. Caudales en l/s, acciones y minutos en la cuenca del Río San José. Fuente: elaboración propia.

Derechos de aprovechamiento cuenca Río San José	ND				NR			
	Cantidad	l/s	Acciones	Minutos	Cantidad	l/s	Acciones	Minutos
Derechos superficiales	21	784,20	0	0	30	873,3315	7	0
Derechos subterráneos	160	1.197,99	0	0	70	1.204,848	6	
Total	181	1.982,19	0	0	100	2.078,18	13	0

La Tabla 6.19 contiene la totalidad de los derechos de aprovechamiento de aguas ND inscritos y como se distribuyen, señalando diferenciadamente los que han sido constituidos de acuerdo al artículo 140 y siguientes; 4° y 5º Transitorio (ND); mercedes de aguas y otros, así como las resoluciones SAG. Se puede ver reflejado como se distribuyen los ND y así mismo la cantidad de caudal constituido en litros por segundo, acciones y minutos.

Tabla 6.19 Derechos de aprovechamiento de aguas ND y su distribución según procedimiento. Caudales en l/s, acciones y minutos en la cuenca del Río San José. Fuente: elaboración propia.

Derechos de aprovechamiento cuenca Río San José	ND (cantidad)	l/s	Acciones	Minutos
Derechos vía 4°T y 5º	116	70,2 (*)	0	0
Derechos vía Art. 140	16	845,14	0	0
Derechos Resolución SAG	0	0	0	0
Derechos Mercedes de Agua y Otros	49	786,03	0	0
Total	181	1.701,37	0	0

Nota: (*) Caudal instantáneo otorgado por 351,02 l/s, cuyos derechos obtenidos por el 4° Transitorio consideran sólo un 20% del volumen total anual.

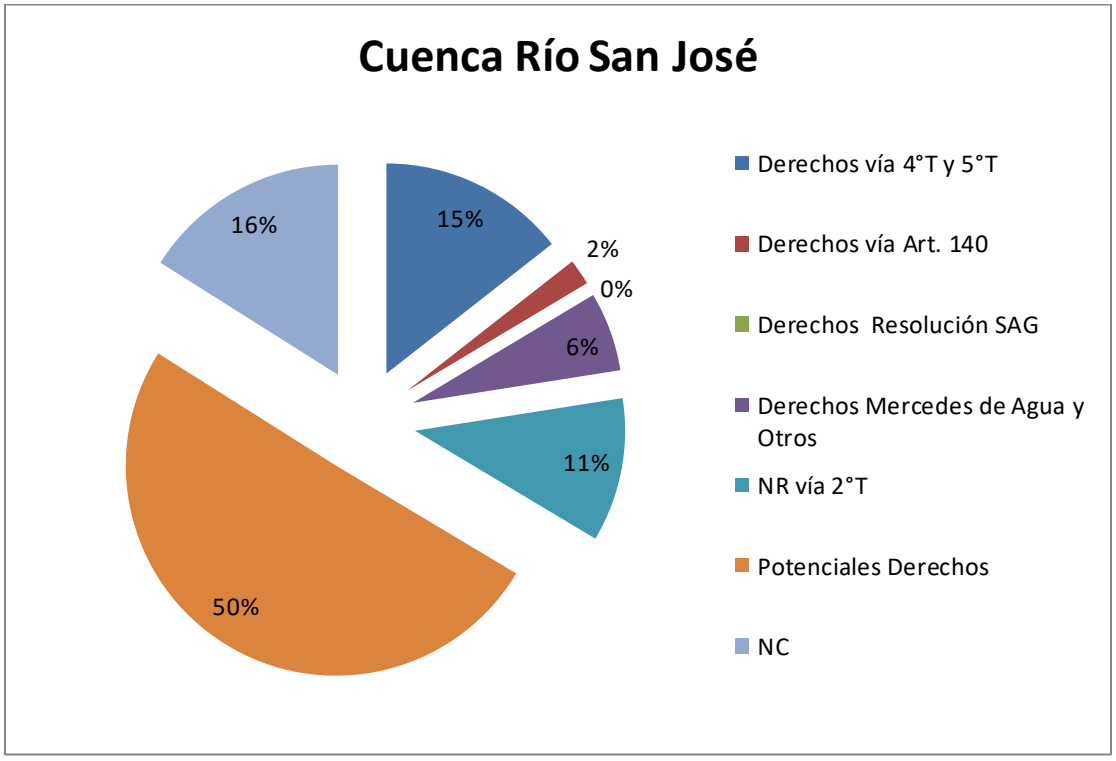
La Tabla 6.20, además de señalar en detalle los derechos inscritos en el Registro de Aguas del Conservador, muestra la existencia de derechos ND constituidos por Resolución DGA, así como derechos NR que están inscritos en el CBR y de otros que fueron derivados a sede judicial y que no se encuentran inscritos en el Conservador de Bienes Raíces, lo que significa que son "Derechos Potenciales".

En la cuenca se presentan 129 Comunidades de Aguas, 123 en Azapa Alto y 6 en San José, que se rigen por el Artículo 187 y siguientes del CA, las que se describen en el punto 6.1.7 y cuyos caudales en litros por segundo o acciones o minutos se presentan en la Tabla 6.20.

Tabla 6.20 Resumen Derechos de aprovechamiento de aguas ND y su distribución según procedimiento. Caudales en l/s, acciones y minutos en la cuenca del Río San José y Derechos Potenciales. Fuente elaboración propia.

Derechos de aprovechamiento cuenca Río San José	Cantidad	l/s	Acciones	Horas
Derechos vía 4°T y 5°T	116	70,20 (*)	0	0
Derechos vía Art. 140	16	845,14	0	0
Derechos Resolución SAG	0	0	0	0
Derechos Mercedes de Agua y Otros	49	786,03	0	0
NR vía 2º T	100	2.078,18	13	0
Potenciales Derechos	405	No se puede determinar	No se puede determinar	No se puede determinar
NC	129	170	504	205,3
Total	804	3.726,82	517	205,3

Nota: (*) Caudal instantáneo otorgado por 351,02 l/s, cuyos derechos obtenidos por el 4° Transitorio consideran sólo un 20% del volumen total anual.



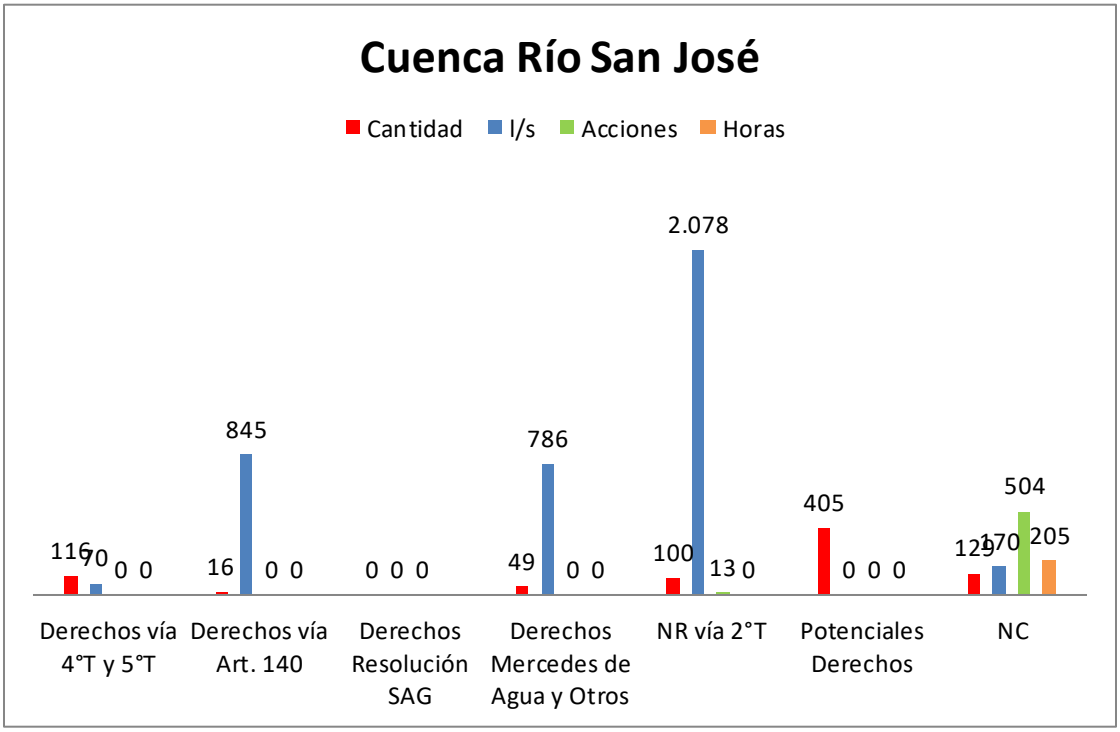


Figura 6.5 Caudales otorgados en la cuenca del Río San José. Fuente: elaboración propia.

Para la cuenca del río San José, se cuenta con el 44% de los expedientes de los NR inscritos en el CBR. Estos corresponden a un 75% de los litros por segundo y a un 2% de las acciones otorgadas por regularización. La cuenca no cuenta con derechos otorgados por regularización medidos en minutos. La Tabla 6.21 y la Tabla 6.22 muestran el estado de los derechos NR en la cuenca del río San José.

Tabla 6.21 Estado de Regularización de Derechos NR, superficiales y subterráneos en la cuenca del río San José. Fuente: elaboración propia.

Cuenca	Derecho de Aprovechamiento	solicitud presentada	archivada	Sentencia	Denegada	Tramitación Judicial	Sin Información
Río San José	Superficial	52	12	4	9	0	27
	subterránea	152	69	46	2	9	26
	Sin Información	9	1	1	1	0	6
	Total	213	82	51	12	9	59

Tabla 6.22 Regularización de Derechos NR solicitados, derechos inscritos y expedientes encontrados según su naturaleza superficial o subterránea, caudales en l/s, acciones y minutos en la cuenca del río San José. Fuente: elaboración propia.

Derecho de Aprovechamiento	Derechos Solicitados				Derechos Inscritos en el CBR planilla				Expedientes de NR			
	Cantidad	l/s	Acc.	Min.	Cantidad	l/s	Acc.	Min.	Cantidad	l/s	Acc.	Min.
Superficial	47	48.776,25	4,49	0	30	873,3315	7	0	8	921,45	0,2	0
subterránea	132	2.859,93	0	0	70	1.204,848	6	0	36	632,78	0	0
Sin Información	8	1.065,31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	187	52.701,49	4,49	0	100	2.078,18	13	0	44	1.554,23	0,2	0

6.1.4.4 Costeras Río San José-Quebrada Camarones

Tal como se observa en la Tabla 6.23, ésta contiene la totalidad de los derechos de aprovechamiento de aguas superficiales y subterráneas consuntivos constituidos e inscritos en la cuenca Costeras Río San José-Quebrada Camarones en virtud de Resoluciones de la DGA, de acuerdo al artículo 140 y siguiente, 4° y 5º Transitorio (ND), mercedes de aguas y otros. Y los constituidos por Resolución Judicial en virtud del artículo 2° Transitorio (NR). Del total de éstos, 157 corresponden a derechos superficiales y 54 a derechos subterráneos. De la misma manera en la Tabla 6.23 se señalan que cantidad de derechos corresponden a litros por segundo (l/s), Acciones o Minutos.

Tabla 6.23 Derechos de aprovechamiento de aguas y su distribución en superficiales y subterráneos. Caudales en l/s, acciones y minutos en la cuenca Costeras R. San José-Q. Camarones. Fuente: elaboración propia.

Derechos de aprovechamiento Cuenca Costeras R. San José-Q. Camarones	Cantidad	l/s	Acciones	Minutos
Derechos superficiales	157	192,29	13.569,9	0
Derechos subterráneos	55	439,42	0	0
Total	212	631,71	13.569,9	0

En la Tabla 6.24 se ve reflejado como se distribuyen los ND y NR en derechos superficiales y subterráneos, así mismo la cantidad de caudal constituido en litros por segundo, acciones y minutos.

Tabla 6.24 Derechos de aprovechamiento de aguas y su distribución en ND y NR, superficiales y subterráneos. Caudales en l/s, acciones y minutos en la cuenca Costeras R. San José-Q. Camarones. Fuente: elaboración propia.

Derechos de aprovechamiento cuenca Costeras	ND				NR			
	Cantidad	l/s	Acciones	Minutos	Cantidad	l/s	Acciones	Minutos
Derechos superficiales	129	2,07	13.569,9	0	28	190,22	30	0
Derechos subterráneos	43	414,71	0	0	12	24,71	0	0
Total	172	416,78	13.569,9	0	40	214,93	30	0

La Tabla 6.25 contiene la totalidad de los derechos de aprovechamiento de aguas ND inscritos y como se distribuyen, señalando diferenciadamente los que han sido constituidos de acuerdo al artículo 140 y siguientes; 4° y 5º Transitorio (ND); mercedes de aguas y otros, así como las resoluciones SAG. Se puede ver reflejado como se distribuyen los ND y así mismo la cantidad de caudal constituido en litros por segundo y acciones.

Tabla 6.25 Derechos de aprovechamiento de aguas ND y su distribución según procedimiento. Caudales en l/s, acciones y minutos en la cuenca Costeras R. San José-Q. Camarones. Fuente: elaboración propia.

Derechos de aprovechamiento cuenca Costeras	ND (cantidad)	l/s	Acciones	Minutos
Derechos vía 4° Y 5ºT	26	6,05 (*)	0	0
Derechos vía Art. 140	3	340,81	0	0
Derechos por Resolución SAG	0	0	0	0
Derechos Mercedes de Agua y Otros	143	45,73	13.569,9	0
Total	172	392,59	13.569,9	0

Nota: (*) Caudal instantáneo otorgado por 30,24 l/s, cuyos derechos obtenidos por el 4° Transitorio consideran sólo un 20% del volumen total anual.

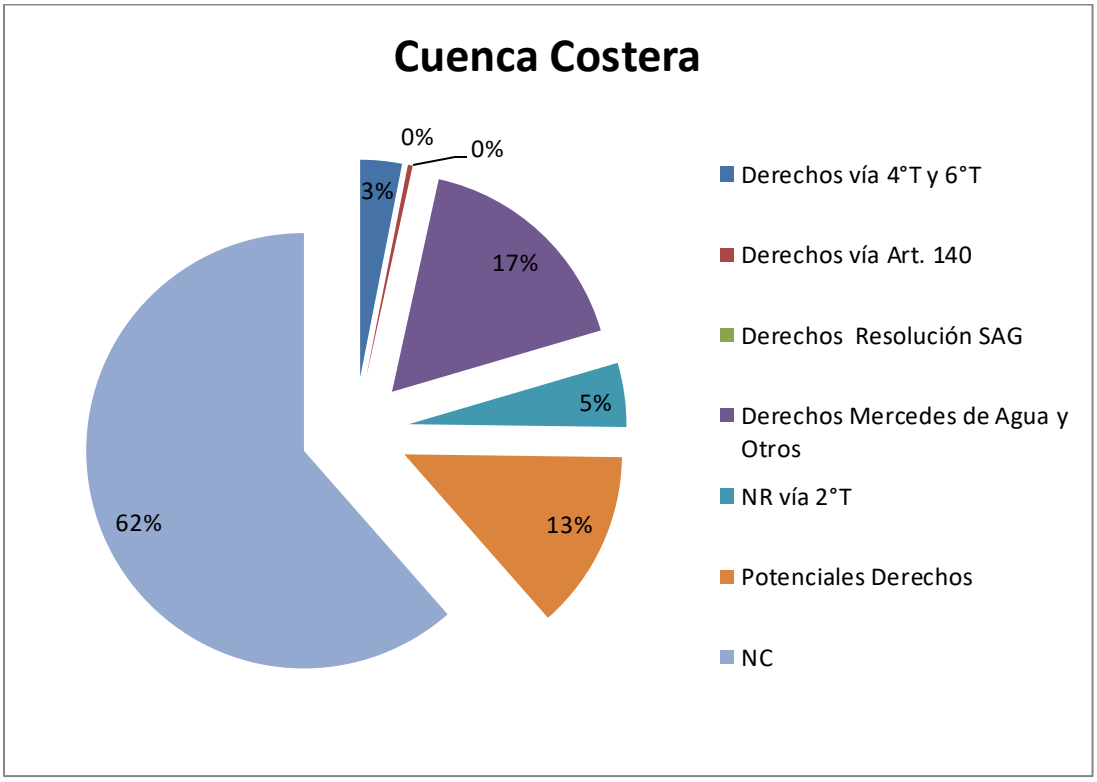
La Tabla 6.26 además de señalar un detalle de los derechos inscritos en el Registro de Aguas del Conservador, muestra la existencia de derechos ND constituidos por Resolución DGA, así como derechos NR que están inscritos en el CBR y de otros que fueron derivados a sede judicial y que no se encuentran inscritos en el Conservador de Bienes Raíces, lo que significa que son "Derechos Potenciales".

En la cuenca se presentan 517 Comunidades de Aguas que se rigen por el Artículo 187 y siguientes del CA, las que se describen en el punto 6.1.7 y cuyos caudales en litros por segundo o acciones o minutos se presentan en la Tabla 6.26.

Tabla 6.26 Resumen Derechos de aprovechamiento de aguas ND y su distribución según procedimiento. Caudales en l/s, acciones y minutos cuenca Costeras R. San José-Q. Camarones y Derechos Potenciales. Fuente: elaboración propia.

Derechos de aprovechamiento cuenca Costeras	Cantidad	l/s	Acciones	Minutos
Derechos vía 4° y 5ºT	26	6,05 (*)	0	0
Derechos vía Art. 140	3	340,81	0	0
Derechos Resolución SAG	0	0	0	0
Derechos Mercedes de Agua y otros	143	45,73	13.569,9	0
NR vía 2º T	40	214,57	30	0
Potenciales Derechos.	112	No se puede determinar	No se puede determinar	No se puede determinar
NC	517	2.295	0	0
Total	841	2.902,16	13.569,9	0

Nota: (*) Caudal instantáneo otorgado por 30,24 l/s, cuyos derechos obtenidos por el 4° Transitorio consideran sólo un 20% del volumen total anual.



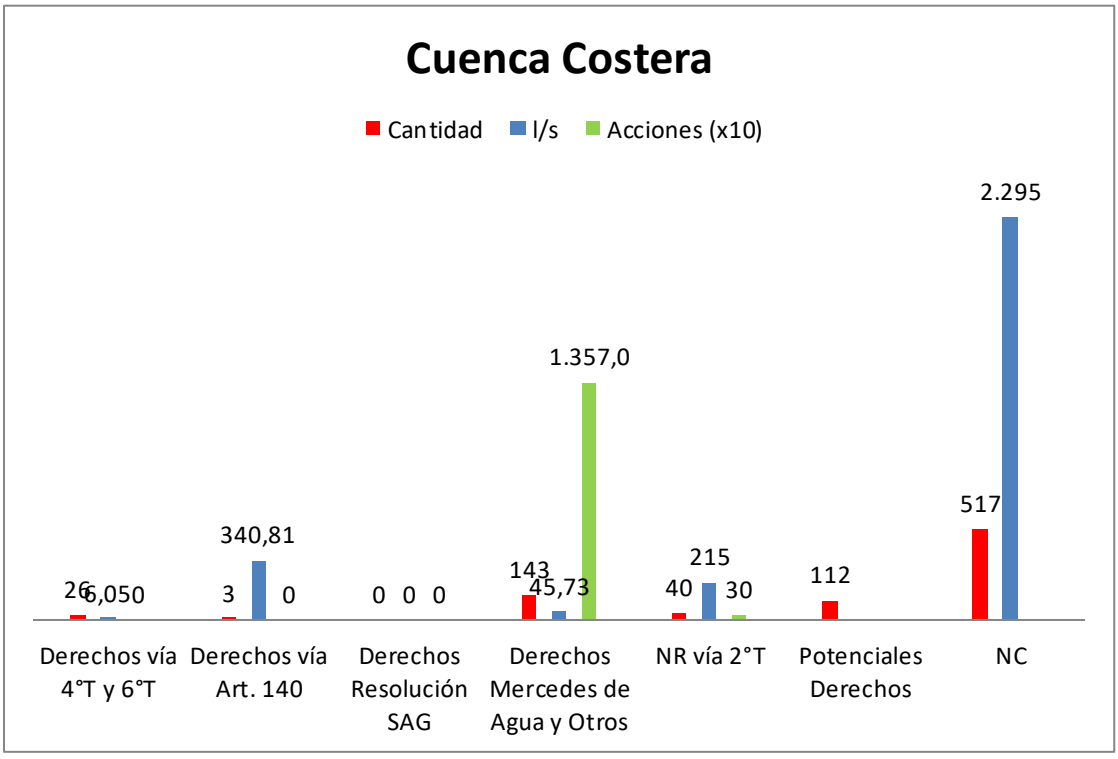


Figura 6.6 Caudales otorgados en la cuenca Costeras R. San José-Q. Camarones. Fuente: elaboración propia.

La cuencas costeras que se encuentran entre el río San José y la quebrada Camarones, entre las que se cuenta la cuenca de la quebrada Vítor, se cuenta con un 49% de los expedientes de los NR inscritos en el CBR. Estos corresponden a un 62% del total de litros por segundo inscritos. No se cuenta con el expediente del derecho inscrito en acciones. En estas cuencas no hay caudales en minutos otorgados por regularización. La Tabla 6.27 y la Tabla 6.28 entregan información respecto del estado de los derechos NR en las cuencas costeras San José-Camarones.

Tabla 6.27 Estado de Regularización de Derechos NR, superficiales y subterráneos en las cuencas costeras San José-Camarones. Fuente: elaboración propia.

Cuenca	Derecho de Aprovechamiento	solicitud presentada	archivada	Sentencia	Denegada	Tramitación Judicial	Sin Información
Costeras San José-Camarones	Superficial	42	20	8	1	1	12
	subterránea	37	0	15	1	0	21
	Total	79	20	23	2	1	33

Tabla 6.28 Regularización de Derechos NR solicitados, derechos inscritos y expedientes encontrados según su naturaleza superficial o subterránea, caudales en l/s, acciones y minutos en las cuencas costeras San José-Camarones. Fuente: elaboración propia.

Derecho de Aprovechamiento	Derechos Solicitados				Derechos Inscritos en el CBR planilla				Expedientes de NR			
	Cantidad	l/s	Acc.	Min.	Cantidad	l/s	Acc.	Min.	Cantidad	l/s	Acc.	Min.
Superficial	23	301,937	0	0	25	165,7434	30	0	5	96,233	0	0
subterránea	30	46,7303	0	0	14	26,63	0	0	14	22,974	0	0
Total	53	348,6673	0	0	39	192,3734	30	0	19	119,207	0	0

6.1.4.5 Cuenca Río Camarones

Tal como se observa en la Tabla 6.29, ésta contiene la totalidad de los derechos de aprovechamiento de aguas superficiales y subterráneas consuntivos constituidos e inscritos en la cuenca del Río Camarones en virtud de las Resoluciones de la DGA, de acuerdo al artículo 140 y siguiente, 4° y 5º Transitorio (ND), mercedes de aguas y otros. Y los constituidos por Resolución Judicial en virtud del artículo 2° Transitorio (NR). Del total de éstos, 98 corresponden a derechos superficiales y 17 a derechos subterráneos. De la misma manera en la Tabla 6.29 se señalan que cantidad de derechos corresponden a litros por segundo (l/s), Acciones o Minutos.

Tabla 6.29 Derechos de aprovechamiento de aguas y su distribución en superficiales y subterráneos. Caudales en l/s, acciones y minutos en la cuenca del Río Camarones. Fuente: elaboración propia.

Derechos de aprovechamiento cuenca Río Camarones	Cantidad	l/s	Acciones	Minutos
Derechos superficiales	98	528,84	1.690,24	954
Derechos subterráneos	17	91	0	0
Total	115	619,84	1.690,24	954

En la Tabla 6.30 se ve reflejado como se distribuyen los ND y NR en derechos superficiales y subterráneos, así mismo la cantidad de caudal constituido en litros por segundo, acciones y minutos.

Tabla 6.30 Derechos de aprovechamiento de aguas y su distribución en ND y NR, superficiales y subterráneos. Caudales en l/s, acciones y minutos en la cuenca del Río Camarones. Fuente: elaboración propia.

Derechos de aprovechamiento Río Camarones	ND				NR			
	Cantidad	l/s	Acciones	Minutos	Cantidad	l/s	Acciones	Minutos
Derechos superficiales	61	29,93	1.690,24	0	31	527,2837	0	954
Derechos subterráneos	17	91	0	0	0	0	0	0
Total	78	120,93	1.690,24	0	31	527,2837	0	954

La Tabla 6.31 contiene la totalidad de los derechos de aprovechamiento de aguas ND inscritos y como se distribuyen, señalando diferenciadamente los que han sido constituidos de acuerdo al artículo 140 y siguientes; 4° y 5º Transitorio (ND); mercedes de aguas y otros, así como las resoluciones SAG. Se puede ver reflejado como se distribuyen los ND y así mismo la cantidad de caudal constituidos en litros por segundo.

Tabla 6.31 Derechos de aprovechamiento de aguas ND y su distribución según procedimiento. Caudales en l/s, acciones y minutos en la cuenca del Río Camarones. Fuente: elaboración propia.

Derechos de aprovechamiento cuenca Río Camarones	ND (cantidad)	l/s	Acciones	Minutos
Derechos Otorgados vía 4° y 5ºT	3	7,6 (*)	1.124,84	0
Derechos Otorgados vía Art. 140	5	34,93	0	0
Derechos Otorgados por Resolución SAG	15	48	0	0
Derechos Otorgados Mercedes de Agua y Otros	55	0	565,4	0
Total	78	90,53	1.690,24	0

Nota: (*) Caudal instantáneo otorgado por 38,0 l/s, cuyos derechos obtenidos por el 4° Transitorio consideran sólo un 20% del volumen total anual.

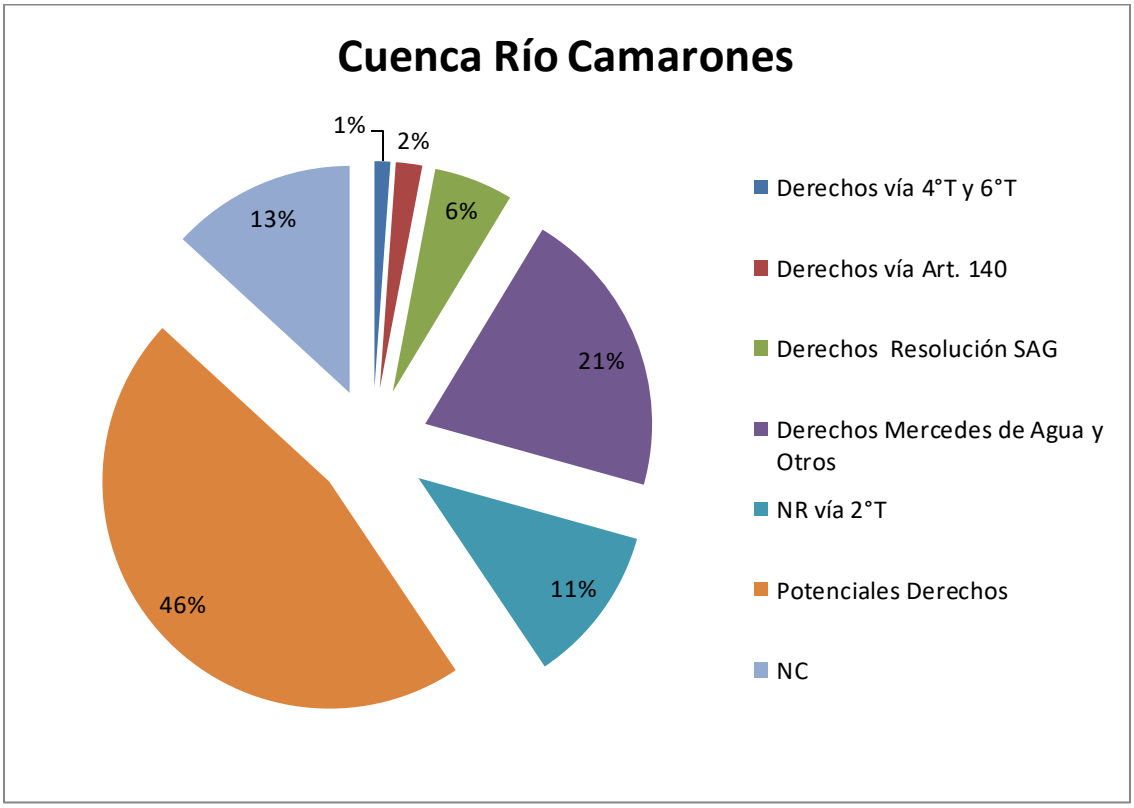
La Tabla 6.32, además de señalar un detalle de los derechos inscritos en el Registro de Aguas del Conservador, muestra la existencia de derechos ND constituidos por Resolución DGA, así como derechos NR que están inscritos en el CBR y de otros que fueron derivados a sede judicial y que no se encuentran inscritos en el CBR, lo que significa que son "Derechos Potenciales".

En la cuenca se presentan 35 Comunidades de Aguas que se rigen por el Artículo 187 y siguientes del CA, las que se describen en el punto 6.1.7 y cuyos caudales en litros por segundo o acciones o minutos se presentan en la Tabla 6.32.

Tabla 6.32 Resumen Derechos de aprovechamiento de aguas ND y su distribución según procedimiento. Caudales en l/s, acciones y minutos en la cuenca del Río Camarones y Derechos Potenciales. Fuente: elaboración propia.

Derechos de aprovechamiento cuenca Río Camarones	Cantidad	l/s	Acciones	Minutos
Derechos Otorgados vía 4°T	3	7,6 (*)	1.124,84	0
Derechos Otorgados vía Art. 140	5	34,93	0	0
Derechos Otorgados por Resolución SAG	15	48	0	0
Derechos Otorgados Mercedes de Agua y Otros	55	0	565,4	0
NR vía 2º T	31	527,2837	0	954
Potenciales Derechos	123	No se puede determinar	No se puede determinar	No se puede determinar
NC	35	1.445,86	0	0
Total	266	2.034,41	1.690,24	954

Nota: (*) Caudal instantáneo otorgado por 38,0 l/s, cuyos derechos obtenidos por el 4° Transitorio consideran sólo un 20% del volumen total anual.



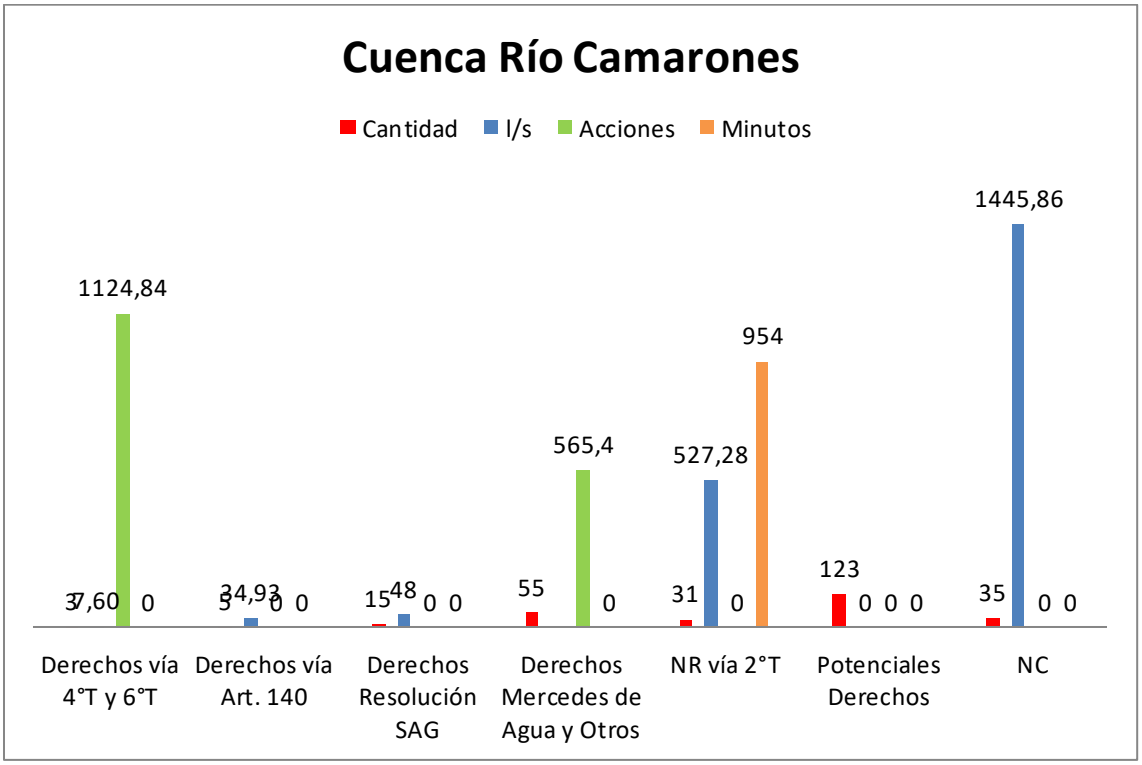


Figura 6.7 Caudales otorgados en la cuenca de la Q. del Río Camarones. Fuente: elaboración propia.

Para la cuenca de la quebrada de Camarones, se cuenta con el 23% de los expedientes del total de NR de la cuenca. De estos, se tienen un 5% de los litros por segundo otorgados e inscritos. En esta cuenca no se entregaron acciones, pero si se otorgaron un total de 954 minutos, de los cuales no se cuenta con el expediente correspondiente. Las Tabla 6.33 y Tabla 6.34 muestran el estado de los derechos NR en la cuenca de la quebrada camarones.

Tabla 6.33 Estado de Regularización de Derechos NR, superficiales y subterráneos en la cuenca de la quebrada Camarones. Fuente: elaboración propia.

Cuenca	Derecho de Aprovechamiento	solicitud presentada	archivada	Sentencia	Denegada	Tramitación Judicial	Sin Información
Q. Camarones	Superficial	89	30	27	5	3	24
	subterránea	0	0	0	0	0	0
	Total	89	30	27	5	3	24

Tabla 6.34 Regularización de Derechos NR solicitados, derechos inscritos y expedientes encontrados según su naturaleza superficial o subterránea, caudales en l/s, acciones y minutos en la cuenca de la quebrada Camarones. Fuente: elaboración propia.

Derecho de Aprovechamiento	Derechos Solicitados				Derechos Inscritos en el CBR planilla				Expedientes de NR			
	Cantidad	l/s	Acc.	Min.	Cantidad	l/s	Acc.	Min.	Cantidad	l/s	Acc.	Min.
Superficial	74	868,91	0	0	31	527,28	0	954	7	27,94	0	0
subterránea	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	74	868,91	0	0	31	527,28	0	954	7	27,94	0	0

6.1.4.6 Altiplánicas

Tal como se observa en la Tabla 6.35, ésta contiene la totalidad de los derechos de aprovechamiento de aguas superficiales y subterráneas consuntivos constituidos e inscritos en las cuencas Altiplánicas en virtud de Resoluciones de la DGA, de acuerdo al artículo 140 y siguiente, 4° y 5º Transitorio (ND), mercedes de aguas y otros. Y los constituidos por Resolución Judicial en virtud del artículo 2° Transitorio (NR). Del total de éstos, 104 corresponden a derechos superficiales y 3 a derechos subterráneos. De la misma manera, en la Tabla 6.35 se señalan que cantidad de derechos corresponden a litros por segundo (l/s), acciones o minutos.

Tabla 6.35 Derechos de aprovechamiento originarios y su distribución en superficiales y subterráneos. Caudal en l/s, acciones y minutos en las cuencas Altiplánicas. Fuente: elaboración propia.

Derechos de aprovechamiento cuencas Altiplánicas	Cantidad	l/s	Acciones	Minutos
Derechos superficiales	104	2.809,98	0	0
Derechos subterráneos	3	76	0	0
Total	106	2.885,98	0	0

En la Tabla 6.36 se ve reflejado como se distribuyen los ND y NR en derechos superficiales y subterráneos, así mismo la cantidad de caudal constituido en litros por segundo, acciones y minutos.

Tabla 6.36 Derechos de aprovechamiento de aguas y su distribución en ND y NR, superficiales y subterráneos. Caudales en l/s, acciones y minutos en las cuencas Altiplánicas. Fuente: elaboración propia.

Derechos de aprovechamiento cuencas Altiplánicas	ND				NR			
	Cantidad	l/s	Acciones	Minutos	Cantidad	l/s	Acciones	Minutos
Derechos superficiales	41	1.217,97	0	0	63	3.038,672	19,01	0
Derechos subterráneos	3	76	0	0	0	0	0	0
Total	44	1.293,97	0	0	63	1.592,01	0	0

La Tabla 6.37 contiene la totalidad de los derechos de aprovechamiento de aguas ND inscritos y como se distribuyen, señalando diferenciadamente los que han sido constituidos de acuerdo al artículo 140 y siguientes; 4° y 5º Transitorio (ND); mercedes de aguas y otros, así como las resoluciones SAG. Se puede ver reflejado como se distribuyen los ND y así mismo la cantidad de caudal constituido en litros por segundo (l/s), acciones o minutos.

Tabla 6.37 Derechos de aprovechamiento de aguas ND y su distribución según procedimiento. Caudales en l/s, acciones y minutos en las cuencas Altiplánicas. Fuente: elaboración propia.

Derechos de aprovechamiento cuencas Altiplánicas	ND (cantidad)	l/s	Acciones	Minutos
Derechos vía 4° y 5ºT	3	13,6 (*)	0,4 (*)	0
Derechos vía Art. 140	0	0	0	0
Derechos Resolución SAG	0	0	0	0
Derechos Otorgados Mercedes de Agua y Otros	41	93,37	128,89	0
Total	44	106,97	129,29	0

Nota: (*) Caudal instantáneo otorgado por 68,0 l/s, cuyos derechos obtenidos por el 4° Transitorio consideran sólo un 20% del volumen total anual.

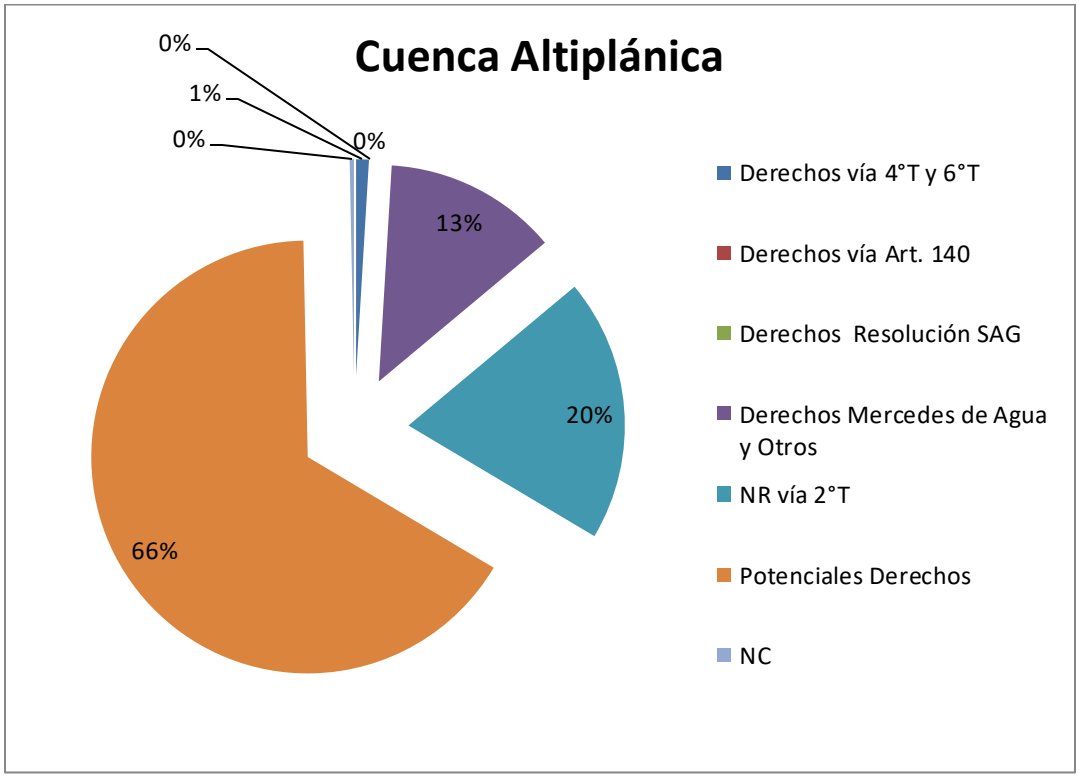
La Tabla 6.38, además de señalar un detalle de los derechos inscritos en el Registro de Aguas del Conservador, muestra la existencia de derechos ND constituidos por Resolución DGA, así como derechos NR que están inscritos en el CBR y de otros que fueron derivados a sede judicial y que no se encuentran inscritos en el Conservador de Bienes Raíces, lo que significa que son "Derechos Potenciales".

En la cuenca se presenta 1 Comunidad de Agua, la cual no se ubica en la cuenca, y que se rige por el Artículo 187 y siguientes del CA, las que se describen en el punto 6.1.7 y cuyo caudal en litros por segundo y acciones se presentan en la Tabla 6.38.

Tabla 6.38 Resumen Derechos de aprovechamiento de aguas ND y su distribución según procedimiento. Caudales en l/s, acciones y minutos en las cuencas Altiplánicas y Derechos Potenciales. Fuente: elaboración propia.

Derechos de aprovechamiento cuencas Altiplánicas	Cantidad	l/s	Acciones	Minutos
Derechos vía 4° y 5ºT	3	13,6 (*)	0,40 (*)	0
Derechos vía Art. 140	0	0	0	0
Derechos Resolución SAG	0	0	0	0
Derechos Mercedes de Agua y Otros	41	93,37	128,89	0
NR vía 2ºT	63	3.038,672	19,01	0
Potenciales Derechos	209	No se puede determinar	No se puede determinar	No se puede determinar
Total	315	1.698,98	133,49	0

Nota: (*) Caudal instantáneo otorgado por 68,0 l/s, cuyos derechos obtenidos por el 4° Transitorio consideran sólo un 20% del volumen total anual.



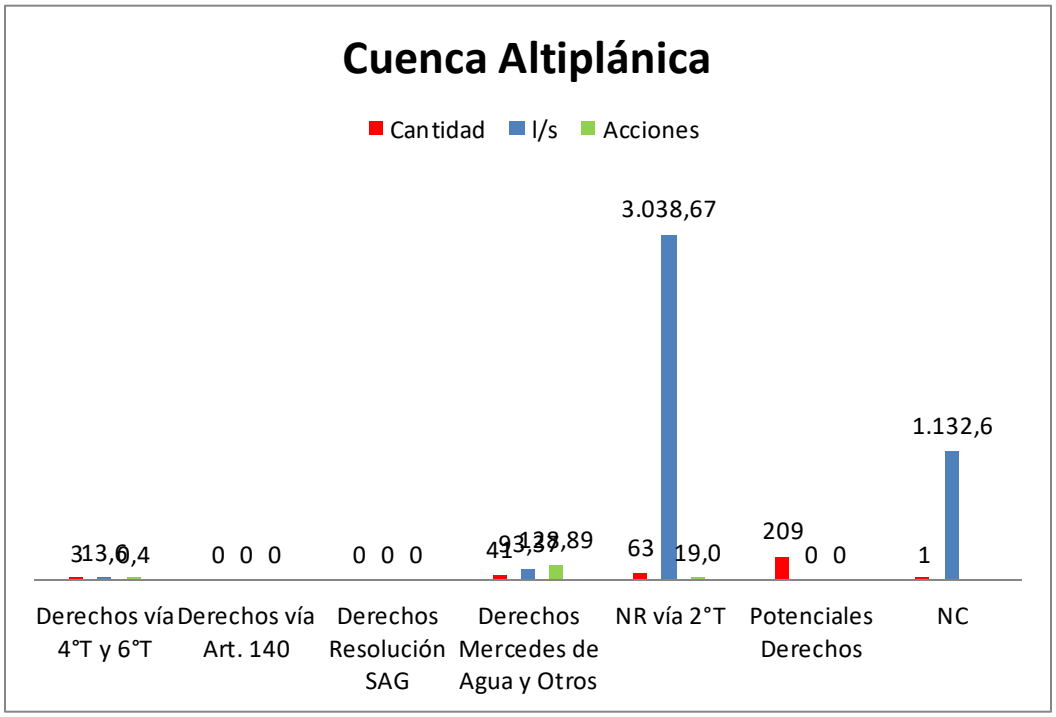


Figura 6.8 Caudales otorgados en las cuencas Altiplánicas. Fuente: elaboración propia.

Respecto de las cuencas altiplánicas, se cuenta con 19% de los expedientes de los NR, de los cuales se tienen los valores de caudales de un 84% de los litros por segundo inscritos. No se cuenta con los expedientes de ninguna de las 19 acciones otorgadas. Esta cuenca no cuenta con minutos inscritos en el CBR. La Tabla 6.39 y la Tabla 6.40 muestran el estado de los derechos solicitados por regularización en las cuencas Altiplánicas.

Tabla 6.39 Estado de Regularización de Derechos NR, superficiales y subterráneos en las cuencas Altiplánicas. Fuente: elaboración propia.

Cuenca	Derecho de Aprovechamiento	Solicitud presentada	Archivada	Sentencia	Denegada	Tramitación Judicial	Sin Información
Altiplánicas	Superficial	116	32	43	0	13	28
	subterránea	0	0	0	0	0	0
	Sin información	11	0	2	0	0	9
	Total	127	32	45	0	13	37

Tabla 6.40 Regularización de Derechos NR solicitados, derechos inscritos y expedientes encontrados según su naturaleza superficial o subterránea, caudales en l/s, acciones y minutos en las cuencas Altiplánicas. Fuente: elaboración propia.

Derecho de Aprovechamiento	Derechos Solicitados				Derechos Inscritos en el CBR planilla				Expedientes de NR			
	Cantidad	l/s	Acc.	Min.	Cantidad	l/s	Acc.	Min.	Cantidad	l/s	Acc.	Min.
Superficial	105	5.198,02	1,37	0	63	3.038,672	19,01	0	12	2.562,33	0	0
subterránea	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sin información	11	114,25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	116	5.312,27	1,37	0	63	3.038,672	19,01	0	12	2.562,33	0	0

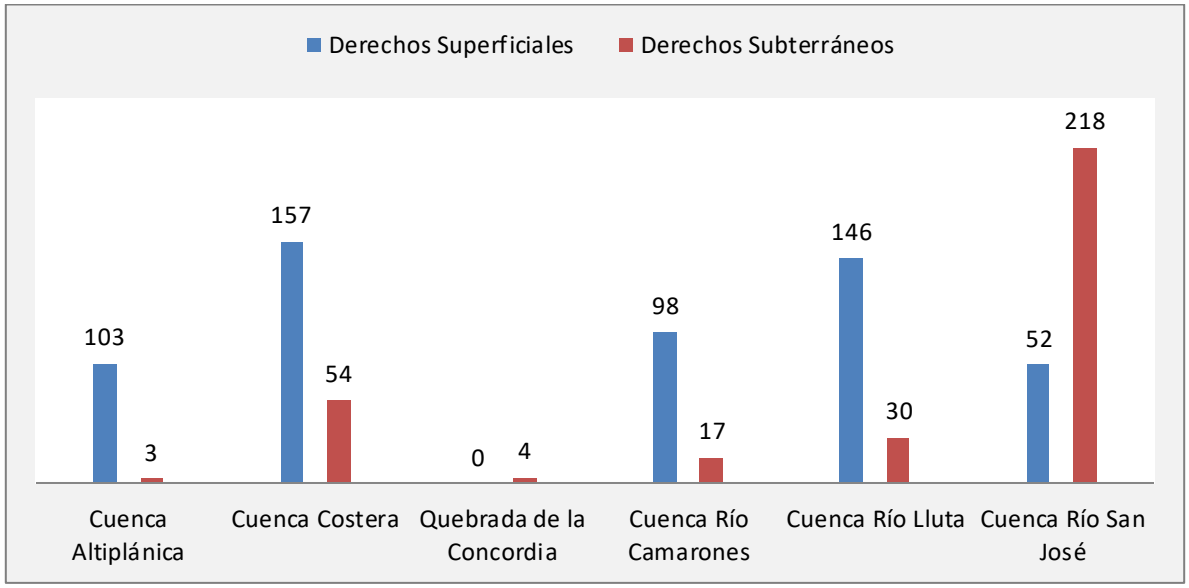


Figura 6.9 Número de derechos de aprovechamientos de aguas superficiales y subterráneas por cuenca. Fuente: elaboración propia.

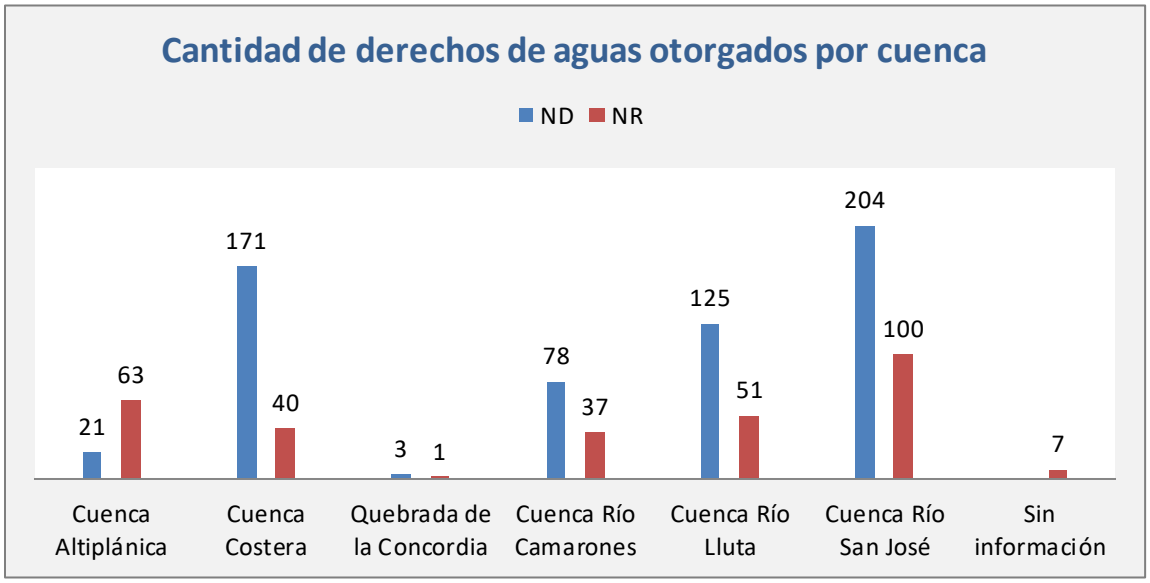


Figura 6.10 Distribución de los derechos ND y NR por cuenca. Fuente: elaboración propia.

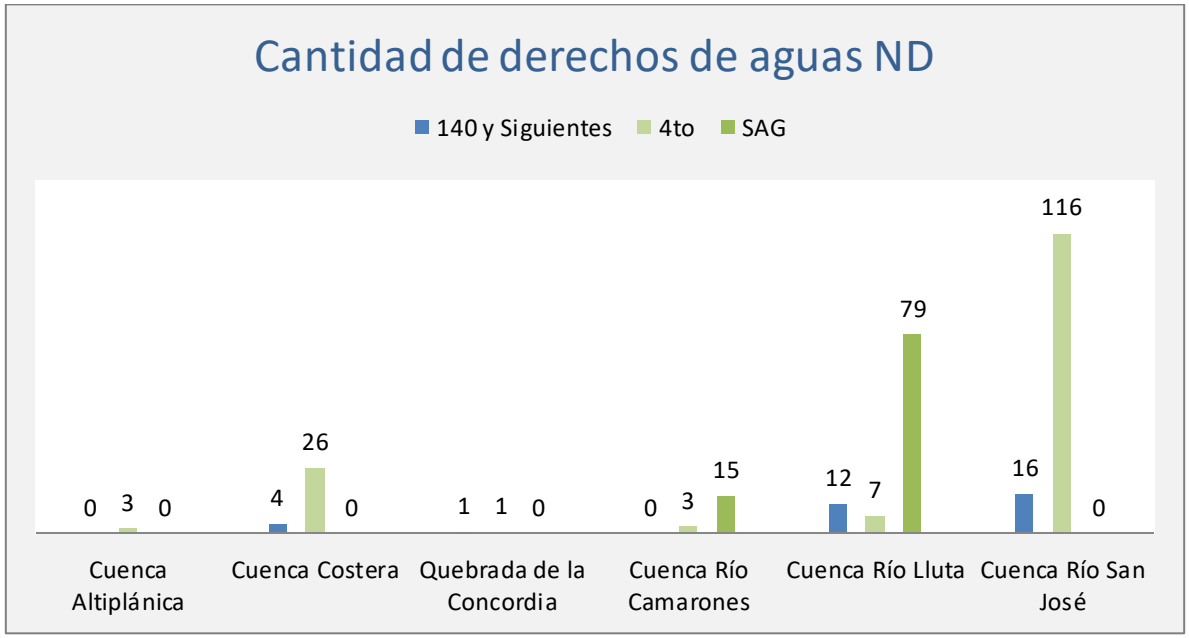


Figura 6.11 Distribución de los derechos inscritos ND de acuerdo al artículo 140 y siguientes y 4° Transitorio. Fuente: elaboración propia.

6.1.5 Duplicidades

En el desarrollo de este trabajo se encontraron algunos problemas correspondientes a vicios en las transferencias que se traducen en la duplicidad de derechos producto de que lo transferido excede al caudal del derecho otorgado originalmente. Estos fueron identificados individualmente y corresponden a los siguientes casos:

1. *SE TRANSFIERE MÁS CAUDAL QUE EL OTORGADO ORIGINALMENTE*

Se identificaron múltiples casos en que el titular del derecho de aprovechamientos de aguas transfiere un caudal mayor caudal al que se encuentra inscrito en su título inscrito.

Este se define legalmente como un vicio de "nulidad absoluta", ya que se está transfiriendo o transmitiendo un bien que no existe. Esto se traduce en un desbalance hídrico. El detalle de las inscripciones señaladas, se encuentran contenidas en el Anexo III, Duplicidades.

2. SE TRANSFIERE MÁS DE UNA VEZ EL CAUDAL COMPLETO

Asimismo se identificaron múltiples casos en que el titular del derecho de aprovechamientos de aguas transfiere más de una vez su derecho.

Este caso requiere mayor análisis que el anterior, ya que la transferencia o transmisión válida es aquella que se contiene en el primer título celebrado y no necesariamente significa que este se haya inscrito primero. Esto se traduce, al igual que el caso anterior en un desbalance hídrico. El detalle de las inscripciones señaladas, se encuentran contenidas en el Anexo III, Duplicidades.

6.1.6 Perfeccionamiento

Una de las dificultades para determinar el "balance hídrico" corresponde a las distintas unidades en que se expresan los caudales, existiendo no solo litros por segundo (l/s) y acciones, sino también turnos de riego (días, horas y minutos), porcentajes entre otros. Así mismo se pudo determinar que existe una gran cantidad de casos en los que se requiere un perfeccionamiento del derecho con el fin de llegar al caudal, ya que es difícil o las condiciones en que se encuentra es imposible determinarlo.

Muchos de estos casos bastarían con una aclaración al margen de la inscripción en virtud del artículo 88 de Reglamento del Conservador, sin embargo, otros requieren del procedimiento señalado en tribunales. Un ejemplo de esto último es el caso de los Proyectos de Parcelación otorgados por Resolución SAG.

6.1.7 Organizaciones de Usuarios de Aguas (OUAS)

Legalmente conformadas podemos encontrar la de la Junta de Vigilancia del Río Lluta y sus Tributarios, conformada el año 2011 e inscrita en el Registro de Aguas del CBR de Arica a fojas 183, número 124 del mismo año.

Adicionalmente en la Región se pueden encontrar 313 Comunidad de Aguas conformadas e inscritas en los Registros de Aguas del Conservador de Bines Raíces.

La comunidad más grande y que integra el mayor número de accionistas o usuarios, es la actual Comunidad de Aguas Canal AZAPA o "COMCA", cuyo caudal original del canal fue de 2.166,44 acciones y cuya fuente corresponde al río Lauca. Originalmente, en el año 1989, se conformó como una organización provisional de usuarios, llamada Canal

Azapa o "OPUCA", la cual se encuentra localizada en la cuenca del río San José y formada originalmente por 870 usuarios, cuyo título es la Resolución DGA Nº 320 del 11/08/1989 e inscrita en el Registro de Aguas del CBR de Arica a fojas 7, número 4 del año 1989. Posteriormente, el año 1991 se conformó como la actual Comunidad de Aguas Canal AZAPA "COMCA", ésta última posee más acciones que la original. Finalmente el año 2003, se realizó una rectificación en el CBR de Arica incluyendo dentro de la Organización a 43 accionistas más, cuyo título es la Resolución DGA Nº 450 del 14/08/2001 e inscrita en el Registro de Aguas del CBR de Arica a fojas 71, número 60 del año 2003.

En las más de 300 Comunidades de Aguas, encontramos usuarios o accionistas, que a pesar de estar integrados en la inscripción Conservatoria de la Comunidad, no lo está de manera individual. Según la legislación vigente el pertenecer a una OUA, no es título de Dominio, sin embargo es un antecedente importante que puede permitir la regularización. Para poder determinar los potenciales derechos de la OUAS versus los derechos que efectivamente están inscritos en el Registro de Propiedad de Aguas, es necesario contar con:

1. La información levantada en terreno para determinar quine es el usuario que efectivamente usa las aguas
2. Revisión paralela de la lista de los comuneros originarios inscritos en el CBR, las notas marginales de las inscripciones de las OUAS.
3. Revisión de las inscripciones individuales.

Cada caso tiene sus particularidades por lo que la determinación de los potenciales derechos versus los que efectivamente están inscritos y cumplen cabalmente la normativa implica un gran trabajo en terreno levantando la información.

El detalle de las Resoluciones DGA en virtud de la que fueron conformadas, el número de sus accionistas originales y datos de inscripción en los Registros de Propiedad de Aguas del CBR de Arica, se encuentran en la Planilla de Comunidades del Anexo III, que es parte integrante del presente informe.

6.1.8 Dotaciones y sus fuentes en las provincias de la región

Las caudales asociados o equivalentes a cada una de los derechos de agua respecto a su fuente y otros derechos que existen se muestran en las tablas que a continuación se presentan, cuya información considera lo siguiente:

- Los caudales naturales, acciones y horas que se han inscrito en el CBR para cada Organización de Usuarios de Agua (OUA) en la provincia de Arica y de usuarios en el caso de la provincia de Parinacota, y en base a ellos se ha determinado una dotación unitaria respecto a los usuarios originarios.
- Las dotaciones calculadas para cada comunidad a partir de la planilla base de comunidades (Anexo III), en el que se ha tomado las columnas que indican el "caudal del cauce natural" y el "equivalente en horas". De acuerdo a estos dos datos se llevó el caudal a volumen anual de acuerdo a las horas y días indicados y luego se redujo a caudal en l/s nuevamente considerando 365 días. Esta dotación no se ha podido calcular en todas las OUA, ya que no todas cuentan con esta información o esta es poco clara (Tablas 6.41 a 6.50).
- Las dotaciones hidrológicas se han obtenido de la multiplicación de la proporción de las OUA's o usuarios en la cuenca por el caudal anual del 85% de probabilidad de excedencia de alguna estación fluviométrica aguas arriba, para la cual se han considerado las siguientes estaciones:

Tabla 6.41 Caudales referenciales (85% Prob. Exc.) de las cuencas para el cálculo de la dotación hidrológica. Fuente: elaboración propia.

Cuenca	Estación Fluviométrica	Caudal 85% Prob. Exc. (l/s)	Referencia
Río Lluta / Río Lluta Alto	Río Lluta en Alcérreca	1.519,0	ICASS
Río Lluta / Río Lluta Bajo	Río Lluta en Tocontasi	1.063,0	Ayala, Cabrera y Asociados (2002)
Río San José / Azapa Alto	Río Tignamar en Tignamar	17,0	ICASS
Río San José / Río San José	Río San José en Ausipar	602,5	ICASS
Costeras R. San José-Q. Camarones / Quebrada Vítor	Río Codpa en Cala-Cala	42,0	ICASS
Q. Río Camarones / Río Camarones antes Junta Quebrada Chiza	Quebrada Ajatama antes de Confluencia + Río Caritaya en Caritaya	417,0	Ayala, Cabrera y Asociados (2002)
Altiplánicas / Entre límite Perú-Bolivia y río Lauca /Río Caquena hasta frontera (río Cosapilla)	Río Caquena en Vertedero	878,3	ICASS
Altiplánicas / Río Lauca	Río Lauca en Japú	1810,8	ICASS

Tabla 6.42 DAA asociados a cuenca Río Lluta, Río Lluta Alto. Fuente: elaboración a partir de Base de Comunidades.

Cuenca/Canal	Usuarios Originales (un)	Acciones (un)	Horas	Inscripción CBR		Dotación (l/s)	Dotación Hidrológica (85% Prob. Exc.)	
				Total (l/s)	Unitaria (l/s/acción)		Total (l/s)	Unitaria (l/s/acción)
Río Lluta / Río Lluta Alto / Río Lluta entre Quebrada Huaylas y Quebrada Socoroma								
Quebrada Ancoamache - Río Lluta								
CDA Canal Sajata	104	51.426	(*)	30	0,001	(*)	60,2	0,001
CDA Canal Llipi Llipi	57	30.240	5.040	60	0,002	70,0	120,4	0,004
Quebrada Araguallane o Sebencani - Río Lluta							-	
CDA Canal Ancache	18	17.424	2.904	15	0,001	15,1	30,1	0,002
Quebrada Aroma Mancaruma							-	
CDA Canal Mancaruma-Chulpane	107	5.544	924	15	0,003	14,4	30,1	0,005
CDA Canal Cerro Socoroma	2	288	48	4	0,014	0,2	8,0	0,028
Quebrada de Llancoma - Río Lluta							-	
CDA Canal Llancoma	143	79.494	13.249	100	0,001	(*)	200,7	0,003
Quebrada de Putre - Río Lluta							-	
CDA Canal Taipicahua	12	17.280	2.880	50	0,003	50,0	100,3	0,006
Quebrada Perquelleque							-	
CDA Canal Perquelleque	13	24.012	4.002	9	0,0004	12,5	18,1	0,001
CDA Canal Vilacabrani	45	21.168	3.528	9	0,0004	11,0	18,1	0,001
Quebrada Putre							-	
CDA Canal Tojotojoni	58	24.600	4.100	9	0,0004	6,4	18,1	0,001
Quebrada Surunche o Umaxo - Río Lluta							-	
CDA Canal Surunche	90	42.912	7.152	40	0,001	39,7	80,3	0,002
Quebrada Ubina - Río Lluta							-	
CDA Canal Ancolacaya	2	8.640	1.440	2	0,0002	1,3	4,0	0,0005
Río Cubrimani							-	
CDA Canal Cubrimani	241	132.072	22.012	314	0,002	(*)	630,1	0,005
Río Lluta							-	
CDA Canal Lluscuma	80	59.256	9.865	70	0,001	137,0	140,5	0,002
CDA Canal Chatiapo	13	17,3	33	30	1,730	5,7	60,2	3,472
Totales Cuenca	985.0	514.373,3		757		363,5	1.519,0	

Nota: (*) No se cuenta con datos para calcular dotación o los valores son incorrectos

Tabla 6.43 DAA asociados a cuenca Río Lluta, Río Lluta Bajo. Fuente: elaboración a partir de Base de Comunidades.

Cuenca/Canal	Usuarios Originales (un)	Acciones (un)	Horas	Inscripción CBR		Dotación (l/s)	Dotación Hidrológica (85% Prob. Exc.)	
				Total (l/s)	Unitaria (l/s/acción)		Total (l/s)	Unitaria (l/s/acción)
Río Lluta / Río Lluta Bajo / Río Lluta entre Quebrada Socoroma y Quebrada Poconchile								
Quebrada de Socoroma								
CDA Canal Chacacagua	70	3.360	560	10	0,003	6,7	2,4	0,001
CDA Canal del Pueblo de Socoroma	246	11.808	1.968	15	0,001	0,0	3,7	0,0003
CDA Bajos Pollerane	8	768	128	3	0,004	0,5	0,7	0,001
CDA Canal Apilla-Apilla n°1	4	192	32	4	0,021	0,2	1,0	0,005
Quebrada Socoroma								
CDA Canal Vila Vila	9	288	48	2	0,007	0,1	0,5	0,002
CDA Canal Apilla-Apilla n°2	5	720	120	4	0,006	0,6	1,0	0,001
CDA Canal Chipaca	7	432	72	10	0,023	0,9	2,4	0,006
CDA Canal Guañavira Abajo	5	864	144	2	0,002	0,3	0,5	0,001
Río Lluta								
CDA Comunidad Almonte	2	13	(*)	237	18,231	(*)	57,8	4,448
CDA Canal Cala Cala	19	11	36	30	2,722	6,2	7,3	0,664
CDA Canal Molinos	49	193,1	33	600	3,108	113,8	146,4	0,758
CDA Canal Bocanegra	6	81	33	30	0,370	5,7	7,3	0,090
CDA Canal El Tambo	5	41.5	33	40	0,964	7,6	9,8	0,235
CDA Canal Rojas Maraboli	3	18,5	23	40	2,162	5,3	9,8	0,528
CDA Canal Loredo	2	21	23	30	1,429	4,0	7,3	0,349
CDA Canal Vilca Chang	2	37	23	30	0,811	4,0	7,3	0,198
CDA Canal La Isla	9	22,4	32	60	2,679	11,0	14,6	0,654
CDA Canal Agua-Taya	24	65,7	23	60	0,914	7,9	14,6	0,223
CDA Canal Ponce	2	7	23	30	4,286	4,0	7,3	1,046
CDA Canal Humire	5	3.8	33	10	2,660	1,9	2,4	0,649
CDA Canal Bolaños Villanueva	4	8	23	30	3,750	4,0	7,3	0,915
CDA Canal Ramos	7	28,1	23	60	2,139	7,9	14,6	0,522
CDA Canal Santa Raquel	5	77,5	23	50	0,645	6,6	12,2	0,157
CDA Canal Kesler	3	4,7	32	15	3,191	2,8	3,7	0,779
CDA Canal Linderos	8	23,9	32	30	1,255	5,5	7,3	0,306
CDA Canal Poconchile	27	83,8	32	150	1,790	27,6	36,6	0,437
CDA Canal Santa Inés	6	21	23	80	3,810	10,6	19,5	0,929
CDA Canal Puro Chile	17	67	32	200	2,986	36,8	48,8	0,728
CDA Canal Arancha	14	17,4	36	60	3,452	12,4	14,6	0,842
CDA Canal Huacharaquie	5	1,9	36	20	10,811	4,1	4,9	2,638
CDA Canal Tiñare	2	5,5	36	20	3,636	4,1	4,9	0,887
CDA Canal Challallapo	11	16,6	36	40	2,408	8,3	9,8	0,588
CDA Canal Zora	17	15,4	36	50	3,249	10,3	12,2	0,793
CDA Canal Tauquia	12	8,8	36	30	3,401	6,2	7,3	0,830
CDA Canal Chaquiri	5	13,2	36	40	3,040	8,3	9,8	0,742
CDA Canal Chapisca Oriente	7	4,7	36	40	8,457	8,3	9,8	2,063

Cuenca/Canal	Usuarios Originales (un)	Acciones (un)	Horas	Inscripción CBR		Dotación (l/s)	Dotación Hidrológica (85% Prob. Exc.)	
				Total (l/s)	Unitaria (l/s/acción)		Total (l/s)	Unitaria (l/s/acción)
CDA Canal Chapisca Norte	5	3,7	36	40	10,811	8,3	9,8	2,638
CDA Canal Vila-Collo n°1	2	5,3	36	30	5,682	6,2	7,3	1,386
CDA Canal Vila-Collo n°2	6	5,01	36	20	3,992	4,1	4,9	0,974
CDA Canal Iqueta Norte	5	3,8	36	25	6,667	5,2	6,1	1,627
CDA Canal Vinto Norte	18	17,7	36	80	4,517	16,6	19,5	1,102
CDA Canal Cata	3	2,9	36	20	6,849	4,1	4,9	1,671
CDA Canal Anca-Collo	2	1,3	36	20	16,000	4,1	4,9	3,904
CDA Canal Buena Vista	3	3,98	36	20	5,025	4,1	4,9	1,226
CDA Canal Vila Vila n°2	3	3,97	36	50	12,594	10,3	12,2	3,073
CDA Canal Chapisca Sur	12	10,1	36	50	4,941	10,3	12,2	1,205
CDA Canal Tocontasi	7	18,5	36	50	2,704	10,3	12,2	0,660
CDA Canal Vinto Sur	4	2,8	36	20	7,092	4,1	4,9	1,730
CDA Canal Punta de Rieles	3	5,2	23	15	2,863	2,0	3,7	0,698
CDA Canal La Palma	3	9,3	36	40	4,306	8,3	9,8	1,050
CDA Canal Huanca	2	7,1	23	15	2,119	2,0	3,7	0,517
CDA Canal Mayorga (**)	4	20,3	(*)	20	0,985	(*)	4,9	0,240
CDA Canal Barranco Santa Rosa (**)	3	19	(*)	15	0,789	(*)	3,7	0,193
Río Lluta / Río Lluta Bajo / Río Lluta entre junta Quebrada Poconchile y desembocadura								
Río Lluta								
CDA Canal Santa Rosa	7	46,8	26	60	1,281	9,0	14,6	0,313
CDA Canal Huancarane	7	48,9	32	80	1,637	14,7	19,5	0,399
CDA Canal Arellano Beyzan	3	20,0	60	60	3,000	20,7	14,6	0,732
CDA Canal Cora-Beyzan o Beyzan-Cora	22	99,4	60	100	1,006	34,5	24,4	0,245
CDA Canal El Muro	34	211,1	60	150	0,711	51,7	36,6	0,173
CDA Canal Chacabuco	31	345,2	60	100	0,290	34,5	24,4	0,071
CDA Canal Sascapa	65	428,3	60	200	0,467	69,0	48,8	0,114
CDA Canal Aica-Gonzalez	2	30,0	26	60	2,000	9,0	14,6	0,488
CDA Canal Vilca Loredo	7	35,5	23	40	1,127	5,3	9,8	0,275
CDA Canal Visconti	10	119,5	32	80	0,669	14,7	19,5	0,163
CDA Canal Kesler-Gil	5	60,0	32	80	1,333	14,7	19,5	0,325
CDA Canal Beneficencia	54	39,2	26	60	1,531	9,0	14,6	0,374
CDA Canal La Palma Uno	5	23,0	32	80	3,478	14,7	19,5	0,849
CDA Canal La Palma Dos	4	36,0	32	80	2,222	14,7	19,5	0,542
CDA Canal Domínguez	2	7,5	60	15	2,000	5,2	3,7	0,488
CDA Canal Valles Hermosos	146	249,0	26	400	1,606	59,8	97,6	0,392
CDA Canal Alanoca	2	26,6	60	20	0,752	6,9	4,9	0,183
Totales Cuenca	1.123	21.310,2		4.357,0		832,5	1.063,0	

Nota: (*) CDA no cuenta con caudal de cauce natural ni horas de riego inscritas.
(**) Debido a que la inscripción de la OUA no cuenta con la inscripción de un caudal del cauce natural, se le ha considerado un caudal igual al canal más cercano, y que cuente con la misma cantidad de usuarios.

Tabla 6.44 DAA asociados a cuenca Río San José, Azapa Alto. Fuente: elaboración a partir de Base de Comunidades.

Cuenca/Canal	Usuarios Originales (un)	Acciones (un)	Horas	Inscripción CBR		Dotación (l/s)	Dotación Hidrológica (85% Prob. Exc.)	
				Total (l/s)	Unitaria (l/s/acción)		Total (l/s)	Unitaria (l/s/acción)
Río San José / Azapa Alto / Río Seco, Quebrada Chusmiza, Río Tignamar								
Quebrada Rio Grande								
CDA Canal Vichuta	4	240	40	30	7,5	1,7	0,3	0,00116
CDA Canal Vichuta Dos	2	180	30	30	15,0	1,3	0,3	0,00155
CDA Canal Acorire	36	5.328	888	30	0,8	9,3	0,3	0,00005
CDA Canal Achuma Dos	5	5.064	844	30	6,0	8,8	0,3	0,00005
CDA Canal Huayjate	2	1.728	288	30	15,0	3,0	0,3	0,00016
CDA Canal Palca	24	432	72	30	1,3	0,8	0,3	0,00064
Quebrada Huancure								
CDA Canal Chucasiña Uno	3	300	50	5	1,7	0,3	0,05	0,00015
CDA Canal Chucasiña Tres	8	714	119	5	0,6	0,8	0,05	0,00006
CDA Canal Huancure Uno	6	330	55	4	0,7	0,3	0,04	0,00011
CDA Canal Huancure Dos	2	360	60	3	1,5	0,3	0,03	0,00008
CDA Canal Huancure Tres	14	1.290	215	4	0,3	1,2	0,04	0,00003
CDA Canal Huancure Cuatro	8	660	110	3	0,4	0,5	0,03	0,00004
Quebrada de Putagua								
CDA Canal Putagua Uno	7	336	56	4	0,6	0,3	0,04	0,00011
CDA Canal Putagua Dos	24	918	153	4	0,2	0,9	0,04	0,00004
CDA Canal Putagua Cinco	4	390	65	3	0,8	0,3	0,03	0,00007
CDA Canal Putagua	3	360	60	20	6,7	1,7	0,2	0,00052
CDA Canal Putagua Chico	2	180	30	20	10,0	0,8	0,2	0,00103
Quebrada Tumaya								
CDA Canal Tumaya Uno	4	162	27	10	2,5	0,4	0,1	0,00057
CDA Canal Tumaya Arriba	155	5.106	851	10	0,1	8,9	0,1	0,00002
CDA Canal Tumaya Tres	4	288	48	2	0,5	0,1	0,02	0,00006
CDA Canal Tumaya Cuatro	2	96	16	2	1,0	0,0	0,02	0,00019
CDA Canal Caillima	35	1.056	176	5	0,1	1,2	0,05	0,00004
CDA Canal Tumaya Lado Derecho	4	144	24	30	7,5	0,7	0,3	0,00193
CDA Canal Taucare	2	360	60	30	15,0	2,5	0,3	0,00077
Quebrada Oxa								
CDA Canal Cuilco	2	216	36	5	2,5	0,3	0,05	0,00021
CDA Canal Taipilarca	49	5.040	840	10	0,2	11,7	0,1	0,00002
CDA Canal Mulline	15	2.844	474	5	0,3	0,5	0,05	0,00002
CDA Canal Mulline Adentro	11	3.264	544	5	0,5	0,6	0,05	0,00001
CDA Canal Caviñane	9	1.200	200	5	0,6	1,4	0,05	0,00004
CDA Canal Putu Putu	5	1.200	200	4	0,8	0,3	0,04	0,00003
CDA Canal Chancapa	5	528	88	4	0,8	0,2	0,04	0,00007
CDA Canal Molino	9	810	135	4	0,4	0,8	0,04	0,00005
CDA Canal Mullipungo	5	2.880	480	12	2,4	12,0	0,1	0,00004
CDA Canal Angostura de Cuilco	2	180	30	20	10,0	0,8	0,2	0,00103

Cuenca/Canal	Usuarios Originales (un)	Acciones (un)	Horas	Inscripción CBR		Dotación (l/s)	Dotación Hidrológica (85% Prob. Exc.)	
				Total (l/s)	Unitaria (l/s/acción)		Total (l/s)	Unitaria (l/s/acción)
CDA Canal Choraque	2	90	15	20	10,0	0,4	0,2	0,00206
CDA Canal Vertiente Tres	3	420	70	3	1,0	0,1	0,03	0,00007
Quebrada de Saxamar								
CDA Canal Nequela	6	438	73	10	1,7	0,8	0,1	0,00021
CDA Canal Cillane	2	792	132	8	4,0	1,1	0,1	0,00009
CDA Canal Grande o Rosasane	14	1.800	300	10	0,7	3,1	0,1	0,00005
CDA Canal Unificación Chijuma Bausire o Toma Grande	25	2.946	491	10	0,4	5,1	0,1	0,00003
Quebrada Lupica								
CDA Canal Pucara	7	3.168	528	15	2,1	4,1	0,1	0,00004
CDA Canal Retamani	26	6.528	45	40	1,5	0,8	0,4	0,00006
CDA Canal Unificación Tolapampa Yactire	2	2.304	384	15	7,5	3,0	0,1	0,00006
CDA Canal Chaquire	4	3.216	536	40	10,0	8,9	0,4	0,00012
CDA Canal Albancea	11	3.120	520	15	1,4	4,1	0,1	0,00004
Quebrada Misaña o Belén								
CDA Canal Aquechoco	52	27.264	4.544	65	1,3	205,1	0,6	0,00002
CDA Canal Quipaquipane	28	40.848	6.808	65	2,3	307,3	0,6	0,00001
CDA Canal Molino	27	31.200	5.200	65	2,4	234,7	0,6	0,00002
CDA Canal Calapampa Ñacojo	169	81.552	14	65	0,4	0,6	0,6	0,00001
CDA Canal Casirca	26	21.792	3.732	65	2,5	168,5	0,6	0,00003
CDA Canal La Banda	39	13.548	2.258	35	0,9	73,2	0,3	0,00002
CDA Canal Del Pueblo de Belén	60	22.146	3.691	35	0,6	119,6	0,3	0,00001
CDA Canal Colca	35	19.296	3.216	35	1,0	104,2	0,3	0,00002
CDA Canal Chajpa	15	8.544	1.424	25	1,7	16,5	0,2	0,00003
CDA Canal Calapampa Abajo	25	11.424	1.904	25	1,0	22,0	0,2	0,00002
CDA Canal Pucara	14	9.600	1.600	20	1,4	29,6	0,2	0,00002
CDA Canal Guayguarane	6	4.704	784	25	4,2	18,1	0,2	0,00005
CDA Canal Quichuaya Tres	4	2.016	336	25	6,3	7,8	0,2	0,00012
CDA Canal Quichuaya Cuatro	5	1.304	384	25	5,0	8,9	0,2	0,00018
CDA Canal Quelapampa	7	1.872	312	40	5,7	5,2	0,4	0,00020
Quebrada Sangla- Río Ticnamar								
CDA Sangla Uno o Sangla	29	3.024	504	65	2,2	22,8	0,6	0,00020
Río Pachama								
CDA Canal Caysa Cala	5	360	60	15	0,042	0,4	0,1	0,00039
CDA Canal Pachama	71	4.785	798	15	0,003	5,4	0,1	0,00003
CDA Canal Pitacane	7	420	70	4	0,010	0,1	0,04	0,00009
CDA Canal Marquirave	3	4.320	720	4	0,001	4,0	0,04	0,00001
Río Chapiquiña								
CDA Canal Mullipungo	5	954	159	10	0,010	2,2	0,1	0,00010
CDA Canal Huanacune	5	5.760	960	12	0,002	12,0	0,1	0,00002
CDA Canal Chuñave	5	6.480	1.080	12	0,002	12,0	0,1	0,00002
CDA Canal Pujune	5	4.752	792	12	0,003	6,6	0,1	0,00002
CDA Canal Pujune Dos	2	720	120	12	0,017	1,0	0,1	0,00015

Cuenca/Canal	Usuarios Originales (un)	Acciones (un)	Horas	Inscripción CBR		Dotación (l/s)	Dotación Hidrológica (85% Prob. Exc.)	
				Total (l/s)	Unitaria (l/s/acción)		Total (l/s)	Unitaria (l/s/acción)
CDA Canal Puyure Uno	2	1.872	312	12	0,006	2,6	0,1	0,00006
CDA Canal Puyure Dos	2	1.296	216	12	0,009	1,8	0,1	0,00009
CDA Canal Ancovilque	11	6.768	1.128	12	0,002	12,0	0,1	0,00002
CDA Canal Mal Paso-Illica	7	9.792	1.632	12	0,001	12,0	0,1	0,00001
CDA Canal Barranco	4	5.616	936	12	0,002	12,0	0,1	0,00002
Quebrada Murmuntane								
CDA Canal Murmuntane Dos	3	144	24	10	0,069	0,2	0,1	0,00064
CDA Canal Murmuntane Uno	35	2.256	376	10	0,004	3,5	0,1	0,00004
Quebrada Espejune								
CDA Canal Sabiñaya	24	6.048	1.008	40	0,007	40,0	0,4	0,00006
Vertiente dos								
CDA Canal Pujo Norte	13	798	133	3	0,004	0,6	0,03	0,00003
CDA Canal Pujo Sur	5	252	42	3	0,012	0,2	0,03	0,00011
Río Chucurjalla								
CDA Canal Uno	2	864	144	10	0,012	2,3	0,1	0,00011
CDA Canal Dos	2	1.008	168	10	0,010	2,7	0,1	0,00009
CDA Canal Tres	2	864	144	10	0,012	2,3	0,1	0,00011
CDA Canal Chaijate Uno	14	1.590	265	10	0,006	4,4	0,1	0,00006
CDA Canal Chaijate Dos	5	3.924	654	10	0,003	10,9	0,1	0,00002
Río Copaquilla								
CDA Canal Pucara Dos Sur	19	912	152	6	0,007	1,0	0,1	0,00006
CDA Canal Trigo Pampa	12	3.168	528	8	0,003	8,0	0,1	0,00002
CDA Canal Acequia nueva	22	1.944	324	8	0,004	3,0	0,1	0,00004
CDA Canal Copaquilla Abajo	2	600	100	5	0,008	1,4	0,05	0,00008
CDA Canal Pucara Uno Norte	2	600	100	4	0,007	1,1	0,04	0,00006
Río Jaruma								
CDA Canal Hacienda	2	4.320	720	30	0,007	4,1	0,3	0,00006
CDA Canal Juntuma	2	144	24	15	0,104	0,1	0,1	0,00097
CDA Canal Queñua Pampa	6	864	144	30	0,035	0,8	0,3	0,00032
CDA Canal Ingenio	20	3.600	600	30	0,008	3,4	0,3	0,00008
CDA Canal Chiñane	20	1.584	264	30	0,019	1,5	0,3	0,00018
CDA Canal Millune	5	720	120	30	0,042	0,7	0,3	0,00039
CDA Canal Chalzane	39	3.696	616	30	0,008	3,5	0,3	0,00008
CDA Canal Muñane	2	504	84	15	0,030	0,2	0,1	0,00028
CDA Canal Chalzane-Cayllama	2	3.744	624	12	0,003	12,0	0,1	0,00003
CDA Canal Cala-Cala	25	3.360	560	30	0,009	3,2	0,3	0,00008
Río Moxuma								
CDA Canal Pucara	5	1.080	1.824	4	0,004	0,3	0,04	0,00003
CDA Canal del Pueblo de Chapiquiña	61	10.944	648	15	0,001	3,3	0,1	0,00001
CDA Canal Aruvire	14	3.888	408	15	0,004	1,2	0,1	0,00004
CDA Canal Chiquisane	29	2.448	180	15	0,006	0,7	0,1	0,00006
Río Pumane								

Cuenca/Canal	Usuarios Originales (un)	Acciones (un)	Horas	Inscripción CBR		Dotación (l/s)	Dotación Hidrológica (85% Prob. Exc.)	
				Total (l/s)	Unitaria (l/s/acción)		Total (l/s)	Unitaria (l/s/acción)
CDA Canal Pumane	7	5.184	864	10	0,002	8,9	0,1	0,00002
Vertiente Coquilla								
CDA Canal Estanque Grande	44	2.142	357	6	0,003	1,0	0,1	0,00003
Quebrada Virsune - Río Ticnamar								
CDA Canal Isla	2	768	128	35	0,046	1,9	0,3	0,00042
CDA Canal Eucaliptus	4	480	80	35	0,073	1,5	0,3	0,00068
Río Ticnamar								
CDA Canal Capitana	5	2.592	432	20	0,008	12,0	0,2	0,00007
CDA Canal Churicala Uno	2	432	600	20	0,046	2,0	0,2	0,00043
CDA Canal Churicala Dos	3	432	72	20	0,046	2,0	0,2	0,00043
CDA Canal Tangane Uno	7	2.952	72	20	0,007	13,7	0,2	0,00006
CDA Canal Tangane Dos	12	2.664	492	20	0,008	12,3	0,2	0,00007
CDA Canal Ocollane	12	1.476	444	20	0,014	6,8	0,2	0,00013
CDA Canal Manzanane	38	7.056	246	20	0,003	32,7	0,2	0,00003
CDA Canal Achuna o Achuma	16	7.146	1.176	20	0,003	33,1	0,2	0,00003
CDA Canal Santa Rosa	7	3.600	1.191	20	0,006	16,7	0,2	0,00005
CDA Canal Palca	24	4.176	696	20	0,005	4,8	0,2	0,00004
CDA Canal Pasa	15	4.212	702	20	0,005	19,5	0,2	0,00004
CDA Canal Irana	90	8.478	1.413	20	0,002	39,3	0,2	0,00002
CDA Canal Alfalfane	59	16.308	2.712	20	0,001	75,3	0,2	0,00001
CDA Canal Taipiupulla	36	13.680	2.280	20	0,001	19,0	0,2	0,00001
CDA Canal Upulla	16	10.440	1.740	20	0,002	16,1	0,2	0,00002
Totales Cuenca	1.565	538.427		1.833		1.894,0	17,0	

Nota: (*) No se cuenta con datos para calcular dotación o los valores son incorrectos

Tabla 6.45 DAA asociados a cuenca Río San José en Río San José. Fuente: elaboración a partir de Base de Comunidades.

Cuenca/Canal	Usuarios Originales (un)	Acciones (un)	Horas	Inscripción CBR		Dotación (l/s)	Dotación Hidrológica (85% Prob. Exc.)	
				Total (l/s)	Unitaria (l/s/acción)		Total (l/s)	Unitaria (l/s/acción)
Río San José / Río San José / Río San José								
Río Lauca								
CDA Canal AZAPA "COMCA"	939	2.776,3	(*)	1.132,6	0,41	(*)	523,9	0,19
Vertiente Media Luna								
CDA Vertiente Media Luna	42	168,0	(*)	100,0	0,60	(*)	46,3	0,28
Vertientes Socavón, Las Animas, El Río, Matavaca, Pejerrey, Conchalique, El Estanque, Condenados, El Quintay, El Pleito								
CDA Canal Los Albarracines	36	192,0	192	70,0	0,36	70,0	32,4	0,17
Lumbrera San Miguel y la Concepción								
CDA San Miguel y La Concepción	62	(*)	205,3	(*)		(*)		
Vertiente El Gallito								
CDA Vertiente El Gallito	12	168,0	168	(*)		(*)		
Vertiente Mita Chica								
CDA Vertiente Mita Chica	25	168,0	168	(*)		(*)		
Acuífero Azapa								
CDA Cerro Moreno	10	168,0	(*)	(*)		(*)		
Totales Cuenca	1.126	3.640,3		1.302,6		70,0	602,5	

Nota: (*) Las CDA identificadas no cuentan con DAA en l/s u horas de riego

Tabla 6.46 DAA asociados a cuenca Costeras R. San José-Q. Camarones, Quebrada Vítor. Fuente: elaboración a partir de Base de Comunidades.

Cuenca/Canal	Usuarios Originales (un)	Acciones (un)	Horas	Inscripción CBR		Dotación (l/s)	Dotación Hidrológica (85% Prob. Exc.)	
				Total (l/s)	Unitaria (l/s/acción)		Total (l/s)	Unitaria (l/s/acción)
Costeras / Quebrada Vítor / Quebrada Vítor								
Quebrada Vítor o Codpa								
CDA Canal La Virgen Dos	15	234	39	40	0,17	3,61	0,73	0,003
CDA Canal Acachagua o Acachagua Dos	2	258	43	40	0,16	5,97	0,73	0,003
CDA Canal San Pedro	2	108	18	40	0,37	2,50	0,73	0,007
CDA Canal La Hacienda	4	81	14	40	0,49	1,25	0,73	0,009
CDA Canal Santa Rosa Dos	3	75	13	40	0,53	1,16	0,73	0,010
CDA Canal Miraflores	6	87	15	40	0,46	2,01	0,73	0,008
CDA Canal Acachagua o Acachagua Cinco	2	156	26	40	0,26	3,61	0,73	0,005
CDA Canal La Ladera	5	102	17	40	0,39	1,57	0,73	0,007
CDA Canal Cachi Cachi	4	156	26	40	0,26	2,41	0,73	0,005
CDA Canal Naranjane	36	546	91	40	0,07	12,64	0,73	0,001
CDA Canal La Falca	7	111	19	40	0,36	1,54	0,73	0,007
CDA Canal La Virgen Uno	7	348	58	40	0,11	5,37	0,73	0,002
CDA Canal Guañacagua	10	234	39	40	0,17	5,42	0,73	0,003
CDA Canal Huancarane	19	405	68	40	0,10	9,38	0,73	0,002
CDA Canal Marquirabe	15	312	52	40	0,13	7,22	0,73	0,002
CDA Canal Casicasco	22	333	56	40	0,12	7,71	0,73	0,002
CDA Canal Poroma Tres	12	240	40	40	0,17	5,56	0,73	0,003
CDA Canal Chaco	8	141	24	40	0,28	3,26	0,73	0,005
CDA Canal Tanguaya	4	66	11	40	0,61	1,53	0,73	0,011
CDA Canal Chuca Chuca	13	195	33	40	0,21	4,51	0,73	0,004
CDA Canal Chitita	11	216	36	40	0,19	5,00	0,73	0,003
CDA Canal Pucara Uno o Pucara	14	384	64	40	0,10	8,89	0,73	0,002
CDA Canal Poroma Dos	7	123	21	40	0,33	2,85	0,73	0,006
CDA Canal Cala Cala	19	90	15	40	0,44	2,08	0,73	0,008
CDA Canal Poroma Cuatro	16	321	54	40	0,12	7,43	0,73	0,002
CDA Canal Isajima	10	204	34	40	0,20	4,72	0,73	0,004
CDA Canal Santísimo	8	156	26	40	0,26	2,89	0,73	0,005
CDA Canal Las Animas	13	306	51	40	0,13	4,72	0,73	0,002
CDA Canal Molinos	7	192	32	40	0,21	2,96	0,73	0,004
CDA Canal Peragonia o Perasane	2	12	2	40	3,33	0,17	0,73	0,061
CDA Canal Unificación Amasaca Grande Tapia	37	421,5	70	40	0,09	6,50	0,73	0,002
CDA Canal Amasaca Chico	6	77	13	40	0,52	1,19	0,73	0,010
CDA Canal Unificación El Tapial El Arenal Uno	10	414	69	40	0,10	9,6	0,73	0,002
CDA Canal Palca	24	156	26	30	0,19	2,7	0,55	0,004
CDA Canal Quilliquilli	2	120	20	40	0,33	1,85	0,73	0,006
CDA Canal Taipillive o Taipiñibe	6	78	13	40	0,51	1,81	0,73	0,009
CDA Canal Unificación Viñanes Santa Rosa	15	192	32	40	0,21	2,96	0,73	0,004

Cuenca/Canal	Usuarios Originales (un)	Acciones (un)	Horas	Inscripción CBR		Dotación (l/s)	Dotación Hidrológica (85% Prob. Exc.)	
				Total (l/s)	Unitaria (l/s/acción)		Total (l/s)	Unitaria (l/s/acción)
Uno								
CDA Canal Mal Paso Segundo Sector	4	123	21	30	0,24	1,42	0,55	0,004
CDA Canal Vila Vila	9	240	40	30	0,13	4,17	0,55	0,002
CDA Canal Ancocollo	8	135	23	30	0,22	2,34	0,55	0,004
CDA Canal Olivo Segundo Sector	8	168	28	30	0,18	1,94	0,55	0,003
CDA Canal Pacayane	4	84	14	30	0,36	1,46	0,55	0,007
CDA Canal Achacagua Seis	2	54	9	30	0,56	0,94	0,55	0,010
CDA Canal Achacagua Tres	3	66	11	30	0,45	1,15	0,55	0,008
CDA Canal Poroma	2	36	6	30	0,83	0,63	0,55	0,015
CDA Canal Calapajra	2	24	4	30	1,25	0,42	0,55	0,023
CDA Canal Achacagua Uno	2	90	15	60	0,67	3,13	1,10	0,012
CDA Canal Achacagua o Rinconada	4	72	12	30	0,42	1,25	0,55	0,008
CDA Canal Rancho	4	54	9	30	0,56	0,9	0,55	0,010
CDA Canal Chaco Chico	2	18	3	30	1,67	0,31	0,55	0,031
CDA Canal Sabayane Norte Uno	2	66	11	30	0,45	1,15	0,55	0,008
CDA Canal Pacayane Bajo	7	141	24	20	0,14	1,31	0,37	0,003
CDA Canal Rosasani	6	54	9	30	0,56	0,94	0,55	0,010
CDA Canal Sabayane Sur	2	30	5	20	0,67	0,35	0,37	0,012
Quebrada Chaca								
CDA Canal Vertiente de Chacarillas	5	61,4	10	20	0,33	1,22	0,37	0,006
CDA Canal Uno Poniente	2	168	28	40	0,24	5,83	0,73	0,004
CDA Canal Dos Poniente	2	168	28	40	0,24	5,83	0,73	0,004
CDA Canal Tres Poniente	11	398,5	66	30	0,08	10,38	0,55	0,001
CDA Canal Cinco Poniente	11	319,5	53	30	0,09	8,32	0,55	0,002
CDA Canal Seis Poniente	3	144	24	40	0,28	5,00	0,73	0,005
CDA Canal Cuatro Oriente	3	36	6	25	0,69	0,78	0,46	0,013
CDA Canal Tres Oriente	3	120	20	40	0,33	4,17	0,73	0,006
CDA Canal Dos Oriente	3	234	39	40	0,17	8,13	0,73	0,003
Totales Cuenca	517	10.754,9		2.295		230,0	42,0	

Tabla 6.47 DAA asociados a cuenca Q. Río Camarones. Fuente: elaboración a partir de Base de Comunidades.

Cuenca/Canal	Usuarios Originales (un)	Acciones (un)	Horas	Inscripción CBR		Dotación (l/s)	Dotación Hidrológica (85% Prob. Exc.)	
				Total (l/s)	Unitaria (l/s/acción)		Total (l/s)	Unitaria (l/s/acción)
Río Camarones / Río Camarones antes Junta Quebrada Chiza / Río Camarones entre E. Veco, R. Caritaya y Q. Chiza								
Quebrada de Camarones								
CDA Condumaya Cuatro	4	786	131	30	0,04	13,6	8,7	0,01
CDA Canal Umaxo Illapata	52	4.026	671	100	0,02	199,7	28,8	0,01
CDA Canal Amasaca Uno	2	420	70	30	0,07	8,8	8,7	0,02
CDA Canal Isla Uno	2	252	42	30	0,12	5,3	8,7	0,03
CDA Canal Amasaca Dos	8	936	156	50	0,05	32,5	14,4	0,02
CDA Canal Amasaca Tres	5	438	73	30	0,07	9,1	8,7	0,02
CDA Canal Taipitaque	11	636	106	50	0,08	27,6	14,4	0,02
CDA Canal Quebrada Tres	3	414	69	40	0,10	14,4	11,5	0,03
CDA Canal Ñequeñeque	9	726	121	50	0,07	25,2	14,4	0,02
CDA Canal Cortajima Dos	4	360	60	40	0,11	12,5	11,5	0,03
CDA Canal Isise Tres	3	228	38	30	0,13	3,96	8,7	0,04
CDA Canal Isise Cinco	5	276	46	30	0,11	7,2	8,7	0,03
CDA Canal Iquilta Uno	2	96	16	40	0,42	2,2	11,5	0,12
CDA Canal Iquilta Dos	5	420	70	30	0,07	7,3	8,7	0,02
CDA Canal Iquilta Tres	4	258	43	40	0,16	4,8	11,5	0,04
CDA Canal Iquilta Cuatro	7	324	54	40	0,12	9,0	11,5	0,04
CDA Canal Caruta Uno	4	552	92	30	0,05	11,5	8,7	0,02
CDA Canal Caruta Dos	5	1.104	184	30	0,03	23,0	8,7	0,01
CDA Canal Pampanune	5	702	117	30	0,04	18,3	8,7	0,01
CDA Canal Huancarane Dos	3	1.008	168	40	0,04	28,0	11,5	0,01
CDA Canal Huancarane Tres	4	1.224	204	40	0,03	34,0	11,5	0,01
CDA Canal Huancarane Cinco	2	1.080	180	40	0,04	30,0	11,5	0,01
CDA Canal Huancarane Nueve	3	510	85	20	0,04	4,7	5,8	0,01
CDA Canal Catinjagua Uno	3	1.230	205	20	0,02	17,1	5,8	0,005
CDA Canal Catinjagua Dos	4	930	155	15	0,02	9,7	4,3	0,005
CDA Canal Taltape	4	3.120	520	50	0,02	72,2	14,4	0,005
CDA Canal Humallane o Humallany	6	3.312	552	50	0,02	76,7	14,4	0,004
CDA Canal O'Higgins	7	3.528	588	50	0,01	81,7	14,4	0,004
CDA Canal de Las Casas	25	408	68	10	0,02	2,8	2,9	0,01
CDA Canal San Juan	3	2.064	344	50	0,02	71,7	14,4	0,01
CDA Canal Maquita	5	3.072	512	50	0,02	71,1	14,4	0,00
CDA Canal Chupisilca	4	1.080	180	50	0,05	37,5	14,4	0,01
CDA Canal Manuel Rodríguez	9	635	106	105	0,17	66,1	30,3	0,05
CDA Canal Carlos Ibáñez	28	796	133	105	0,13	83,0	30,3	0,04
Vertiente Cuatro								
CDA Canal Sahuara Vertiente Cuatro	7	100	(*)	0,86	0,01	(*)	0,2	0,002
Totales Cuenca	257	37.051,0		1.445,9		1.122,2	417,0	

Nota: (*) CDA no cuenta con horas de riego inscritas.

Tabla 6.48 DAA asociados a cuenca Río Caquena. Fuente: elaboración a partir de Base de Comunidades y Usuarios.

Cuenca/Fuente/Usuario	Inscripción CBR	Dotación Hidrológica (85% Prob. Exc.)
	Total (l/s)	Total (l/s)
Altiplánicas/entre límite Perú-Bolivia y río Lauca / río Caquena hasta frontera (río Cosapilla)		
Quebrada Jaillave		
Florentina Poma Paco y otros	57,5	36,10
Antonia Blanco Poma y otros	42,6	26,77
Quebrada Jaillave (2 vertientes)		
Antonia Blanco Poma y otros	2,0	1,23
Quebrada Jaillave , Vertiente Aquilanpucho		
Antonia Blanco Poma y otros	0,18	0,11
Florentina Poma Paco y otros	0,18	0,11
Quebrada Jaillave , Vertiente Pampa Pujo, Vertiente Bumokaka		
Antonia Blanco Poma y otros	3,70	2,32
Río Caamaña		
Ignacio Loyola Alave Blas y otros	77,85	48,92
Río Caquena		
Junta de vecinos no 6 Caquena	951,3	597,76
Junta de vecinos no 6 Guacoyo	58,0	36,44
Pedro Inquiltupa Caballero y otros	75,0	47,13
Vertiente Caquena		
Comunidad no organizada de los hijos de Pachica	43,5	27,33
Vertiente Chamulpujo		
Rosa Figueroa Yucra y otros	10,5	6,58
Vertiente Churichuto 1		
Aparicio López Pacasi y otros	0,22	0,14
Vertiente Kusambrito		
Aparicio López Pacasi y otros	0,14	0,09
Vertiente La Casa		
Dámaso Calle Poma y otra	0,54	0,34
Vertiente La Cueva		
Aparicio López Pacasi y otros	0,02	0,01
Vertiente Linco		
Donato Huaylla Tancara y otros	0,90	0,57
Vertiente Lipiche		
Aparicio López Pacasi y otros	0,06	0,04
Vertiente Nasacani		
Felisa López Apaz	12,9	8,11
Veriente Pujopeque chico		
Severo Llusco Yucra	2,4	1,51
Vertientes Chamuma 1 y 2		
Damaso Calle Poma y otra	1,55	0,97
Vertientes Isca Huaylla 1 y 2		
Damaso Calle Poma y otra	1,55	0,97
Vertientes Jiskalipiche		
Aparicio López Pacasi y otros	0,59	0,37
Vertientes Jupam Pujo y Tojgra Pucho		
Clementina Yucra Poma	0,77	0,48

Cuenca/Fuente/Usuario	Inscripción CBR	Dotación Hidrológica (85% Prob. Exc.)
	Total (l/s)	Total (l/s)
Vertientes Kacho Kacho y Huaylla Takhy		
Rafael Calle Mita y otros	16,8	10,57
Vertientes Malapharaji, Phojillaspa y Tulawinto		
Rafael Calle Mita y otros	8,8	5,54
Vertientes Manka Pujo y Chuwa Calane		
Clementina Yucra Poma	0,44	0,28
Vertientes Owija Jiwiña y Chayavinto		
Rafael Calle Mita y otros	4,32	2,71
Vertientes Pujopeque, Lipichejavira, Pasilancucho		
Comunidad indígena ganaderos San Juan de Caquena	23,6	14,83
Totales Cuenca	1.397,9	878,3

Tabla 6.49 DAA asociados a cuenca Ríos Uchusuma y Caquena. Fuente: elaboración a partir de Base de Comunidades y Usuarios.

Cuenca/Fuente/Usuario	Inscripción CBR	Dotación Hidrológica (85% Prob. Exc.)
	Total (l/s)	Total (l/s)
Altiplánicas/entre límite Perú-Bolivia y río Lauca / ríos Uchusuma, Colpas, Putani y Cosapilla		
Donato Huaylla Tancara y otros	15,4	15,46
Bernardo Flores Blas	6,3	6,33
Canales Challaque y Nillipujo		
Francisco Roberto Querquezana Tancara y otros	73,0	73,29
Quebrada Cuchillune		
Genaro Aurelio blas Mamani y otros	1,0	1,00
Rio Chislluma		
Comunidad indígena de Chislluma	249,5	250,49
Rio Floresciente		
Comunidad indígena Aymara de Putani	176,0	176,70
Rio Putani		
Comunidad indígena de Visviri	63,8	64,00
Comunidad indígena de Putani	255,0	256,02
Vertiente Tiña		
Wenceslao Chura Alberto	19,1	19,18
Vertiente Pojojalzo		
Celestino Flores Chura	15,8	15,86
Bernardo Maita Blas y otros	15,8	15,86
Totales Cuenca	874,9	878,3

Tabla 6.50 DAA asociados a cuenca Río Lauca. Fuente: elaboración a partir de Base de Comunidades y Usuarios.

Cuenca/Fuente/Usuario	Inscripción CBR	Dotación Hidrológica (85% Prob. Exc.)
	Total (l/s)	Total (l/s)
Altiplánicas/ río Lauca/ río Lauca antes río Guallatire		
2 vertientes		
Agustin Caris Mamani y otros	2,6	1,51
Cristobal Churata Alvarez y otros	0,88	0,51
3 vertientes		
Félix Caris Apas y otros	4,91	2,85
Rio Lauca		
Sociedad Contractual Minera Vilacollo	40	23,19
Epifanio Baltazar Caceres	3,65	2,12
Empresa eléctrica del Norte Grande S.A.	2.700	1.565
Rio Lauca, vertiente Isca Untupujo		
Mónica Alicia Guillermo Pairo	11,8	6,84
Yessica Lucia Guillermo Pairo	11,8	6,84
Fresia Elizabeth Guillermo Pairo	11,8	6,84
Eugenia Blanco Blanco	11,8	6,84
Héctor Eulogio Guillermo Blanco	11,8	6,84
Vertiente Callujiguanasta		
Florentina Poma Paco y otros	11,4	6,61
Vertiente Chaillavinto		
Cristobal Churata Alvarez y otros	1,3	0,75
Vertiente Charihuane		
Claudina Subieta Colque y otros	3,2	1,84
Vertiente Challapjulla		
Cristobal Churata Alvarez y otros	0,6	0,35
Vertiente Chiriguaya		
Joaquin Huanca Colque	15,0	8,70
Vertiente Coche Pata		
Féliz Caris Apas y otros	1,2	0,70
Vertiente Isca Untupujo		
Jorge Anastacio Guillermo Blanco	11,8	6,84
Solvia Leandra Guillermo Blanco	11,8	6,84
Julia Ayno Villca	3,0	1,74
Andres Cirilo Jimenez Mamani	2,0	1,16
Exequiel Guillermo Blanco	11,8	6,84
Carlos Guillermo Blanco	11,8	6,84

Cuenca/Fuente/Usuario	Inscripción CBR	Dotación Hidrológica (85% Prob. Exc.)
	Total (l/s)	Total (l/s)
Altiplánicas/ río Lauca/ río Lauca antes río Guallatire		
Adoplfo Guillemo Blanco	11,8	6,84
Mario Guillermo Blanco	11,8	6,84
Vertiente Moso Malla		
Félix Aris Apas y otros	0,3	0,17
Vertiente Paloncollo		
Florentina Poma Paco y otros	5,4	3,13
Vertiente Proa		
Raimundo Jimenez Sanchez	20	11,59
Vertiente Puquios		
Raimundo Jimenez Sanchez	15	8,70
Vertiente Remulinpujo y Cruzane		
Florentina Poma Paco y otros	5,6	3,25
Vertiente Takata		
Claudina Subieta Colque y otros	0,1	0,07
Vertiente Untuma		
Félix Caris Apas y otros	5,5	3,19
Vertiente Untupujo		
Vicente Guillermo Huanca	21	12,17
Jorge Anastacio Guillermo Blanco	21,0	12,17
Mirriam Jacqueline Guillermo Pairo	11,8	6,84
Vertientes Huayllane Grande y Chica		
Claudina Subieta Colque y otros	0,43	0,25
Vertientes Jalsuri y Pacupata		
Claudina Subieta Colque y otros	1,4	0,83
Vertiente Yaquer Pujo 1,2 y 3		
Alfredo López Pacasi y otros	0,07	0,04
Altiplánicas/ río Lauca/ río Lauca antes del río Guallatire y la Frontera		
Vertiente Vizella		
Edalia Lázaro	24,0	13,91
Vertiente Cirino Locaña		
Anselmo Sanchez Mollo	9,6	5,56
Vertiente Palco, quebrada Chipa, Sorasarane		
Richard Sanchez Condori	63,1	36,59
Totales Cuenca	3.123,9	1.810,8

6.2 Plataforma de Derechos de Aprovechamiento de Agua

Dentro del estudio "Análisis integral de soluciones a la escasez hídrica, Región de Arica y Parinacota" se ha requerido preparar una herramienta (plataforma) que permita una fácil y rápida comprensión de estas y que posibilite el ingreso de nuevas transacciones o derechos, para lo cual se ha utilizado la Teoría de Grafos, determinando la cadena de transferencias de un título vigente desde su origen.

Dentro de este contexto se ha preparado la siguiente metodología, de manera de comprender la problemática y entregar la solución conceptual antes de comenzar el proceso de programación.

6.2.1 Fundamentos Teóricos

6.2.1.1 Conceptos

La naturaleza del derecho que se ejercita, de acuerdo a la clasificación dada en el Código de Aguas, se distingue entre:

a) El derecho consuntivo: Faculta a consumir el total de las aguas en cualquier actividad.
b) No consuntivo: Permite el uso del agua sin consumirla y obligando a su restitución en la forma pactada.
c) Ejercicio permanente: Permite usar el agua en la dotación que corresponda, salvo que la fuente de abastecimiento no contenga la cantidad suficiente para satisfacerlos en su integridad caso en el cual se distribuye por partes o alícuotas.
d) Ejercicio eventual: Permite usar el agua en las épocas en que exista sobrante en la matriz luego de abastecer los derechos de ejercicio permanente.
e) Ejercicio continuo: Permite usar el agua en forma ininterrumpida las veinticuatro horas del día.
f) Ejercicio discontinuo: Permite usar el agua durante determinados periodos.

g) Ejercicio alternado: Permite usar el agua entre dos o más personas que se turnan sucesivamente.

6.2.1.2 Teoría de Grafos

Los grafos son estructuras discretas que constan de vértices y aristas que conectan entre sí esos vértices. Estos se diferencian entre sí por el tipo y el número de aristas que pueden conectar cada par de vértices. Un grafo simple G= (V, E) consta de V, un conjunto no vacío de vértices y de E, un conjunto de pares no ordenados de elementos distintos de V, denominados aristas.

Los grafos pueden ser de dos clases: dirigidos y no dirigidos. Un grafo dirigido G= (V, E) consta de un conjunto V de vértices y un conjunto E de aristas, que son pares ordenados de elementos de V. Se utiliza una flecha apuntando desde u hacia v para indicar la dirección de la arista (u, v). Mientras que, un en un grafo no dirigido, el par de vértices que representa un arco no está ordenado.

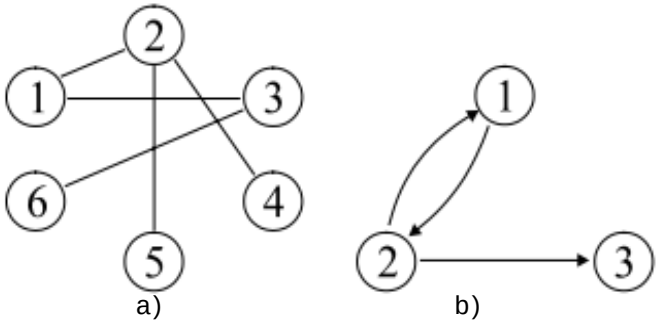


Figura 6.12 Ejemplo de grafo a) no dirigido y b) dirigido. Fuente: elaboración propia.

Los grafos permiten representar conjuntos de objetos arbitrariamente relacionados. Se puede asociar el conjunto de vértices con el conjunto de objetos y el conjunto de arcos con las relaciones que se establecen entre ellos.

REPRESENTACIÓN DE GRAFOS

Existen dos maneras básicas de representar los grafos: usando matrices de adyacencia y listas de adyacencia.

a) Matrices de adyacencia: Sea G= y sea n=|V|, decimos que el grafo G está implementado usando una matriz de adyacencia cuando la estructura de datos usada es una matriz, típicamente de booleanos, M[1…n; 1…n] de modo que (∀v, w∈V: M[v,w]=CIERTO ⇔ (v,w)∈E). Cada una de las filas de la matriz describe explícitamente si existe o no cada una de las n-1 posibles aristas que pueden llegar a incidir en un vértice.

Las matrices de adyacencia ofrecen un buen coste espacial y temporal para las operaciones habituales cuando el grafo es denso.

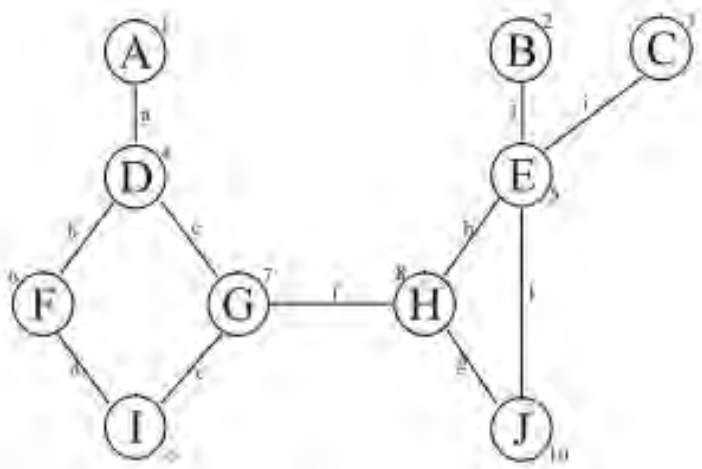


Figura 6.13 Ejemplo de Grafo no dirigido. Fuente: elaboración propia.

Si consideramos el grafo representado en la Figura 6.13, su representación matricial queda representada por:

Nodos		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	Existe	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	F	F
	Info	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	?	?

Arcos	Existe /Info	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	1	F/?	F/?	F/?	V/a	F/?	F/?	F/?	F/?	F/?	F/?		
	2	F/?	F/?	F/?	F/?	V/j	F/?	F/?	F/?	F/?	F/?		
	3	F/?	F/?	F/?	F/?	V/i	F/?	F/?	F/?	F/?	F/?		
	4	V/a	F/?	F/?	F/?	F/?	V/b	V/c	F/?	F/?	F/?		
	5	F/?	V/j	V/i	F/?	F/?	F/?	F/?	V/h	F/?	V/k		
	6	F/?	F/?	F/?	V/b	F/?	F/?	F/?	F/?	V/d	F/?		
	7	F/?	F/?	F/?	V/c	F/?	F/?	F/?	V/f	V/e	F/?		
	8	F/?	F/?	F/?	F/?	V/h	F/?	V/f	F/?	F/?	V/g		
	9	F/?	F/?	F/?	F/?	F/?	V/d	Ve	F/?	F/?	F/?		
	10	F/?	F/?	F/?	F/?	V/k	F/?	F/?	V/g	F/?	F/?		
	11												
	12												

Figura 6.14 Matriz de adyacencia del Grafo de la Figura 6.13. Fuente: elaboración propia.

b) Listas de adyacencia: En el caso de las listas, la estructura que se emplea para implementar un grafo G=(V,E) con n =|V|, es un vector L[1,…,n] tal que L[i], con $1 \leq i \leq n$, es una lista formada por los identificadores de los vértices que son adyacentes al vértice con identificador i. Si el grafo es dirigido, la lista está formada por los identificadores de los sucesores del vértice i.

Es conveniente usar listas de adyacencia para implementar el grafo cuando es poco denso y, sobre todo, cuando es necesario recorrerlo completamente.

Teniendo en cuenta el grafo de la Figura 6.13, su representación por medio de listas de adyacencia queda representada por:

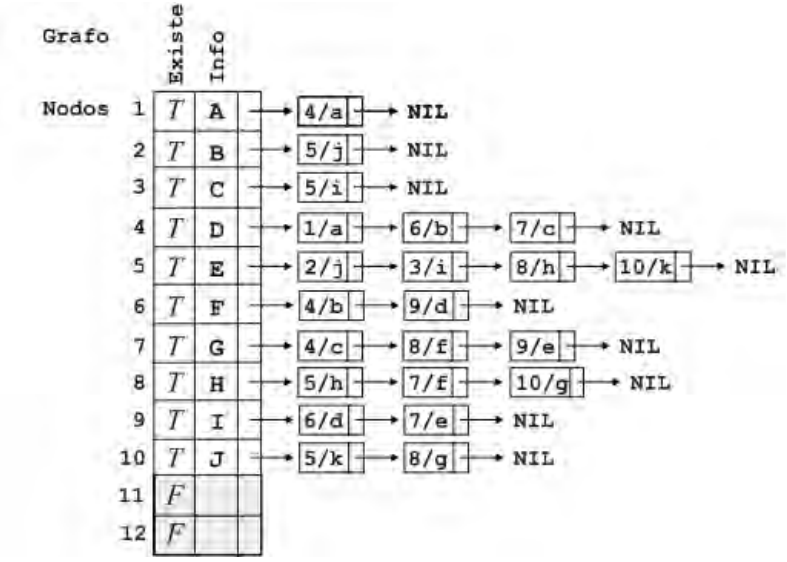


Figura 6.15 Lista de adyacencia del Grafo de la Figura 6.13. Fuente: elaboración propia.

6.2.2 Descripción de la Plataforma

6.2.2.1 Objetivo

El objetivo principal de la presente propuesta consiste en administrar y visualizar de forma dinámica las redes de transferencias de títulos de derechos de aprovechamiento de agua (DAA).

6.2.2.2 Requerimientos

La información necesaria para efectuar la inscripción es la siguiente:

a) Foja, Numero y Año del Título de DAA (Indicar si es persona natural o OUA)
b) Nombre y RUT del propietario del título de DAA
c) Fuente
d) Tipo de adquisición
e) Foja, Número y Año del Título que precede
f) Caudal o Acciones
g) Naturaleza del derecho (consuntivo/no consuntivo)
h) Ejercicio (permanente/eventual; superficial/subterráneo; continuo/discontinuo; alternado)
i) Resolución de la DGA y fecha de ésta.
j) Certificado

k) Observaciones

6.2.2.3 Características de la plataforma

Esencialmente, se empleará la Teoría de Grafos con la finalidad de determinar la cadena de transferencias de un título vigente desde su origen, de modo que permita tanto una comprensión sencilla de éstas, así como el ingreso de nuevas transacciones o derechos.

6.2.2.3.1 Bases de datos y lenguajes de programación óptimos

En relación a los lenguajes de programación, tanto Java como Python son excelentes y ampliamente adoptados. Sin embargo, en términos de portabilidad, Java posee una gran ventaja, ya que cualquier computador que pueda ejecutar una máquina virtual Java podrá ejecutar una aplicación en Java; mientras que, para ejecutar programas de Python, se necesita de un compilador que pueda convertir el código en Python a un código en que el sistema operativo que se emplea pueda procesar. De este modo, y gracias a la popularidad del uso de Java, al programar empleando este lenguaje se puede estar seguro que su aplicación podrá ser usada por casi todos los usuarios.

Por otro lado, en cuanto al gestor de base de datos a emplear, se destacan los de acceso libre: MySQL y PostgreSQL. Si bien, ambos gestores son excelentes, la elección de uno u otro depende de la finalidad de la aplicación en la cual se va a utilizar.

PostgreSQL se ha enfocado tradicionalmente en la fiabilidad, integridad de datos y características integradas enfocadas al desarrollador. Tiene un planificador de consultas extremadamente sofisticado, que es capaz de unir cantidades relativamente grandes de tablas eficientemente.

MySQL, por otra parte, se ha enfocado tradicionalmente en aplicaciones web de lectura mayormente, usualmente escritas en PHP, donde la principal preocupación es la optimización de consultas sencillas.

En general, sistemas en los que la velocidad y el número de accesos concurrentes sean algo primordial, y la seguridad no sea muy importante, se sugiere el uso de MySQL. En cambio, para sistemas más serios en las que la consistencia de la base de datos sea fundamental, PostgreSQL es una mejor opción pese a su mayor lentitud.

6.2.2.3.2 Base de Datos

El almacenamiento de la información, correspondiente a los títulos de DAA, se realizará en el programa MySQL o PostgreSQL, cuyo llenado podrá efectuarse cargando datos a partir de un archivo Excel, el cual deberá poseer una estructura determinada, o bien, a partir de los datos ingresados por el usuario. Si se opta por esta última opción, se permitirá verificar, inmediatamente, la existencia de algún error en la inscripción.

Para identificar individualmente cada inscripción, se asignará un código correspondiente a la concatenación de la Foja, Número y Año de la misma, lo cual permitirá efectuar consultas de fácil acceso al momento de emplear la plataforma.

De este modo, el problema de la transferencia de los títulos de DAA puede ser modelado mediante la Teoría de Grafos por medio de grafos dirigidos donde el código de las inscripciones corresponde a un vértice, las aristas indican la relación de transferencia que existe entre ellos y las flechas de las aristas señalan el sentido en que se realiza la transferencia.

6.2.2.3.3 Interfaz gráfica

La implementación de la plataforma será llevada a cabo por medio del programa Java, donde será posible el ingresar, modificar y eliminar transacciones o derechos, así como su visualización gráfica, por medio de la librería GraphStream, que permite una interacción dinámica de redes de varios tamaños (http://graphstream-project.org/).En el caso de la visualización gráfica, la simbología tentativa se detalla en la Tabla 6.51.

Tabla 6.51 Simbología tentativa para la visualización gráfica de la plataforma. Fuente: elaboración propia.

	Inscripción errónea, transfiere mayor cantidad de caudal o acciones de las que puede transferir o inscripción sin información de la inscripción que le precede.
	Título al que transfieren derechos proporcionales o que transfiere derechos proporcionales del título que precede, es decir no se sabe la cantidad exacta de acciones.
	Título con acciones vigentes, si tiene transferencias posteriores no transfiere la totalidad de las acciones.
	Título de dominio, mercedes de agua, estudio técnico de distribución de agua o constitución de organización de usuarios.
	Título transferido en su totalidad, sin acciones vigentes

De este modo, un ejemplo de red de títulos de DAA es el presentado en la Figura 6.16.

Figura 6.16 Ejemplo de red de títulos de DAA. Fuente: elaboración propia.

En este caso, la Fojas 123 N° 124 de 1990 trasfiere 2.25 acciones a la inscripción de Fojas 1 N° 1 del año 1991, de aquí se transfiere la totalidad de las acciones a la inscripción de Fojas 12 N° 15 de 1995, luego esta transfiere 1.25 acciones a la de Fojas 12 N°13 del 2000, y de aquí se transfiere una cantidad proporcional a la Foja 9 N° 12 de 2002.

La visualización generada corresponde, entonces, a las redes de mutaciones de los títulos desde la inscripción más antigua encontrada en el CBR y sus transferencias posteriores hasta llegar a la inscripción vigente, sin considerar las transferencias de las inscripciones que se encuentren entre la inscripción inicial y la final (vigente); y que no estén relacionadas con el título vigente, en el caso de que la inscripción vigente haya transferido parte de sus acciones a otras inscripciones, también son mostradas en la cadena de mutaciones. Un ejemplo de visualización de una cadena de mutaciones se adjunta a continuación.

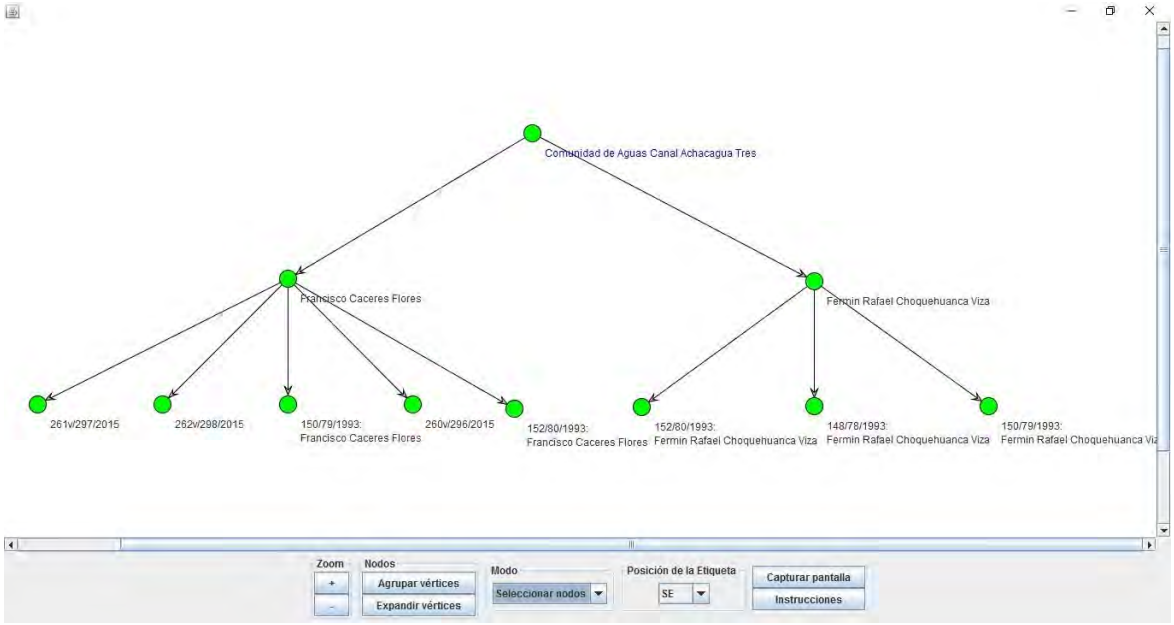


Figura 6.17 Ejemplo de visualización plataforma DAA. Fuente: elaboración propia.

La aplicación de la plataforma, cuenta con las siguientes características:

1. Base de datos (MySQL u otro) con todos los registros de los títulos de DAA.
2. Módulo para el ingreso de nuevos datos y para la actualización de los registros de DAA.
3. Visualización de redes de transferencias de DAA, de acuerdo a los requerimientos del usuario.
4. Identificación de títulos vigentes a una fecha determinada.
5. Identificación de casos de títulos de DAA que presentan problemas.
6. Identificación de usuarios que pueden acceder mediante el uso de una contraseña.

El manual de usuario de la plataforma de derechos de aprovechamiento de aguas se presenta en el Anexo IV.

6.3 Levantamientos de Demandas y Consumos

La demanda de los recursos hídricos, debido al desarrollo de la región de Arica y Parinacota, ha experimentado un crecimiento significativo en las últimas décadas, lo que ha provocado el surgimiento de problemas de escasez y deterioro de la calidad de las aguas. El levantamiento de las demandas reales tiene como objetivo conocer los usos y demandas de recursos hídricos tanto superficiales como subterráneos en cada cuenca de la región de Arica y Parinacota.

El establecimiento de las demandas reales está orientado a los fines del conocimiento actualizado de los usos y demandas en las cuencas (diagnóstico actual), tanto en aguas superficiales como subterráneas. Esta información es necesaria para conocer la distribución espacial y temporal del uso de los recursos hídricos regionales. Para ello se han identificado los usos históricos y actuales agrupados por los sectores de riego, agua potable, industria y minería. El levantamiento de la demanda real se realizó basándose en el Catastro Público de Aguas (CPA) de la DGA, de los expedientes del Conservador de Bienes y Raíces y de la campaña de terreno. Sin embargo, la estimación de las demandas actuales y futuras se ha basado en los antecedentes recopilados y revisados cuyas cifras se han revisado y actualizado en base al acontecer actual y las cifras de proyección de la región.

Las demandas para cada sector se diferencian por el uso de los recursos superficiales y subterráneos para la situación histórica y actual. Las demandas obtenidas y/o complementadas por métodos indirectos han sido concordantes con los datos obtenidos en terreno, distinguiendo los casos de los usos y la situación de derechos.

6.3.1 Catastro de captaciones de agua

El primer paso para realizar el levantamiento de la demanda de recursos hídricos fue analizar el Catastro Público de Aguas (CPA). El CPA es una base de datos que informa del número de expediente, el tipo de acuerdo a nomenclatura DGA, las coordenadas, el propietario, cuenca, subcuenca, subsubcuenca, naturaleza, el tipo de fuente, tipo de ejercicio del derecho, etc. La estructura definida en los campos y registros en el CPA presenta diferentes inconsistencias, entre las más frecuentes se encuentran la falta de información sobre el sistema de coordenadas, inexistencia de coordenadas, campos sin información, número de RUT que no corresponde con el propietario del derecho, entre

otras. A partir del análisis del CPA, la base de datos se modificó de la siguiente manera:

- se incluyeron nuevas coordenadas de derechos
- se corrigieron coordenadas preexistentes
- se transformaron todas las coordenadas a un solo sistema coordenado, al sistema de referencia UTM, Datum WGS 1984, Huso 19 Sur
- se comprobaron y corrigieron los números de RUT de los propietarios de los derechos
- se corrigieron y completaron los campos de fuente, tipo de DAA y naturaleza de un amplio número de derechos
- se corrigieron y homogeneizaron los nombres de las cuencas, subcuenca y subsubcuenca

Una vez realizado el análisis de los expedientes del CPA, se desarrolló una campaña de terreno para verificar *in situ* y definir las coordenadas de las captaciones que no presentaban ubicación en el CPA. En terreno, en las captaciones sin coordenadas del CPA, se rellenó la ficha que se presenta en la Figura 6.18 con el fin de completar el CPA de la DGA. En el Anexo V se muestra cada una de las fichas elaboradas en terreno. En la campaña de terreno se contactó a los propietarios o personas vinculadas con los propietarios de los 50 expedientes NR y 41 expedientes ND, sin embargo, sólo se consiguieron las coordenadas de 20 captaciones. No fue posible el acceso a numerosas captaciones debido a conflictos internos en las Comunidades, litigios con la DGA, no conseguir ubicar al propietario por diversas razones, entre otras causas. Por otro lado, hay captaciones que están en proceso de autorización para acceder a tomar las coordenadas y características de la captación. En la Tabla 6.52 se resume la situación de cada expediente NR evaluado en terreno y en la Tabla 6.53 los expedientes ND.

DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS - MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS

ANÁLISIS INTEGRAL DE SOLUCIONES A LA ESCASEZ HÍDRICA, REGIÓN DE ARICA Y PARINACOTA

Antecedentes Propietario			
Nombre del propietario			
Nombre del predio		Rol S.I.I	
Nombre del entrevistado		Cargo	

Antecedentes Captación									
Tipo de uso		☐	Riego	☐	Potable	☐	Industria	☐	Minería
Subterránea	☐	Tipo		UTM N		UTM E		Cota	
Superficial	☐	Tipo		UTM N		UTM E		Cota	

Antecedentes Pozo (Captación Subterránea)					
Profundidad [m]			Fecha de construcción		
Diámetro "			Estado		
Nivel estático [m]		Fecha/Hora		Observaciones	
Nivel dinámico [m]		Stick Up [cm]			
Equipo de bombeo	Motor			Bomba	
	Tipo			Tipo	Marca
	Potencia [Hp]			Capacidad nominal	

Antecedentes Captación Superficial					
Ancho [m]			Fecha de construcción		
Alto (m)			Estado		
Nivel de Agua [m]		Fecha/Hora		Observaciones	
Caudal (l/s)		Tipo			

Régimen de uso			
Mes/Año		Periodo de uso	
Días/Mes		Caudal l/s	
Horas/día		Eficiencia	

Antecedentes Prediales									
Superficie regada, fuente superficial		Superficie regada, fuente subterránea		Superficie sin riego, regable		Superficie sin riego, no regable		Superficie Total	
Año	[ha]	Año	[ha]	Año	[ha]	Año	[ha	Año	[ha]

Observaciones		
	Crisis por escasez	
	Crisis por abundancia	

División predial			
	Norte	Este	
	Sur	Oeste	

Esquema división predial

Figura 6.18 Ficha catastro de captaciones. Fuente: elaboración propia.

Tabla 6.52 Resumen de la situación del catastro de Expedientes NR de las captaciones sin coordenadas en el CPA. Fuente: elaboración propia.

Expediente	Nombre Propietario	Catastro	Cuenca	Natura-leza	Tipo fuente	Tipo DAA	Tipo ejercicio	Q otorg	Unidad Vol.	Tipo Captación
NR-101-5	Ismael Alata Viza	Esperando autorización	Río Camarones	Sup	Manantial	Con	Perm y Cont	Sin Infor.	l/s	Manantial
NR-101-5	Ismael Alata Viza	Esperando autorización	Río Camarones	Sup	Manantial	Con	Perm y Cont	Sin Infor.	l/s	Manantial
NR-101-5	Ismael Alata Viza	Esperando autorización	Río Camarones	Sup	Manantial	Con	Perm y Cont	Sin Infor.	l/s	Manantial
NR-101-8	Héctor Vílchez Zarate	Esperando autorización	Río Camarones	Sup	Río	Con	Perm y Cont	20	l/s	Río
NR-101-177	Suc. Armando Lombardi Grassano	Litigio con la DGA	Río San José	Sub	Acuífero	Con	Perm y Cont	Sin Infor.	l/s	Pozo
NR-101-177	Suc. Armando Lombardi Grassano	Litigio con la DGA	Río San José	Sub	Acuífero	Con	Perm y Cont	Sin Infor.	l/s	Pozo
NR-101-177	Suc. Armando Lombardi Grassano	Litigio con la DGA	Río San José	Sub	Acuífero	Con	Perm y Cont	Sin Infor.	l/s	Pozo
NR-101-183	Alfredo Gutiérrez Cerda	No se pudo catastrar	Río San José	Sub	Acuífero	Con	Perm y Cont	20	l/s	Pozo
NR-101-186	Sociedad Agrícola y Comercial Pablo Lagos	No se pudo catastrar	Río San José	Sub	Acuífero	Con	Perm y Cont	Sin Infor.	l/s	Pozo
NR-101-191	Marko Gardilcic Balarín y otro	Esperando autorización	Río San José	Sub	Acuífero	Con	Perm y Cont	30	l/s	Pozo
NR-101-191	Marko Gardilcic Balarín y otro	Esperando autorización	Río San José	Sub	Acuífero	Con	Perm y Cont	20	l/s	Pozo
NR-101-191	Marko Gardilcic Balarín y otro	Esperando autorización	Río San José	Sub	Acuífero	Con	Perm y Cont	35	l/s	Pozo
NR-101-196	Hugo Mozo Weguelin	Conflicto familiar, Ficha Anexo V, Ficha Anexo V	Río San José	Sub	Acuífero	Con	Perm y Cont	Sin Infor.	l/s	Pozo
NR-101-196	Hugo Mozo Weguelin	Conflicto familiar, Ficha Anexo V	Río San José	Sub	Acuífero	Con	Perm y Cont	Sin Infor.	l/s	Pozo
NR-101-196	Hugo Mozo Weguelin	Conflicto familiar, Ficha Anexo V	Río San José	Sub	Acuífero	Con	Perm y Cont	Sin Infor.	l/s	Pozo
NR-101-196	Hugo Mozo Weguelin	Conflicto familiar, Ficha Anexo V	Río San José	Sub	Acuífero	Con	Perm y Cont	Sin Infor.	l/s	Pozo
NR-101-204	Agrícola Lombardi S.A	Litigio con la DGA	Río San José	Sub	Acuífero	Con	Perm y Cont	27,5	l/s	Pozo
NR-101-204	Agrícola Lombardi S.A	Litigio con la DGA	Río San José	Sub	Acuífero	Con	Perm y Cont	7,2	l/s	Pozo
NR-101-215	Eda Carbone Rocco	Litigio con la DGA, Conflicto familiar, Ficha Anexo V	Río San José	Sub	Acuífero	Con	Perm y Cont	Sin Infor.	l/s	Pozo
NR-101-216	Amadeo Carbone Henry	Litigio con la DGA, Ficha Anexo V	Río San José	Sub	Acuífero	Con	Perm y Cont	33	l/s	Pozo
NR-101-217	Amadeo Ferrera Carbone y otros	Litigio con la DGA	Río San José	Sub	Acuífero	Con	Perm y Cont	15,29	l/s	Pozo

Expediente	Nombre Propietario	Catastro	Cuenca	Natura-leza	Tipo fuente	Tipo DAA	Tipo ejercicio	Q otorg	Unidad Vol.	Tipo Captación
NR-101-222	Miloslav Gardilcic Bock	Esperando autorización	Río San José	Sub	Acuífero	Con	Perm y Cont	3	l/s	Pozo
NR-101-224	Antonio Gardilcic Boero	Esperando autorización	Río San José	Sub	Acuífero	Con	Perm y Cont	Sin Infor.	l/s	Pozo
NR-101-225	Roxana Gardilcic Boero	Esperando autorización	Río San José	Sub	Acuífero	Con	Perm y Cont	Sin Infor.	l/s	Pozo
NR-101-403	Lido Carbone Salinas	Litigio con la DGA, Ficha Anexo V	Río San José	Sub	Acuífero	Con	Perm y Cont	30	l/s	Pozo
NR-101-410	Comunidad de Aguas Canal Azapa	Conflicto interno de la Comunidad	Río San José	Sup	Canal	Con	Event y Cont	Sin Infor.	l/s	Canal
NR-101-410	Comunidad de Aguas Canal Azapa	Conflicto interno de la Comunidad	Río San José	Sup	Canal	Con	Event y Cont	Sin Infor.	l/s	Canal
NR-101-410	Comunidad de Aguas Canal Azapa	Conflicto interno de la Comunidad	Río San José	Sup	Canal	Con	Event y Cont	Sin Infor.	l/s	Canal
NR-101-410	Comunidad de Aguas Canal Azapa	Conflicto interno de la Comunidad	Río San José	Sup	Canal	Con	Event y Cont	Sin Infor.	l/s	Canal
NR-101-410	Comunidad de Aguas Canal Azapa	Conflicto interno de la Comunidad	Río San José	Sup	Canal	Con	Event y Cont	Sin Infor.	l/s	Canal
NR-101-410	Comunidad de Aguas Canal Azapa	Conflicto interno de la Comunidad	Río San José	Sup	Canal	Con	Event y Cont	Sin Infor.	l/s	Canal
NR-101-583	Asociación de Regantes de Villa Frontera	Desapareció la Asociación de Regantes de Villa Frontera. Actualmente es APR Villa Frontera que no tiene derecho de agua	Río Lluta	Sub	Acuífero	Con	Perm y Cont	25,8	l/s	Pozo
NR-101-584	Asociación de Regantes de Villa Frontera	Desapareció la Asociación de Regantes de Villa Frontera. Actualmente es APR Villa Frontera que no tiene derecho de agua	Río Lluta	Sub	Acuífero	Con	Perm y Cont	55,2	l/s	Pozo
NR-101-595	Sociedad de Cooperación Agrícola Sobraya Ltda.	Sociedad disuelta, no vigente	Río San José	Sub	Acuífero	Con	Perm y Cont	50	l/s	Pozo
NR-101-595	Sociedad de Cooperación Agrícola Sobraya Ltda.	Sociedad disuelta, no vigente	Río San José	Sub	Acuífero	Con	Perm y Cont	50	l/s	Pozo
NR-102-14	Asociación Gremial de Agricultores de Murmutani	No se pudo catastrar	Río San José	Sup	Vertiente	Con	Perm y Cont	Sin Infor.	l/s	Vertiente
NR-102-22	Junta Vecinal n°6 Caquena	En proceso de autorización	Altiplánica	Sup	Río	Con	Perm y Cont	951,33	l/s	Río
NR-102-22	Junta Vecinal n°6 Caquena	En proceso de autorización	Altiplánica	Sup	Río	Con	Perm y Cont	80	l/s	Río
NR-102-24	Junta Vecinal n°7 Parinacota Chucuyo	Ficha Anexo V	Altiplánica	Sup	Río	Con	Perm y Cont	Sin Infor.	Acciones	Río
NR-1501-115	Comunidad Indígena de Pachica	En proceso de autorización	Sin Infor.	Sup	Sin Infor.	Con	Perm y Cont	Sin Infor.	l/s	Sin Infor.
NR-1501-1520	Cooperativa Agrícola Doctor Juan Noé Crevani Ltda.	Ficha Anexo V	Río San José	Sub	Acuífero	Con	Perm y Cont	40	l/s	Pozo
NR-1501-1520	Cooperativa Agrícola Doctor Juan Noé Crevani Ltda.	Ficha Anexo V	Río San José	Sub	Acuífero	Con	Perm y Cont	40	l/s	Pozo
NR-1501-1520	Cooperativa Agrícola Doctor Juan Noé Crevani Ltda.	Ficha Anexo V	Río San José	Sub	Acuífero	Con	Perm y Cont	45	l/s	Pozo

Expediente	Nombre Propietario	Catastro	Cuenca	Natura-leza	Tipo fuente	Tipo DAA	Tipo ejercicio	Q otorg	Unidad Vol.	Tipo Captación
NR-1501-1520	Cooperativa Agrícola Doctor Juan Noé Crevani Ltda.	Ficha Anexo V	Río San José	Sub	Acuífero	Con	Perm y Cont	45	l/s	Pozo
NR-1501-1520	Cooperativa Agrícola Doctor Juan Noé Crevani Ltda.	Ficha Anexo V	Río San José	Sub	Acuífero	Con	Perm y Cont	40	l/s	Pozo
NR-1501-1520	Cooperativa Agrícola Doctor Juan Noé Crevani Ltda.	Ficha Anexo V	Río San José	Sub	Acuífero	Con	Perm y Cont	40	l/s	Pozo
NR-1501-1520	Cooperativa Agrícola Doctor Juan Noé Crevani Ltda.	Ficha Anexo V	Río San José	Sub	Acuífero	Con	Perm y Cont	40	l/s	Pozo
NR-1501-1520	Cooperativa Agrícola Doctor Juan Noé Crevani Ltda.	Ficha Anexo V	Río San José	Sub	Acuífero	Con	Perm y Cont	40	l/s	Pozo
NR-1501-1521	Comunidad no organizada de los Hijos de Pachica	En proceso de autorización	Río Camarones	Sup	Vertiente	Con	Perm y Cont	15	l/s	Vertiente
NR-1501-1521	Comunidad no organizada de los Hijos de Pachica	En proceso de autorización	Río Camarones	Sup	Vertiente	Con	Perm y Cont	10	l/s	Vertiente
NR-1501-1521	Comunidad no organizada de los Hijos de Pachica	En proceso de autorización	Río Camarones	Sup	Vertiente	Con	Perm y Cont	1	l/s	Manantial
NR-1501-1521	Comunidad no organizada de los Hijos de Pachica	En proceso de autorización	Río Camarones	Sup	Manantial	Con	Perm y Cont	4	l/s	Manantial
NR-1501-1521	Comunidad no organizada de los Hijos de Pachica	En proceso de autorización	Río Camarones	Sup	Vertiente	Con	Perm y Cont	6	l/s	Vertiente
NR-1501-1521	Comunidad no organizada de los Hijos de Pachica	En proceso de autorización	Río Camarones	Sup	Manantial	Con	Perm y Cont	3,5	l/s	Manantial
NR-1501-1521	Comunidad no organizada de los Hijos de Pachica	En proceso de autorización	Río Camarones	Sup	Manantial	Con	Perm y Cont	4	l/s	Manantial

Naturaleza: Sub (subterránea), Sup (Superficial).

Tipo DAA: Con (Consuntivo), No Con (No Consuntivo).

Tipo Ejercicio: Perm (Permanente), Cont (Continuo), Disc (Discontinuo), Event (Eventual).

No Información: No Inf.

Tabla 6.53 Resumen de la situación del catastro de Expedientes ND de las captaciones sin coordenadas en la CPA. Fuente: elaboración propia.

Expediente	Nombre Propietario	Catastro	Cuenca	Naturaleza	Tipo Fuente	Tipo DAA	Tipo Ejercicio	Q otorg l/s	Tipo Captación
ND-101-2	Cooperativa Agrícola Doctor Juan Noé	Ficha Anexo V	Río San José	Sub	Acuífero	Con	Perm y Cont	No Infor	Pozo
ND-101-2	Cooperativa Agrícola Doctor Juan Noé	Ficha Anexo V	Río San José	Sub	Acuífero	Con	Perm y Cont	No Infor	Pozo
ND-101-2	Cooperativa Agrícola Doctor Juan Noé	Ficha Anexo V	Río San José	Sub	Acuífero	Con	Perm y Cont	No Infor	Pozo
ND-101-2	Cooperativa Agrícola Doctor Juan Noé	Ficha Anexo V	Río San José	Sub	Acuífero	Con	Perm y Cont	No Infor	Pozo
ND-101-65	Empresa de Servicios Sanitarios de Tarapacá S.A	Litigio con la DGA	Río San José	Sub	Acuífero	Con	Perm y Cont	20	No Inf.
ND-101-65	Empresa de Servicios Sanitarios de Tarapacá S.A	Litigio con la DGA	Río San José	Sub	Acuífero	Con	Perm y Cont	No Infor	No Inf.
ND-101-120	Empresa de Servicios Sanitarios de Tarapacá S.A	Litigio con la DGA	Río San José	Sub	Acuífero	Con	Perm y Cont	No Infor	No Inf.
ND-101-120	Gian Lombardi Fiora del Fabro	Litigio con la DGA	Río San José	Sub	Acuífero	Con	Perm y Cont	No Infor	Sondaje
ND-101-128	Asociación de Regantes de Villa Frontera	Desapareció la Asociación de Regantes de Villa Frontera. Actualmente es APR Villa Frontera que no tiene derecho de agua.	Río Lluta	Sub	Acuífero	Con	Perm y Cont	No Infor	Pozo
		Ficha Anexo V							
ND-101-128	Asociación de Regantes de Villa Frontera	Desapareció la Asociación de Regantes de Villa Frontera. Actualmente es APR Villa Frontera que no tiene derecho de agua	Río Lluta	Sub	Acuífero	Con	Perm y Cont	No Infor	Pozo
ND-101-136	Aldo Lombardi	Litigio con la DGA	Río San José	Sub	Acuífero	Con	Perm y Cont	No Infor	Pozo
ND-101-181	Sucesión Armando Lombardi Grassano	Litigio con la DGA	Río San José	Sub	Acuífero	Con	Perm y Cont	No Infor	Pozo
ND-101-182	Marko Gardilcic Balarín y otro	Esperando autorización	Río San José	Sub	Acuífero	Con	Perm y Cont	No Infor	Pozo
ND-101-185	Marko Gardilcic Balarín y otro	Esperando autorización	Río San José	Sub	Acuífero	Con	Perm y Cont	No Infor	Pozo
ND-101-185	Marko Gardilcic Balarín y otro	Esperando autorización	Río San José	Sub	Acuífero	Con	Perm y Cont	No Infor	Pozo
ND-101-406	Comunidad de Aguas Canal Azapa	Conflicto interno de la Comunidad	Río San José	Sup	Río	No Inf.	Event y Disc	No Infor	Canal
ND-101-426	Asociación de Regantes de Villa Frontera	Desapareció la Asociación de Regantes de Villa Frontera. Actualmente es APR Villa Frontera que no tiene derecho de agua	Río Lluta	Sub	Acuífero	Con	Perm y Cont	No Infor	Pozo

Expediente	Nombre Propietario	Catastro	Cuenca	Naturaleza	Tipo Fuente	Tipo DAA	Tipo Ejercicio	Q otorg l/s	Tipo Captación
ND-101-561	Inmobiliaria Acuña de Arica	No se pudo catastrar	Río Lluta	Sup	Río	Con	Event y Cont	No Infor	Rio
ND-101-561	Inmobiliaria Acuña de Arica	No se pudo catastrar	Río Lluta	Sup	Río	Con	Event y Cont	No Infor	Rio
ND-101-1010	Hernán Fisher Elorza	No se pudo catastrar	Qda. Concordia	Sub	Acuífero	Con	Perm y Cont	No Infor	Noria
ND-101-1011	Alfredo Gutiérrez Cerda	No se pudo catastrar	Qda. Concordia	Sub	Acuífero	Con	Perm y Cont	No Infor	Pozo
ND-101-1015	Sociedad Báez Troncoso Ltda.	Ficha Anexo V	Río San José	Sub	Acuífero	Con	Perm y Cont	No Infor	Sondaje
ND-101-1016	Sabino Báez Cifuentes	Esperando autorización	Río San José	Sub	Acuífero	Con	Perm y Cont	No Infor	Pozo
ND-101-1079	Procesadora Metales Ltda. y Cía. Cpa.	Litigio con la DGA	Río Lluta	Sub	Acuífero	Con	Perm y Cont	30	No Inf.
ND-101-1161	Pablo Rodríguez Lamilla	No se pudo catastrar	Qda. Concordia	Sub	Acuífero	Con	Perm y Disc	No Infor	Noria
ND-101-1171	Raquel del Carmen Calleja Munizaga	Litigio con la DGA	Qda. Concordia	Sub	Acuífero	Con	Perm y Disc	No Infor	Sondaje
ND-101-1186	Aldeas Infantiles S.O.S.	Ficha Anexo V	Río San José	Sub	Acuífero	Con	Perm y Cont	No Infor	Pozo
ND-101-1319	Julia Centella Huanca	No se pudo catastrar	Río San José	Sub	Acuífero	Con	Perm y Cont	No Infor	Pozo
ND-101-1465	Mystique S.A	En proceso de autorización	Costeras R. San José- Q. Camarones	Sup	Acuífero	Con	Perm y Cont	No Infor	Pozo
ND-102-11	Asociación Indígena de Agricultores de Murmuntani	No se pudo catastrar	Río Lluta	Sup	Vertiente	Con	Perm y Cont	No Infor	Vertiente
ND-102-11	Asociación Indígena de Agricultores de Murmuntani	No se pudo catastrar	Río Lluta	Sup	Vertiente	Con	Perm y Cont	No Infor	Vertiente
ND-102-234	Juan Inquiltupa Mamani	No se pudo catastrar	Altiplánica	Sup	Río	No Con	Perm y Cont	No Infor	Rio
ND-102-1198	Comité de Agua Potable Rural de Zapahuira	Litigio con la DGA, Ficha Anexo V	Río San José	Sub	Acuífero	Con	Perm y Cont	No Infor	Dren
ND-102-1199	Comité de Agua Potable Rural de Zapahuira	Litigio con la DGA, Ficha Anexo V	Río San José	Sub	Acuífero	Con	Perm y Cont	No Infor	Dren
ND-102-1215	Comité de Agua Potable Rural de Zapahuira	Litigio con la DGA, Ficha Anexo V	Río San José	Sub	Acuífero	Con	Perm y Cont	No Infor	Dren
ND-1501-106	Sociedad Alimentos Finos Rila-Chile Ltda.	Litigio con la DGA	Río Lluta	Sub	Acuífero	No Con	Perm y Cont	No Infor	Noria
ND-1501-135	Sociedad Alimentos Finos Rila-Chile Ltda.	Litigio con la DGA	No Inf.	Sub	Acuífero	No Inf.	Perm y Cont	No Infor	No Inf.
ND-1502-7	Hidro Turrusta S.A.	Litigio con la DGA	No Inf.	Sup	No Inf.	No Inf.	Perm y Cont	No Infor	No Inf.
ND-1502-7	Hidro Turrusta S.A.	Litigio con la DGA	No Inf.	Sup	No Inf.	No Inf.	Event y Cont	No Infor	No Inf.

Expediente	Nombre Propietario	Catastro	Cuenca	Naturaleza	Tipo Fuente	Tipo DAA	Tipo Ejercicio	Q otorg l/s	Tipo Captación
ND-1502-142	E-Cl S.A. Empresa Eléctrica del Norte Grande S.A.(EDELNOR)	Autorizado, datos en COMCA	No Inf.	Sup	No Inf.	No Inf.	Perm y Cont	No Infor	No Inf.
ND-1502-1516	Comité de Agua Potable Rural de Zapahuira	Litigio con la DGA, Ficha Anexo V		Sup	Quebrada	Con	Perm y Cont	No Infor	

Naturaleza: Sub (subterránea), Sup (Superficial).

Tipo DAA: Con (Consuntivo), No Con (No Consuntivo).

Tipo Ejercicio: Perm (Permanente), Cont (Continuo), Disc (Discontinuo), Eventual (Event).

No Información: No Inf.

Después de corregir y completar tanto en gabinete como en terreno la base de datos de la DGA, se volvió a analizar la información existente. Finalmente, del total de los derechos solicitados (2.958) se obtuvieron las coordenadas de todos menos de 341 solicitudes de derechos. En la Tabla 6.54 se resume el número total de cada tipo de solicitud de derechos, cuantos no tienen coordenadas y el porcentaje que representan las solicitudes de derechos sin coordenadas respecto al total. Por otro lado, en el Anexo V se describen incongruencias que existen en la base de datos

Tabla 6.54 Resumen de los expedientes de la CPA de la DGA con y sin coordenadas geográficas. Fuente: elaboración propia.

Tipo de solicitud derecho	Número total	Sin coordenadas	Porcentaje sin coordenadas (%)
ND	1.163	110	9,45
NR	1.401	129	9,20
NC	278	102	36
VPC	116	0	0

En la Figura 6.19 se presenta la ubicación de los expedientes de aprovechamiento de aguas (ND), de regularización de derechos de aprovechamiento de aguas (NR), de organización de comunidades de aguas (NC) y de cambio de punto de captación y/o de restitución (VPC).

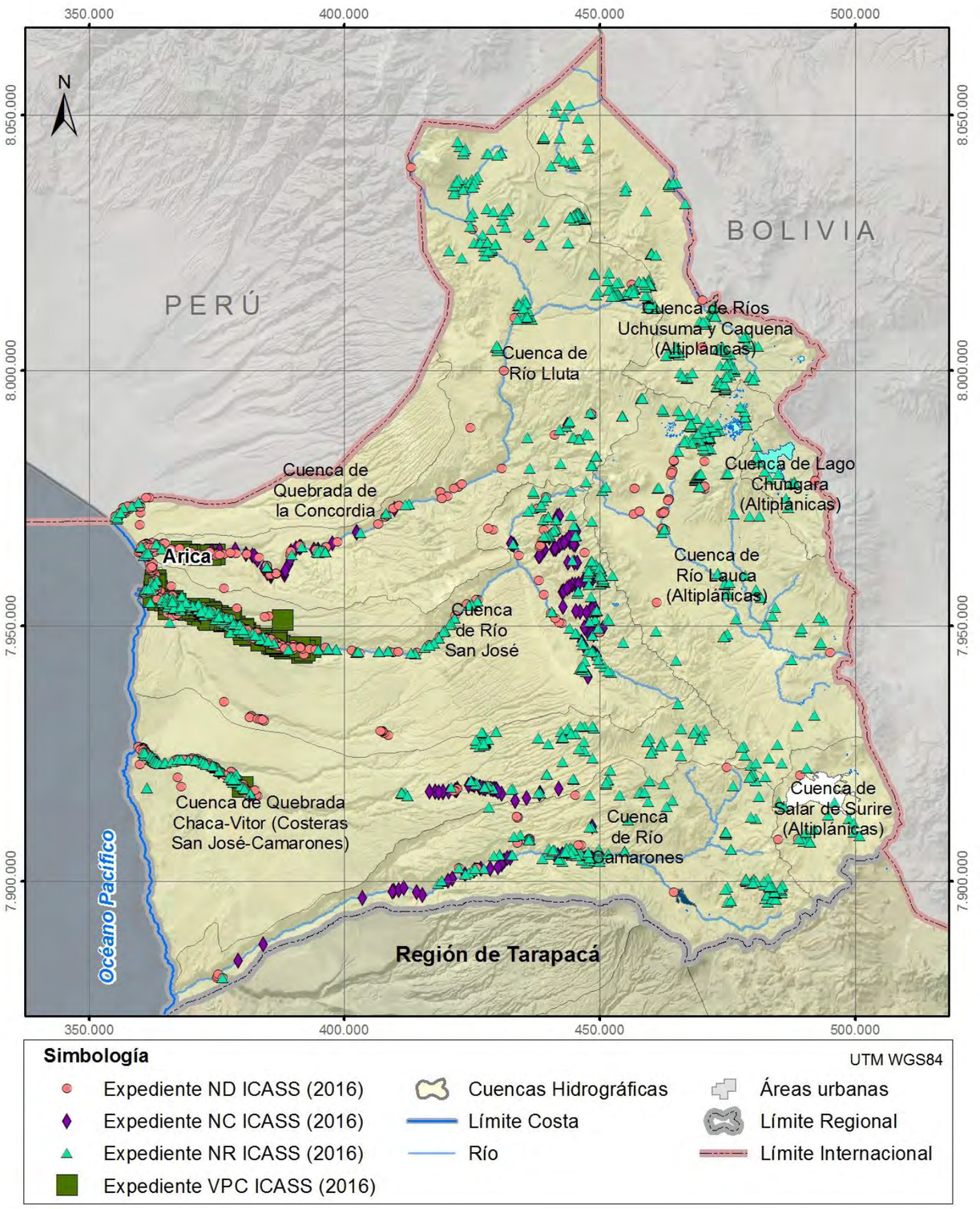


Figura 6.19 Ubicación de los expedientes ND, NR, NC y (VPC) de la región de Arica y Parinacota. Fuente: elaboración propia.

6.3.2 Demandas reales

6.3.2.1 Antecedentes

Para la preparación de la demanda real actual y futura se cuentan con varios antecedentes, los que se han revisado y comentado en el capítulo 5.

En el estudio de "Análisis uso actual y futuro de los recursos hídricos de Chile" (IPLA, 1996) se identifican y evalúan las demandas actuales (1993) y futuras con una proyección al año 2017. Los usos para los cuales se determinó la demanda son los siguientes: agrícola, agua potable, energía eléctrica, industrial y minería. Al final del cálculo de demandas se incluyó un balance hidrológico entre las demandas y los recursos. Las cuencas para las cuales se determinó el uso son para las cuencas: altiplánicas, del río Lluta y del río San José.

En el estudio de "Análisis y determinación de caudales de reserva para abastecimiento de la población y usos de interés nacional (AC ING. y AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS, 2006) se identificaron las posibles fuentes de recursos hídricos tanto superficiales como subterráneas susceptibles de reservar para el abastecimiento de la población, así como para aquellos asociados a circunstancias excepcionales y de interés nacional, en concordancia con la Ley Nº 20.017. Para desarrollar dicho objetivo se cumplieron adicionalmente un conjunto de objetivos específicos, los cuales corresponden a: Identificar zonas del territorio nacional con déficit de abastecimiento para la población actual y futura, así como aquellas zonas que no cuentan con las fuentes o medios para abastecer la población; Cuantificar las necesidades hídricas de la población que no dispone de medios para abastecer su demanda actual y futura; Identificar sectores con desarrollo o cuyo desarrollo sea de interés nacional, y a partir de ello cuantificar los requerimientos hídricos para dichos sectores. El estudio abarca todas las regiones del país. Sin embargo, en cada región se levantan los Planes de Desarrollo Sanitario, así como la cobertura de Agua Potable Rural y la necesidad de agua en cada localidad. Así mismo se presentan las áreas de interés nacional. Como resultado final por cada región se presentan las localidades con necesidad hídrica, y la selección de éstas como interés nacional.

En el estudio de "Estimaciones de Demanda de Agua y Proyecciones Futuras. Zona I Norte. Regiones I a IV" (AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS, 2007) se actualizó la

información del estudio IPLA (1996), para obtener una visión completa de la situación del uso actual de los recursos hídricos. Dentro de éste se incluyó un capítulo de Análisis del Uso Actual de los Recursos Hídricos, donde se caracterizaron las demandas asociadas a cada sector, a nivel de cuencas y subcuencas en cada región. También se incluyó un capítulo de Proyecciones de la Demanda por Sectores, que corresponde a la estimación de las demandas futuras por sector, para horizontes de 10 y 25 años, también a nivel de cuencas y subcuencas en cada región.

La "Estrategia Regional de Desarrollo, Región de Arica y Parinacota" (GORE ARICA Y PARINACOTA, 2009) fue elaborada por la Universidad de Tarapacá de Arica a solicitud del Gobierno Regional de Arica y Parinacota. En éste se realizó una revisión de los informes de organismos internacionales especializados en cada materia, se ordenaron en nueve grandes propósitos temáticos que denominaron Objetivos Estratégicos. Después se definieron lineamientos, que se fueron decantando hasta la priorización definitiva, donde el ordenamiento ya no se hace por sector, si no por desafío a enfrentar.

En el "Plan de Acción Estratégico para el Desarrollo Hídrico de la región de Arica y Parinacota" DGA (2010) se realizó un diagnóstico de la situación de los recursos hídricos en las distintas cuencas de la región y se planteó un plan de acciones estratégicas y soluciones estructurales con el objetivo de aliviar la disponibilidad y seguridad de abastecimiento del agua en el corto plazo, revertir el déficit en un mediano plazo y mantener la sustentabilidad en el largo plazo.

En el estudio de "Apoyo técnico para la mesa regional del agua en la región de Arica y Parinacota, y desarrollo de estrategias regionales del recurso hídrico" (UTA-DGA, 2010a) se caracterizó el agua de riego, el clima y los suelos del valle del Bajo Lluta.

En la "Actualización Planes de Desarrollo. Rev. A. Abr-2016" (Aguas del Altiplano, 2016) se entregan las demandas actualizadas de agua potable de los sectores operacionales de Arica, específicamente en los sectores de Valle de Lluta, Valle de Azapa y Ciudad, así como las demandas proyectadas de éstas, para los sistemas de producción de Lluta, Azapa y Ciudad.

6.3.2.2 Demandas actuales

Las demandas actuales en la XV Región se encuentran dadas principalmente por la importancia que tienen dentro de la economía y que está dada por las actividades agropecuarias, agrícola o riego, agua potable o sanitaria, industria y minería, además de la demanda evaporativa y evapotranspirativa que constituyen algunas masas de agua de agua libre y la vegetación respectivamente.

Las demandas actuales se han estimado por cuenca en base a los antecedentes anteriores, específicamente al de AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (2007), al de Aguas del Altiplano (2016) y otros. El detalle de la estimación de las demandas por cuencas se presenta a continuación. Sin embargo, en la Tabla 6.55 se presenta un resumen de las demandas actuales para todas las cuencas. El detalle de la distribución mensual se presenta en el Anexo V.

Tabla 6.55 Resumen de las demandas actuales (l/s) en la XV Región de Arica y Parinacota. Fuente: elaboración propia.

Actividad	Cuencas									
	Quebrada de La Concordia	Río Lluta	Río San José	Quebrada Chaca-Vítor	Río Camarones	Ríos Uchusuma Caquena	Lago Chungara	Río Lauca	Salar Surire	Total (l/s)
Agropecuario		5,6	9,4	3,8	7,9	12,6				39,2
Agrícola	75,0	2.136,2	1.692,6	146,8	2.077,1	507,9		388,6		6.974,2
Agua potable	4,0	189,1	610,6	2,7	0,9	0,7		0,4		808,4
Industria	1,5		176,7							178,2
Minería		15,1								15,1
Transvase								767,0		767,0
Total	80,5	2.346,0	2.489,3	153,2	2.085,9	511,7	3,1	1.109,2	3,1	8.782,2

6.3.2.2.1 Cuenca de la Quebrada de La Concordia

a) Uso agrícola: El uso agrícola está dado por el riego de los cuatro lotes que fueron adjudicados en la licitación del Ministerio de Bienes Nacionales, cuyo máximo caudal de riego estaría dado por el derecho de aprovechamiento de seis pozos que comprenden un caudal total máximo de 75 l/s, y cuya naturaleza del agua es subterránea.
b) Uso Agua Potable: El uso de agua potable estaría dado por los usuarios del aeropuerto, del complejo fronterizo de Chacalluta y por los de Zofri, cuyas dotaciones y N° de personas se presentan en la Tabla 6.56, y cuya naturaleza del agua es subterránea.

Tabla 6.56 Demanda de agua potable de las instalaciones públicas de la cuenca de la Quebrada de La Concordia. Fuente: elaboración propia.

Instalación	Nº Personas	Dotación	Caudal (l/s)
Aeropuerto	2.100	20	0,49
Complejo Fronterizo	14.917,8	20	3,45
Zofri	50	100	0,06
Total			4,00

c) Uso Industrial: El uso de agua para industria está dado por las empresas que operan en el recinto de Zofri, cuyo caudal se ha estimado en un 10% del caudal del derecho de aprovechamiento (1,5 l/s), dado que el recinto se encuentra a media capacidad, y cuya naturaleza del agua es subterránea.
d) Uso Minero: La cuenca de la Quebrada de la Concordia no presenta actividad minera.

6.3.2.2.2 Cuenca del Río Lluta

a) Uso agropecuario: De acuerdo al estudio de AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (2007), la cuenca con cabezas de ganado bovino (carne y leche), ovino, caprinos, porcinos, equinos, camélidos, pollos, gallos y gallinas, y pavos, cuyo consumo por el total de las cabezas es de 5,6 l/s, y cuya naturaleza es superficial.

Tabla 6.57 Número de cabezas de ganado y demanda anual de agua (Nº y litros - m^3) en la cuenca del río Lluta. Fuente: AYALA, CABRERA y ASOC (2007).

Bovinos carne	Nº Cabezas	545
	Demanda (l/año)	6.955.988
Bovinos leche	Nº Cabezas	45
	Demanda (l/año)	1.386.818
Ovinos	Nº Cabezas	1.730
	Demanda (l/año)	3.157.433
Caprinos	Nº Cabezas	215
	Demanda (l/año)	353.795
Porcinos	Nº Cabezas	1.063
	Demanda (l/año)	3.957.177
Equinos	Nº Cabezas	49
	Demanda (l/año)	713.940
Camélidos	Nº Cabezas	456
	Demanda (l/año)	4.158.263

Tabla 6.58 Número de aves y demanda anual de agua (Nº y litros - m^3) en la cuenca del río Lluta. Fuente: AYALA, CABRERA y ASOC (2007).

Pollos, gallos y gallinas	Número	395.210
	Demanda (l/año)	144.251.577
Pavos	Número	23.610
	Demanda (l/año)	12.926.475
Demanda total	l/año	177.861.466
	m^3/año	177.861
	l/s	5,6

b) Uso agrícola: De acuerdo al estudio de AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (2007), en la cuenca se cultivan hortalizas (ajo, betarraga, cebollas, choclo, tomate, otras), flores y praderas, lo que totaliza un caudal de 2.136 l/s, cuyo riego procede de los canales que conforman las Comunidades de Aguas, y cuya naturaleza es superficial.

Tabla 6.59 Demanda de agua por uso agrícola por mes y año (ha y m^3) en la cuenca del río Lluta. Fuente: AYALA, CABRERA y ASOC (2007).

Cultivos	Demanda Agrícola Mensual (m3)												
	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	Total
Hortalizas													
Ajo	87.850	92.960	114.660	148.400	172.270	213.360	178.150	146.580	88.480				1.242.710
Betarraga	47.075	66.815	64.085	27.335	64.610	122.710	99.540	30.660	49.280	59.220	67.200	24.150	722.680
Cebolla	305.000	415.000	433.750	502.250	492.250	609.750						172.500	2.930.500
Choclo					811.800	1.509.200	2.634.500	3.643.200	2.816.000	1.595.000			13.009.700
Tomate Consumo Fresco	4.126	3.254	3.084	3.036	4.528	7.012	6.886	5.588	3.104	1.102	3.694	4.862	50.276
Otras Hortalizas	10.760	9.960	15.420	26.780	34.460	48.780	41.920	32.740	2.240		1.720	11.640	236.420
Flores	1.728	1.596	930	1.074	3.552	8.808	10.092	12.276	8.856	5.226	7.476	5.940	67.554
Praderas													
Pradera Artificial	3.331.150	3.082.950	3.579.350	4.145.450	4.570.450	5.661.850	5.560.700	5.283.600	3.878.550	2.358.750	3.754.450	3.901.500	49.108.750
Total Agrícola (m^3)	3.787.689	3.672.535	4.211.279	4.854.325	6.153.920	8.181.470	8.531.788	9.154.644	6.846.510	4.019.298	3.834.540	4.120.592	67.368.590
Total Agrícola (l/s)	1.414	1.417	1.572	1.812	2.374	3.055	3.292	3.418	2.556	1.661	1.432	1.590	2.136

c) Uso Agua Potable: El uso de agua potable estaría dado por el abastecimiento de Agua Potable Rural de algunos pueblos y por la Planta Desaladora de Lluta de Aguas del Altiplano, que en su mayoría es de naturaleza subterránea.

Tabla 6.60 Demanda de Agua Potable de localidades de la cuenca del Río Lluta. Fuente: Modificado de AYALA, CABRERA y ASOC (2007) y Aguas del Altiplano (2016).

Localidad	Cuenca	Subcuenca	Comuna	N° Personas	Dotación (l/Hab/día)	Caudal (l/s)
APR Alcérreca	Río Lluta	Lluta Alto	G. Lagos	175	150	0,3
APR Putre	Río Lluta	Lluta Alto	Putre	1.540	150	2,7
APR Socoroma	Río Lluta	Lluta Alto	Putre	428	150	0,7
APR Lluta	Río Lluta	Lluta Bajo	Arica	2.190	150	3,8
APR Villa La Frontera-La Ponderosa	Río Lluta	Lluta Bajo	Arica	884	150	1,5
Planta Desaladora Lluta*	Río Lluta	Lluta Bajo	Arica			180,0
Total						189,1

(*): Valor entregado en Aguas del Altiplano (2016).

d) Uso Industrial: De acuerdo a lo informado en AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (2007), la cuenca no cuenta con actividad industrial.

e) Uso Minero: El uso de agua para minería en la cuenca está dado por la operación de la Planta de Proceso de la empresa Quiborax S.A., cuya demanda estimativa es de 15,1 l/s (Seremi Minería, 2016). Estas aguas tienen origen subterráneo y superficial.

6.3.2.2.3 Cuenca del Río San José

a) Uso agropecuario: De acuerdo al estudio de AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (2007), la cuenca cuenta con cabezas de ganado bovino (carne y leche), ovino, caprinos, porcinos, equinos, camélidos, pollos, gallos y gallinas, y pavos, cuyo consumo por el total de las cabezas es de 9,4 l/s, y cuya naturaleza debería ser superficial y subterránea.

Tabla 6.61 Número de cabezas de ganado y demanda anual de agua (Nº y litros - m^3) en la cuenca del río San José. Fuente: AYALA, CABRERA y ASOC (2007).

Bovinos Carne	Nº Cabezas	908
	Demanda (l/año)	11.593.313
Bovinos Leche	Nº Cabezas	75
	Demanda (l/año)	2.311.363
Ovinos	Nº Cabezas	2.884
	Demanda (l/año)	5.262.388
Caprinos	Nº Cabezas	359
	Demanda (l/año)	589.658
Porcinos	Nº Cabezas	1.772
	Demanda (l/año)	6.595.295
Equinos	Nº Cabezas	82
	Demanda (l/año)	1.189.900
Camélidos	Nº Cabezas	760
	Demanda (l/año)	6.930.438

Tabla 6.62 Número de aves y demanda anual de agua (Nº y litros - m^3) en la cuenca del río San José. Fuente: AYALA, CABRERA y ASOC (2007).

Pollos, gallos y gallinas	Número	658.683
	Demanda (l/año)	240.419.295
Pavos	Número	39.350
	Demanda (l/año)	21.544.125
Demanda Total	l/año	296.435.775
	m^3/año	296.436
	l/s	9,4

b) Uso agrícola: De acuerdo al estudio de AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (2007), en la cuenca se cultivan hortalizas (ají, ajo, choclo, melón, pepino, pimentón, poroto verde, sandía, tomate, zanahoria, zapallito italiano, otras), frutales (limoneros, mangos, naranjos, olivos, otros), flores y praderas. Sin embargo, la demanda estimada el año 2007 comprendía una superficie de 2520 ha, y el día de hoy esta superficie ha crecido a aproximadamente 4160 ha, de acuerdo a la medición de área realizada en imágenes de Google Earth. Se encuentran disponibles imágenes entre los años 2013 y 2016, según el sector de la cuenca, lo cual ha permitido realizar un reconocimiento visual de las áreas cultivadas y

una estimación utilizando herramientas SIG de medición de áreas. Los resultados indican que las hectáreas regadas se han aumentado en un 65%, sin embargo, las técnicas de riego han mejorado a través de los años, lo que en resumen equivaldría a amplificar la demanda estimada del año 2007 por un 20% adicional, lo que totaliza un caudal de 1.692,6 l/s y cuyo detalle se presenta en la Tabla 6.63. El riego procede de los canales que conforman las Comunidades de Aguas (principalmente la COMCA), y cuya naturaleza es superficial, así como de la mayoría de los pozos que existen en la cuenca y que captan el agua subterránea desde el acuífero de Azapa.

Tabla 6.63 Demanda de agua por uso agrícola por mes y año (ha y m^3) en la cuenca del río San José. Fuente: Modificado de AYALA, CABRERA y ASOC (2007).

Cultivos	Demanda Agrícola Mensual (m^3)												
	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	Total
Hortalizas													
Ají					15.780	31.605	44.355	48.735	39.420				179.895
Ajo	4.835	4.540	5.785	7.300	10.525	13.505	11.965	12.170	9.970				80.595
Cebolla	28.200	34.050	36.750	41.490	50.520	64.830						17.880	273.720
Choclo					31.550	60.800	112.650	186.950	171.050	120.750			683.750
Melón			5.450	9.220	16.840	27.010	28.160	24.340					111.020
Pepino Ensalada				30.750	63.150	108.050	140.800	138.000					480.750
Pimentón	186.600	85.200	159.300	115.200	246.300	425.550	422.400	438.450	204.150	252.150	388.950	261.150	3.185.400
Poroto Verde	217.700	119.350	238.350	365.750	633.500	992.950	443.450	338.450	476.350	493.150	739.200	640.150	5.698.350
Sandía			5.450	9.220	16.840	27.010	28.160	24.340					111.020
Tomate Consumo Fresco	730.940	511.520	500.940	480.700	890.560	1.429.220	1.489.480	1.464.640	1.063.060	648.140	1.041.440	922.300	11.172.940
Zanahoria						10.810	21.120	25.970	29.450	22.790	17.070		127.210
Zapallito Italiano	51.800	17.050	34.050	49.950	84.200	128.300	105.600	48.350	68.050	66.350	98.000	82.650	834.350
Otras Hortalizas	33.200	27.280	43.600	73.760	117.840	172.880	157.680	155.600	58.160	30.000	35.360	40.640	946.000
Frutales													
Limonero	22.380	18.400	22.060	24.900	33.580	43.100	43.520	48.480	41.820	31.040	38.780	28.020	396.080
Mango	116.300	95.500	114.500	129.300	177.100	227.300	254.400	293.200	258.500	190.800	220.700	145.600	2.223.200
Naranjo	11.190	9.200	11.030	12.450	16.790	21.550	21.760	24.240	20.910	15.520	19.390	14.010	198.040
Olivo	886.460	727.710	872.490	985.520	1.348.740	1.732.280	1.939.290	2.227.580	1.827.530	1.174.750	1.640.840	1.096.010	16.459.200
Otros Especies	8.600	7.075	4.250	4.775	19.675	50.500	61.425	91.075	81.900	62.550	61.075	32.275	485.175
Flores	8.600	7.075	4.250	4.775	19.675	50.500	61.425	91.075	81.900	62.550	61.075	32.275	485.175
Praderas													
Pradera Artificial	18.815	15.455	18.540	20.920	28.660	36.785	38.340	44.235	39.945	30.720	33.540	23.685	349.640
Total Agrícola 2007 (m^3)	2.325.620	1.679.405	2.076.795	2.365.980	3.821.825	5.654.535	5.425.980	5.725.880	4.472.165	3.201.260	4.395.420	3.336.645	44.481.510
Total Agrícola 2016 (m^3)	3.839.119	2.772.351	3.428.360	3.905.745	6.309.044	9.334.470	8.957.173	9.452.246	7.382.622	5.284.620	7.255.931	5.508.112	73.429.794
Total Agrícola 2016 (l/s)	1.041,9	777,5	930,5	1.060,0	1.769,4	2.533,4	2.512,0	2.565,4	2.003,7	1.587,9	1.969,3	1.544,7	1.692,6

c) Uso Agua Potable: El uso de agua potable estaría dado por el abastecimiento de Agua Potable Rural de algunos pueblos y por las captaciones subterráneas de Aguas del Altiplano que abastecen la ciudad de Arica, que en su mayoría es de naturaleza subterránea.

Tabla 6.64 Demanda de Agua Potable de Arica. Fuente: Aguas del Altiplano (2016).

Cuenca	Subcuenca	Localidad	Tipo de Fuente	Población Actual (Hab)	Dotación (l/Hab/Día)	Caudal máx. (l/s)
Río San José	Río San José	Arica (Valle Azapa)	Subterránea	239.710	217,0	414
		Arica (Sector Ciudad)	Subterránea			188
TOTAL				239.710	217,0	602

Tabla 6.65 Demanda de Agua Potable Rural de localidades de la cuenca del Río San José. Fuente: Modificado de AYALA, CABRERA y ASOC (2007) y Aguas del Altiplano (2016).

Localidad	Cuenca	Subcuenca	Comuna	N° Personas	Dotación (l/Hab/día)	Caudal (l/s)
San Miguel de Azapa	Río San José	Río San José	Arica	998	150	1,7
Cerro Sombrero	Río San José	Río San José	Arica	792	150	1,4
Las Maitas	Río San José	Río San José	Arica	704	150	1,2
Sobraya	Río San José	Río San José	Arica	1.524	150	2,6
Tignamar	Río San José	Azapa Alto	Putre	230	150	0,4
Belén	Río San José	Azapa Alto	Putre	312	150	0,5
Chapiquiña	Río San José	Azapa Alto	Putre	405	150	0,7
TOTAL						8,6

(*): Valor entregado en Aguas del Altiplano (2016).

d) Uso Industrial: De acuerdo a lo informado en AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (2007), la cuenca cuenta con actividad industrial, cuyas actividades y demandas se presenta en la Tabla 6.66.

Tabla 6.66 Resumen de la demanda de agua por actividades industriales de Arica en la cuenca del Río San José. Fuente: AYALA, CABRERA y ASOC (2007).

Rubro	Demanda neta		Demanda bruta	
	m^3/mes	l/s	m^3/mes	l/s
Pesqueras	226.000	87,2	323.180	124,7
Industrias Químicas	30.000	11,6	81.000	31,3
Procesamiento Aves de Corral	20.000	7,7	25.000	9,6
Embotelladoras y Cervecerías	10.000	3,9	14.000	5,4
Frigoríficos, Mataderos y Procesamiento de Carnes	6.000	2,3	7.500	2,9
Otras	6.000	2,3	7.200	2,8
TOTAL	298.000	115,0	457.880	176,7
m^3/año	3.576.000		5.494.560	

e) Uso Minero: De acuerdo a lo informado en Seremi Minería y AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (2007), existiría sólo un uso de recursos hídricos por actividad minera de 0,8 l/s. Sin embargo, en la parte alta de la ciudad se encuentra ubicada la mina Carol, la que explota la diatomita, pero que no cuenta con información de consumos de agua al respecto.

6.3.2.2.4 Cuenca de la Quebrada Chaca-Vítor

a) Uso agropecuario: De acuerdo el estudio de AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (2007), la cuenca cuenta con cabezas de ganado bovino (carne y leche), ovino, caprinos, porcinos, equinos, camélidos, pollos, gallos y gallinas, y pavos, cuyo consumo por el total de las cabezas es de 3,8 l/s, y cuya naturaleza debería ser superficial y subterránea.

Tabla 6.67 Número de cabezas de ganado, y demanda anual de agua (Nº y litros - m^3) en la cuenca de la quebrada Chaca-Vítor. Fuente: AYALA, CABRERA y ASOC (2007).

Bovinos Carne	Nº Cabezas	363
	Demanda (l/año)	4.637.325
Bovinos Leche	Nº Cabezas	30
	Demanda (l/año)	924.545
Ovinos	Nº Cabezas	1153
	Demanda (l/año)	2.104.955
Caprinos	Nº Cabezas	144
	Demanda (l/año)	235.863
Porcinos	Nº Cabezas	709
	Demanda (l/año)	2.638.118
Equinos	Nº Cabezas	33
	Demanda (l/año)	475.960
Camélidos	Nº Cabezas	304
	Demanda (l/año)	2.772.175

Tabla 6.68 Número de aves y demanda anual de agua (Nº y litros - m^3) en la cuenca de la quebrada Chaca-Vítor. Fuente: AYALA, CABRERA y ASOC (2007).

Pollos, gallos y gallinas	Número	263.473
	Demanda (l/año)	96.167.718
Pavos	Número	1.574
	Demanda (l/año)	8.617.650
Demanda Total	l/año	118.574.309
	m^3/año	118.574
	l/s	3,8

b) Uso agrícola: De acuerdo al estudio de AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (2007), en la cuenca se cultivan hortalizas (melón, pimentón, poroto verde, tomate, zapallito italiano, otras), frutales (limoneros, mandarina, mango, naranjos, olivos, uva vinífera, otros) y praderas, lo que totaliza un caudal de 146,8 l/s, cuyo riego procede de los canales que conforman las Comunidades de Aguas, y cuya naturaleza es superficial, así como de algunos pozos que existen en el sector de Chaca y Vítor y que captan el agua subterránea desde el acuífero medio e inferior.

Tabla 6.69 Demanda de agua por uso agrícola por mes y año (ha y m^3) en la cuenca de la quebrada Chaca-Vítor. Fuente: AYALA, CABRERA y ASOC (2007).

Cultivos	Demanda Agrícola Mensual (m^3)												
	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	Total
Hortalizas													
Melón			3.535	5.930	11.050	17.945	19.235	16.200					73.895
Pimentón	7.825	3.530	6.895	4.940	10.775	18.845	19.235	19.435	10.015	12.890	17.390	11.220	142.995
Poroto Verde	19.550	10.475	22.100	33.600	59.400	94.225	43.275	32.400	50.075	55.475	71.175	58.900	550.650
Tomate Consumo Fresco	7.996	5.584	5.660	5.376	10.164	16.512	17.696	16.932	13.052	8.876	12.188	10.324	130.360
Zapallito Italiano	2.608	838	1.768	2.570	4.420	6.820	5.770	2.592	4.006	4.222	5.296	4.264	45.174
Otras Hortalizas	1.044	838	1.414	2.372	3.868	5.742	5.386	5.184	2.326	1.708	1.308	1.346	32.536
Frutales													
Limonero	22.675	18.500	23.050	25.775	35.450	46.075	47.850	51.975	48.600	40.200	42.450	29.250	431.850
Mandarina	16.326	13.320	16.596	18.558	25.524	33.174	34.452	37.422	34.992	28.944	30.564	21.060	310.932
Mango	12.246	9.984	12.454	13.910	19.448	25.272	29.094	32.669	30.745	24.830	25.012	15.795	251.459
Naranjo	22.675	18.500	23.050	25.775	35.450	46.075	47.850	51.975	48.600	40.200	42.450	29.250	431.850
Olivo	5.650	4.570	5.750	6.420	8.980	11.660	13.430	15.080	13.880	10.750	11.510	7.290	114.970
Uva Vinífera					15.295	36.432	56.787	83.697	79.580	58.857	51.934		382.582
Otros Especies	27.063	21.437	13.774	15.423	64.505	167.616	209.617	302.543	286.635	234.255	206.028	104.760	1.653.656
Praderas													
Pradera Artificial	3.799	3.111	3.864	4.319	6.036	7.842	8.406	9.438	8.954	7.335	7.236	4.903	75.243
Total agrícola (m^3)	149.457	110.687	139.910	164.968	310.365	534.235	558.083	677.542	631.460	528.542	524.541	298.362	4.628.152
Total agrícola (l/s)	55,8	42,7	52,2	61,6	119,7	199,5	215,3	253,0	235,8	218,5	195,8	115,1	146,8

c) Uso Agua Potable: El uso de agua potable estaría dado por el abastecimiento de Agua Potable Rural de algunos pueblos, cuya naturaleza del agua es subterránea.

Tabla 6.70 Demanda de agua potable de las localidades de la cuenca de la Quebrada Chaca-Vítor. Fuente: elaboración propia.

Localidad	Cuenca	Subcuenca	Comuna	N° Personas	Dotación (l/Hab/día)	Caudal (l/s)
Chitita*	Costeras	Quebrada Vítor	Camarones		150	1,0
Guañacagua	Costeras	Quebrada Vítor	Camarones	532	150	0,9
Codpa	Costeras	Quebrada Vítor	Camarones	448	150	0,8
Total						2,7

(*): Valor obtenido de Listado de Sistemas de APR en Chile (datos.gob.cl)

d) Uso Industrial: De acuerdo a lo informado en AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (2007), la cuenca no cuenta con actividad industrial.

e) Uso Minero: De acuerdo a lo informado por el Sernageomin (2011), en la cuenca de la Quebrada Chaca-Vítor se presentan varias actividades mineras de pequeña envergadura, de minería metálica (cobre) y cuyas instalaciones corresponden a minas (la mayoría), un proyecto exploración y una planta de chancado de Enami. Sin embargo, no se cuenta con información del consumo de agua de alguna de estas instalaciones.

6.3.2.2.5 Cuenca del Río Camarones

a) Uso agropecuario: De acuerdo al estudio de AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (2007), la cuenca cuenta con cabezas de ganado bovino (carne y leche), ovino, caprinos, porcinos, equinos, camélidos, pollos, gallos y gallinas, y pavos, cuyo consumo por el total de las cabezas es de 7,9 l/s, y cuya naturaleza debería ser superficial.

Tabla 6.71 Número de cabezas de ganado, y demanda anual de agua (Nº y litros - m^3) en la cuenca del río Camarones. Fuente: AYALA, CABRERA y ASOC (2007).

Bovinos Carne	Nº Cabezas	660
	Demanda (l/año)	8.431.500
Bovinos Leche	Nº Cabezas	162
	Demanda (l/año)	5.026.050
Ovinos	Nº Cabezas	6.667
	Demanda (l/año)	12.167.275
Caprinos	Nº Cabezas	881
	Demanda (l/año)	1.447.043
Porcinos	Nº Cabezas	266
	Demanda (l/año)	990.318
Equinos	Nº Cabezas	248
	Demanda (l/año)	3.620.800
Camélidos	Nº Cabezas	1.604
	Demanda (l/año)	14.636.500

Tabla 6.72 Número de aves y demanda anual de agua (Nº y litros - m^3) en la cuenca del río Camarones. Fuente: AYALA, CABRERA y ASOC (2007).

Pollos, gallos y gallinas	Número	553.103
	Demanda (l/año)	201.882.595
Pavos	Número	41
	Demanda (l/año)	22.448
Demanda Total	l/año	248.224.529
	m^3/año	248.225
	l/s	7,9

b) Uso agrícola: De acuerdo al estudio de AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (2007), en la cuenca se cultivan cereales y chacas (arveja grano, papa, otros), hortalizas (alcachofa, arveja verde, cebolla, choclo, haba, huerta casera, orégano, zanahoria, zapallo guarda, poroto verde, otras), frutales (huerto casero, naranjos, tunas, uva vinífera) y praderas, lo que totaliza un caudal de 2.077,1 l/s, cuyo riego procede de los canales que conforman las Comunidades de Aguas, y cuya naturaleza es superficial.

Tabla 6.73 Demanda de agua por uso agrícola por mes y año (ha y m^3) en la cuenca del río Camarones. Fuente: AYALA, CABRERA y ASOC (2007).

Cultivos	Demanda Agrícola Mensual (m^3)												
	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	Total
Cereales y Chacras													
Arveja Grano					3.333	7.062	9.767	10.809	4.034				35.005
Papa				911	2.920	5.871	3.821						13.523
Otras Especies	916	756	1.764	3.541	5.999	9.359	7.643	4.882					34.860
Hortalizas													
Ajo	2.091	1.971	2.445	3.134	4.347	5.549	4.709	4.796	3.869				32.911
Alcachofa	1.494	1.314	1.534	1.979	2.753	3.514	3.508	4.055	3.404		1.433	1.591	26.579
Arveja Verde					1.594	3.377	4.671	5.170					14.812
Cebolla	1.626	1.972	2.071	2.375	2.782	3.551						1.012	15.389
Choclo					13.122	25.142	44.605	74.201	66.969	47.490			271.529
Haba	3.586	2.957	3.314							3.425	4.664	4.120	22.066
Huerta Casera	3.097	2.372	3.193	4.070	7.078	9.442	7.241	6.582	3.130	2.442	4.418	3.027	56.092
Orégano	13.042	17.600	23.955	20.944	17.243							8.556	101.340
Poroto Verde	269	148	288	449	748	1.165	499	379	526	550	849	776	6.646
Zanahoria						592	1.108	1.364	1.526	1.187	914		6.691
Zapallo Guarda	239	197	460	647	878	1.232	776					253	4.682
Otras Hortalizas	179	148	230	396	609	888	776	766	279	145	174	216	4.806
Frutales													
Huerto Casero	37.184	30.677	17.895	20.451	81.108	206.952	240.999	358.128	31.7342	243.555	244.717	136.651	1.935.659
Naranjo	1.039	857	1.000	1.147	1.488	1.900	1.837	2.048	1.738	1.299	1.669	1.276	17.298
Tuna	3.276	2.702	2.837	3.255	4.768	6.084	6.072	7.688	6.445	4.506	5.834	4.412	57.879
Uva Vinífera					25.337	59.242	86.031	130.607	117.140	81.276	81.421		581.054
Praderas													
Cereal Forrajero	5.316	8.984	12.661	16.869	22.229	28.377	18.470	9.289					122.195
Pradera Artificial	3.556.401	2.933.030	3.423.230	3.926.502	5.173.244	6.603.811	6.591.556	7.620.976	6.782.734	5.242.689	5.893.021	4.394.643	62.141.837
Total agrícola (m^3)	3.629.755	3.005.685	3.496.877	4.006.670	5.371.580	6.983.110	7.034.089	8.241.740	7.309.136	5.628.564	6.239.114	4.556.533	65.502.853
Total agrícola (l/s)	1.355	1.160	1.306	1.496	2.072	2.607	2.714	3.077	2.729	2.327	2.329	1.758	2.077,1

c) Uso Agua Potable: El uso de agua potable está dado por el abastecimiento de Agua Potable Rural de algunos pueblos, cuya naturaleza del agua es subterránea o de vertientes.

Tabla 6.74 Demanda de agua potable de las localidades de la cuenca del Río Camarones. Fuente: elaboración propia.

Localidad	Cuenca	Subcuenca	Comuna	Nº Personas	Dotación (l/Hab/día)	Caudal (l/s)
Esquiña	Río Camarones	Río Camarones antes de Chiza	Camarones	140	150	0,2
Illapata	Río Camarones	Río Camarones antes de Chiza	Camarones	180	150	0,3
Cuya	Río Camarones	Río Camarones antes de Chiza	Camarones	220	150	0,4
Total						0,9

d) Uso Industrial: De acuerdo a lo informado en AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (2007), la cuenca no cuenta con actividad industrial.

e) Uso Minero: De acuerdo a lo informado por AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (2007) y SERNAGEOMIN (2011), la cuenca no cuenta con actividad minera.

6.3.2.2.6 Cuencas Altiplánicas

a) Uso agropecuario: De acuerdo al estudio de AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (2007), las cuencas altiplánicas de la XV y I Región cuentan con cabezas de ganado bovino (carne), ovino, caprinos, porcinos, equinos, camélidos, pollos, gallos y gallinas, y pavos, cuyo consumo total de las regiones XV y I es de 32 l/s. Sin embargo, en la cuencas altiplánicas de la XV Región se cuenta sólo con ganado ovino, caprinos, equinos, camélidos, para lo cual sólo se ha considerado un 40% del valor total de las dos regiones dando un valor de 12,6 l/s, y cuya naturaleza de los recursos hídricos es superficial.

Tabla 6.75 Número de cabezas de ganado y demanda anual de agua (Nº y litros - m^3). Fuente: AYALA, CABRERA y ASOC (2007).

Ovinos	Nº Cabezas	8.086
	Demanda (l/año)	14.757.972
Equinos	Nº Cabezas	269
	Demanda (l/año)	3.927.984
Camélidos	Nº Cabezas	41.356
	Demanda (l/año)	377.378.610
Demanda Total	l/año	396.064.566
	m^3/año	396.065
	l/s	12,6

b) Uso agrícola: De acuerdo al estudio de AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (2007), en las cuencas altiplánicas de la XV y I Región se cultivan cereales y chacas (maíz grano, papa, quínoa), hortalizas (acelga, ají, ajo, arveja verde, betarraga, cebolla, choclo, cilantro, espinaca, haba, huerta casera, lechuga, melón, orégano, pimentón, poroto verde, zanahoria, zapallito italiano, zapallo guarda, otras), flores y praderas, lo que totaliza un caudal de 1.538,9 l/s, cuyo riego procede de los canales que conforman las Comunidades de Aguas. Sin embargo, en las cuencas altiplánicas de la XV Región se cuenta sólo con praderas para pastoreo de animales, para lo cual sólo se ha considerado en la demanda agrícola de las cuencas altiplánicas de la XV Región un 60% del valor total de las praderas artificiales de las dos regiones, dando un valor de 846,5 l/s, y cuya naturaleza de los recursos hídricos es superficial.

Tabla 6.76 Demanda de agua por uso agrícola por mes y año (ha y m^3). Fuente: Modificado de AYALA, CABRERA y ASOC (2007).

Cultivos	Demanda Agrícola Mensual (m^3)												
	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	Total
Cereales y Chacras													
Maíz Grano						20.265	34.713	34.251	18.228		1.565		109.022
Papa				66.985	151.606	288.029	174.149						680.769
Quínoa						279.536	518.674	452.699	234.902		76.400		1.562.211
Hortalizas													
Acelga			30	85	84	95							294
Ají					603	1.135	1.423	888	290				4.339
Ajo	12.034	14.318	17.993	23.206	22.726	27.411	21.648	11.584	1.715				152.635
Arveja Verde					348	697	900	575					2.520
Betarraga	53	84	82	35	70	129	99	14	11	14	37	25	653
Cebolla	95	146	155	179	148	179						50	952
Choclo					1.267	2.291	3.780	3.680	1.886	342			13.246
Cilantro	60										30	70	160
Espinaca	60	66	73									25	224
Haba	6.490	6.756	7.670								2.353	6.704	29.973
Huerta Casera	3.788	3.660	4.996	6.404	7.864	9.920	7.016	2.508				3.115	49.271
Lechuga				209	1.039	1.410	1.311	838					4.807
Melón			1.486	2.573	3.191	4.811	4.479	2.033					18.573
Orégano	157.132	267.809	369.521	325.022	188.917							85.575	1.393.976
Pimentón	189	110	202	150	217	352	313	180			131	235	2.079
Poroto Verde	95	66	130	203	239	352	139	28			91	247	1.590
Tomate Consumo Fresco	242	215	207	203	256	386	360	200	44		103	271	2.487
Zanahoria						45	78	52	30	5	19		229
Zapallito Italiano	158	66	130	194	223	319	233	28			79	222	1.652
Zapallo Guarda	84	88	207	293	281	373	218					75	1.619
Otras Hortalizas	42	44	69	120	130	179	145	69				42	840
Flores	67	70	42	48	134	323	349	288	108		126	219	1.774
Praderas													
Pradera Artificial	3.667.761	3.818.989	4.515.787	5.213.542	4.849.828	5.850.040	5.443.255	3.527.061	1.438.581	76.571	2.012.865	4.079.331	44.493.611
Total Agrícola XV y I Región(m^3)	3.848.350	4.112.487	4.918.780	5.639.451	5.229.171	6.488.277	6.213.282	4.036.976	1.695.795	76.932	2.093.799	4.176.206	48.529.506
Total Agrícola XV Región (m^3)	2.200.657	2.291.393	2.709.472	3.128.125	2.909.897	3.510.024	3.265.953	2.116.237	863.149	45.943	1.207.719	2.447.599	26.696.167
Total Agrícola XV Región (l/s)	822	884	1.012	1.168	1.123	1.310	1.260	790	322	19	451	944	846,5

c) Uso Agua Potable: El uso de agua potable está dado por el abastecimiento de Agua Potable Rural de algunos pueblos, cuya naturaleza del agua es superficial, a excepción de Visviri que es subterránea.

Tabla 6.77 Demanda de Agua Potable Rural de localidades de las cuencas Altiplánicas. Fuente: elaboración propia.

Localidad	Cuenca	Subcuenca	Comuna	Nº Personas	Dotación (l/Hab/día)	Caudal (l/s)
Visviri	Altiplánicas	Uchusuma y Caquena	General Lagos	292	100	0,3
Caquena	Altiplánicas	Uchusuma y Caquena	Putre	300	100	0,3
Guallatire	Altiplánicas	Río Lauca	Putre	216	100	0,3
Parinacota	Altiplánicas	Río Lauca	Putre	160	100	0,2
Total						1,1

d) Uso Industrial: De acuerdo a lo informado en AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (2007), la cuenca no cuenta con actividad industrial.

e) Uso Minero: De acuerdo a lo informado por el Sernageomin (2011), en la cuenca se presentan los yacimientos mineros de Choquelimpie y Quiborax, en el que la naturaleza del primero es de minería metálica (Oro) y el segundo de minería no metálica (Ulexita). El primer yacimiento cuenta con derechos de aprovechamiento de agua, sin embargo, se encuentra paralizada temporalmente.

f) Trasvase: En la cuenca del Río Lauca se capta en una bocatoma de la naciente del río del mismo nombre un caudal medio de 767 l/s (Media anual de la estación Canal lauca en Sifón N°1), el que se trasvasa al río San José previa pasada por la central hidroeléctrica de Chapiquiña. Estos recursos son aprovechados por la CDA de la COMCA.

6.3.2.3 Demandas futuras

Las demandas futuras se han estimado en base a los crecimientos, los indicadores del estudio de AYALA, CABRERA Y ASOSIADOS (2007) y la Actualización del Plan de Desarrollo de Aguas del Altiplano (2016) al año 2030, los que se presentan en detalle por cuenca y se resumen en la Tabla 6.78.

Tabla 6.78 Resumen de las demandas actuales y futuras de la XV Región de Arica y Parinacota. Fuente: elaboración propia.

Año	Actividad	Cuencas									
		Quebrada de La Concordia	Río Lluta	Río San José	Quebrada Chaca-Vítor	Río Camarones	Ríos Uchusuma Caquena	lago Chungara	Río Lauca	Salar Surire	Total (l/s)
2016	Agropecuario		5,6	9,4	3,8	7,9	12,6				39,2
2030			5,6	9,4	3,8	7,9	12,6				39,2
2016	Agrícola	75,0	2.136,2	1.692,6	146,8	2.077,1	507,9		338,6		6.974,0
2030		75,0	2.136,2	2.328,4	146,8	2.077,1	923,3		615,5		8.302,0
2016	Agua Potable	4,00	189,1	610,6	2,7	0,9	0,7		0,4		808,4
2030		4,00	221,3	711,6	2,8	1,2	0,9		0,5		942,3
2016	Industria	1,50		176,7							178,2
2030		1,50		1.270,2							1.271,7
2016	Minería		15,1,0						0,0		15,1
2030			22,7						76,0		98,7
2016	Trasvase								767,0		767,0
2030									767,0		767,0
2016	Total	80,5	2.346,0	2.489,3	153,2	2.085,9	511,7	3,1	1.109,2	3,1	8.782
2030		80,5	2.385,9	4.319,6	153,4	2.086,2	927,4	3,1	3.885,1	3,1	11.421

6.3.2.3.1 Cuenca de la Quebrada de La Concordia

a) Uso agropecuario: La cuenca no cuenta con actividad agropecuaria.
b) Uso agrícola: Además de los proyectos licitados dentro de los últimos años, no hay nuevas proyecciones de cultivos.
c) Uso Agua Potable: Las instalaciones mencionadas en la estimación de la demanda actual, podrían subir la cantidad de usuarios. Sin embargo, no se conocen las proyecciones al respecto.
d) Uso Industrial: No se contempla crecimiento de actividad industrial en esta cuenca.
e) Uso Minero. La cuenca de la Quebrada de la Concordia no presenta actividad minera.

6.3.2.3.2 Cuenca del Río Lluta

a) Uso agropecuario: No existen diferencias en relación a lo presentado en la situación actual.
b) Uso agrícola: No existen diferencias en relación a lo presentado en la situación actual.
c) Uso Agua Potable: De acuerdo a lo informado por Aguas del Altiplano, la Planta Desaladora de Lluta aumentaría su producción, que en su mayoría es de naturaleza subterránea. Y los pueblos crecerían de acuerdo a lo informado por AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (2007).

Tabla 6.79 Demanda Futura de Agua Potable de localidades de la cuenca del Río Lluta. Fuente: AYALA, CABRERA y ASOC (2007) y Aguas del Altiplano (2016).

Localidad	Cuenca	Subcuenca	Comuna	Año	N° Personas	Dotación (l/Hab/día)	Caudal (l/s)
APR Alcérreca	Río Lluta	Lluta Alto	G. Lagos	2016	175	150	0,3
				2030	287	150	0,5
APR Putre	Río Lluta	Lluta Alto	Putre	2016	1.540	150	2,7
				2030	2.527	150	4,4
APR Socoroma	Río Lluta	Lluta Alto	Putre	2016	428	150	0,7
				2030	386	150	0,7
APR Lluta	Río Lluta	Lluta Bajo	Arica	2016	2.190	150	3,8
				2030	3.593	150	6,2
APR Villa La Frontera-La Ponderosa	Río Lluta	Lluta Bajo	Arica	2016	884	150	1,5
				2030	884	150	1,5
Planta Desaladora Lluta*	Río Lluta	Lluta Bajo	Arica	2016			180,0
				2030			208,0
Total				2016			189,1
				2030			221,3

(*): Valor entregado en Aguas del Altiplano (2016).

d) Uso Industrial: La cuenca no cuenta con actividad industrial.
e) Uso Minero: El uso de agua para minería en la cuenca está dado por la operación de la Planta de Proceso de la empresa Quiborax S.A., cuya demanda actual es de 15,1 l/s, y al año 2030 aumentaría a 22,65 l/s.

Tabla 6.80 Caudales de uso minero actual y futuro en la cuenca del río Lluta. Fuente. Elaboración propia.

Nombre Operación	Cuenca	Subcuenca	Año	Caudal extracción (l/s)
Planta Proceso Quiborax	Río Lluta	Río Lluta Bajo	2016	15,1
	Río Lluta		2030	22,65

6.3.2.3.3 Cuenca del Río San José

a) Uso agropecuario: De acuerdo al estudio de AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (2007), la cuenca no sufriría aumento de la demanda agropecuaria.
b) Uso agrícola: De acuerdo al estudio de AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (2007), la cuenca no sufriría aumento de la demanda agrícola. Sin embargo, este estudio ha considerado la demanda igual a la actualizada al 2016.
c) Uso Agua Potable: El uso de agua potable estaría dado por el abastecimiento de Agua Potable Rural de algunos pueblos y por las captaciones subterráneas de Aguas del Altiplano que abastecen la ciudad de Arica, que en su mayoría es de naturaleza subterránea.

Tabla 6.81 Demanda Futura de Agua Potable en Arica. Fuente: Aguas del Altiplano (2016).

Cuenca	Subcuenca	Localidad	Tipo de Fuente	Año	Población Actual (Hab)	Dotación (l/Hab/Día)	Caudal máx. (l/s)
Río San José	Río San José	Arica (Valle Azapa)	Subterránea	2016	239.710	147,7	414
		Arica (Sector Ciudad)	Subterránea				188
Río San José	Río San José	Arica (Valle Azapa)	Subterránea	2030	297.190	148,1	509
		Arica (Sector Ciudad)	Subterránea				188
Total					239.710	147,7	602

(*): Valor entregado en Aguas del Altiplano (2016).

Tabla 6.82 Demanda Futura de Agua Potable Rural de localidades de la cuenca del Río San José. Fuente: AYALA, CABRERA y ASOC (2007) y Aguas del Altiplano (2016).

Localidad	Cuenca	Subcuenca	Comuna	Año	N° Personas	Dotación (l/Hab/día)	Caudal (l/s)
San Miguel de Azapa	Río San José	Río San José	Arica	2016	998	150	1,7
				2030	1.637	150	2,8
Cerro Sombrero	Río San José	Río San José	Arica	2016	792	150	1,4
				2030	1.299	150	2,3
Las Maitas	Río San José	Río San José	Arica	2016	704	150	1,2
				2030	1.155	150	2,0
Sobraya	Río San José	Río San José	Arica	2016	1.524	150	2,6
				2030	2.500	150	4,3
Tignamar	Río San José	Azapa Alto	Putre	2016	230	150	0,4
				2030	377	150	0,7
Belén	Río San José	Azapa Alto	Putre	2016	312	150	0,5
				2030	512	150	0,9
Chapiquiña	Río San José	Azapa Alto	Putre	2016	405	150	0,7
				2030	664	150	1,2
TOTAL				2016			8,6
				2030			14,1

d) Uso Industrial: La cuenca cuenta con actividad industrial, cuyas actividades y demandas se presentan en la Tabla 6.83 para el periodo proyectado.

Tabla 6.83 Resumen de la demanda industrial de Arica de la cuenca del Río San José. Fuente: AYALA, CABRERA y ASOC (2007).

Año	Demanda neta		Demanda bruta	
	m^3/mes	l/s	m^3/mes	l/s
2015	9.753.933	309,3	14.987.016	475,2
2030	26.070.343	826,7	40.057.344	1.270,2

e) Uso Minero: En la actualidad sólo existiría un uso de recursos hídricos por actividad minera de 0,8 l/s. Esta demanda aumentaría a 1,4 l/s al año 2030.

6.3.2.3.4 Cuenca de la Quebrada Chaca-Vítor

a) Uso agropecuario: De acuerdo al estudio de AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (2007), la cuenca no sufriría aumento de la demanda agropecuaria.

b) Uso agrícola: De acuerdo al estudio de AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (2007), la cuenca no sufriría aumento de la demanda agrícola.
c) Uso Agua Potable: El uso de agua potable estaría dado por el abastecimiento de Agua Potable Rural de algunos pueblos, cuya naturaleza del agua es subterránea. De cara a la proyección de éstos se ha asumido al igual que la ciudad de Arica una tasa de inicial de crecimiento del orden de 1,82% (Aguas del Altiplano, 2016). De cara a revisar las variaciones, estas son despreciables.

Tabla 6.84 Resumen de caudales de explotación futuros de localidades de la cuenca de la Quebrada Chaca-Vítor. Fuente: elaboración propia.

Localidad	Cuenca	Subcuenca	Comuna	Año	N° Personas	Dotación (l/Hab/día)	Caudal (l/s)
Chitita*	Costeras	Quebrada Vítor	Camarones	2016	576	150	1,0
				2030	605	150	1,1
Guañacagua	Costeras	Quebrada Vítor	Camarones	2016	532	150	0,9
				2030	559	150	1,0
Codpa	Costeras	Quebrada Vítor	Camarones	2016	448	150	0,8
				2030	471	150	0,8
TOTAL				2016			2,7
				2030			2,8

(*): Valor obtenido de Listado de Sistemas de APR en Chile (datos.gob.cl)

d) Uso Industrial: La cuenca no cuenta con actividad industrial.
e) Uso Minero: En la cuenca de la Quebrada Chaca-Vítor no se observan variaciones a los proyectos mineros pequeños que están en ejecución, los cuales no consumen recursos hídricos.

6.3.2.3.5 Cuenca del Río Camarones

a) Uso agropecuario: De acuerdo al estudio de AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (2007), la cuenca no sufriría aumento de la demanda agropecuaria.
b) Uso agrícola: De acuerdo al estudio de AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (2007), la cuenca no sufriría aumento de la demanda agrícola.
c) Uso Agua Potable: El uso de agua potable estaría dado por el abastecimiento de Agua Potable Rural de algunos pueblos, cuya naturaleza del agua es subterránea. De cara a la proyección de éstos se ha asumido al igual que la ciudad de Arica una tasa de inicial de crecimiento del orden de 1,82% (Aguas del Altiplano, 2016). De cara a revisar las variaciones, estas son despreciables.

Tabla 6.85 Demanda Futura de Agua Potable de localidades de la cuenca del Río Camarones. Fuente: elaboración propia.

Localidad	Cuenca	Subcuenca	Comuna	Año	N° Personas	Dotación (l/Hab/día)	Caudal (l/s)
Esquiña	Río Camarones	Río Camarones antes de Chiza	Camarones	2016	140	150	0,2
				2030	147	150	0,3
Illapata	Río Camarones	Río Camarones antes de Chiza	Camarones	2016	180	150	0,3
				2030	336	150	0,6
Cuya	Río Camarones	Río Camarones antes de Chiza	Camarones	2016	220	150	0,4
				2030	231	150	0,4
TOTAL				2016			0,9
				2030			1,2

d) Uso Industrial: La cuenca no cuenta con actividad industrial.

e) Uso Minero: De acuerdo a lo informado por SERNAGEOMIN (2011), la cuenca no cuenta con actividad minera.

6.3.2.3.6 Cuencas Altiplánicas

a) Uso agropecuario: De acuerdo al estudio de AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (2007), la cuenca no sufriría aumento de la demanda agropecuaria.

b) Uso agrícola: De acuerdo al estudio de AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (2007), la cuenca no sufriría aumento de la demanda agrícola.

c) Uso Agua Potable: El uso de agua potable está dado por el abastecimiento de Agua Potable Rural de algunos pueblos, cuya naturaleza del agua es superficial, a excepción de Visviri que es subterránea.

Tabla 6.86 Demanda Futura de Agua Potable Rural de localidades de las cuencas Altiplánicas. Fuente: elaboración propia.

Localidad	Cuenca	Subcuenca	Comuna	Año	N° Personas	Dotación (l/Hab/día)	Caudal (l/s)
Visviri	Altiplánicas	Uchusuma y Caquena	Gral. Lagos	2016	292	100	0,3
				2030	469	100	0,5
Caquena	Altiplánicas	Uchusuma y Caquena	Putre	2016	300	100	0,3
				2030	315	100	0,4
Guallatire	Altiplánicas	Río Lauca	Putre	2016	216	100	0,3
				2030	227	100	0,3
Parinacota	Altiplánicas	Río Lauca	Putre	2016	160	100	0,2
				2030	168	100	0,2
Total				2016			1,1
				2030			1,4

d) Uso Industrial: La cuenca no cuenta con actividad industrial.

e) Uso Minero: En la cuenca se presentan los yacimientos mineros de Choquelimpie y Quiborax, en el que la naturaleza del primero es de minería metálica (Oro) y el segundo de minería no metálica (Ulexita). El primer yacimiento cuenta con derechos de aprovechamiento de agua, sin embargo, se encuentra paralizada temporalmente.

Tabla 6.87 Demanda Futura de Agua de Uso Minero de las cuencas Altiplánicas. Fuente: elaboración propia.

Nombre Mina	Cuenca	Subcuenca	Año	Caudal extracción (l/s)
Choquelimpie	Altiplánica	Río Lauca	2016	0
Quiborax		Salar Surire		
Choquelimpie	Altiplánica		2030	76
Quiborax				

f) Trasvase: No existen antecedentes de variaciones al respecto.

6.3.2.4 Demandas evaporativas

En la siguiente tabla se presentan las demandas evaporativas estimadas de las masas de agua por cada una de las subcuencas, considerando tanto las lagunas, lagos o embalses y los ríos que presentan un escurrimiento durante la mayor parte del año. Se definieron subcuencas de manera concordante a la subdivisión adoptada para la determinación de los Balances Hídricos presentados en el Capítulo 8.

En la Tabla 6.88 se presentan las áreas estimadas del total de masas de agua por subcuenca y las tasas de evaporación mensuales consideradas, de acuerdo a la estación con datos más cercana. Posteriormente, en la Tabla 6.89, se presentan las demandas de agua en l/s mensuales para cada subcuenca considerando las áreas mencionadas anteriormente y las tasas de evaporación. El detalle de cálculo puede ser revisado en el Anexo XII que corresponde al Respaldo de Tablas. Estas demandas no se han incluido en las tablas de resumen de demandas, ya que se trata de demandas naturales, sin embargo, estas son parte del ciclo hidrológico y son consideradas en el balance de cada una de las cuencas.

Tabla 6.88 Cálculo de las áreas de las masas de agua y las tasas de evaporación de cada una de ellas. Fuente: elaboración propia.

Cuenca	Río			Masas de Agua	Área Total [km^2]	Estación Asociada	EVAPORACION MENSUAL [mm/mes] (Datos de la Estación)											
	Largo [km]	Ancho [m]	Área [km^2]	Área [km^2]			ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Concordia	52	0	0	0	0,00													
Lluta Alcérreca	144	3,5	0,504	0,08	0,58	Putre	145	129	151	169	157	150	153	170	179	201	190	170
Lluta Socoroma	39	3,5	0,1365	0,01	0,15	Putre	145	129	151	169	157	150	153	170	179	201	190	170
Lluta Bajo	82	3,5	0,287	0	0,29	Azapa	293	257	255	202	181	154	153	166	186	224	238	263
San José Ausipar	155	3	0,465	0,33	0,80	Putre	145	129	151	169	157	150	153	170	179	201	190	170
San José Bajo	61	0	0	0	0,00	Codpa	169	140	147	122	109	94	104	127	150	177	180	182
Codpa	89	1	0,089	0	0,09	Codpa	169	140	147	122	109	94	104	127	150	177	180	182
Camarones Chilpe	139	4	0,556	5,3	5,86	Codpa	169	140	147	122	109	94	104	127	150	177	180	182
Camarones Conanoxa	57	2	0,114	0	0,11	Codpa	169	140	147	122	109	94	104	127	150	177	180	182
Caquena en Vertedero	18	6	0,108	1,38	1,49	Caquena	127	122	122	116	128	93	102	122	144	155	168	166
Caquena Bajo Vertedero	43	6	0,258	0,03	0,29	Caquena	127	122	122	116	128	93	102	122	144	155	168	166
Lauca	227	8	1,816	9,2	11,02	Cotacotani	129	117	129	158	161	147	153	166	183	214	213	184
Chungara				22,9	22,90	Chungara Ajata	85	86	105	124	120	106	103	115	136	154	156	140
Surire				62,3	62,30	Chungara Ajata	85	86	105	124	120	106	103	115	136	154	156	140

Tabla 6.89 Cálculo de las demandas de agua por evaporación (l/s) de cada una de ellas. Fuente: elaboración propia.

Cuenca	EVAPORACION MENSUAL [l/s]											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Concordia												
Lluta Alcérreca	32	31	33	38	34	34	33	37	40	44	43	37
Lluta Socoroma	8	8	8	10	9	8	8	9	10	11	11	9
Lluta bajo	31	30	27	22	19	17	16	18	21	24	26	28
San José Ausipar	43	42	45	52	47	46	45	50	55	60	58	50
San José Bajo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Codpa	6	5	5	4	4	3	3	4	5	6	6	6
Camarones Chilpe	369	339	321	276	238	212	227	278	339	387	407	398
Camarones Conanoxa	7	7	6	5	5	4	4	5	7	8	8	8
Caquena en Vertedero	71	75	68	67	71	53	57	68	83	86	96	92
Caquena Bajo Vertedero	14	15	13	13	14	10	11	13	16	17	19	18
Lauca	531	533	531	672	662	625	629	683	778	880	905	757
Chungara	727	814	898	1.096	1.026	936	881	983	1.202	1.317	1.378	1.197

6.3.2.5 Demandas evapotranspirativas de los cultivos

Considerando el área cultivada de las cuencas y la distribución de los tipos de cultivos, así como la evapotranspiración potencial estimada en cada cuenca, se ha obtenido un valor mensual de la evapotranspiración real asociada a los cultivos. Este valor no considera tasas de riego ni precipitación, por lo que no corresponde al valor de demanda agrícola. Estos valores se han estimado primero por cultivo y luego por cuenca, a partir de la información obtenida de los estudios de IPLA (1996), Ayala, Cabrera y Asociados (2007), ambos con información de demanda agrícola, y de la medición de las superficies en las imágenes satelitales de Google Earth, utilizando la siguiente fórmula:

$$ETr_c = ETp \cdot k_c \cdot A_c \left(\frac{10^6}{86400 \cdot n° \, días \, del \, mes} \right)$$

En donde:

- ETr_c: Evapotranspiración real del cultivo (l/s)
- ETp: Evapotranspiración potencial de la cuenca (mm/mes)

- k_c: Coeficiente de cultivo
- A_c: Área del cultivo en la cuenca (km^2)

En la Tabla 6.90 se incluyen los valores mensuales estimados de demanda evapotranspirativa en las distintas cuencas. En el caso específico de la cuenca del río San José, se ha realizado una actualización a partir del análisis de imágenes satelitales, debido al importante crecimiento agrícola que se ha producido en esta cuenca en los últimos años.

Tabla 6.90 Demanda evapotranspirativa asociada al área cultivada de las cuencas. Fuente: elaboración propia.

Cuenca	Demanda Evapotranspirativa Mensual (l/s)											
	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR
La Concordia	26	19	17	17	31	64	85	106	94	69	54	35
Lluta	492	516	566	650	957	1.293	1.446	1.706	1.617	1.404	534	529
San José	1.117	895	870	989	1.240	1.444	1.685	1.869	2.024	2.024	1.792	1.374
Chaca-Vítor	84	72	87	97	155	196	217	235	225	212	177	112
Camarones	339	296	337	392	543	677	704	791	726	678	586	439
Uchusuma-Caquena	259	286	331	379	363	436	431	271	114	6	141	290
Lauca	172	190	220	253	242	291	288	181	76	4	94	193

6.4 Mercado del Agua

En el caso de Chile, la asignación de agua está dirigida por mecanismos de mercado, cuyo objetivo es conseguir un uso eficiente del recurso (Hadjigeorgalis, 2008; Houston and Whittlesey, 1986; Saleth *et al.*, 1991). Son estos mecanismos los que hacen que los mercados de agua sean ampliamente conocidos como herramientas de gestión en casos de escasez hídrica (Bjornlund and Rossini, 2010; Luo *et al.*, 2003) ya que, entre otras cosas, son capaces de reflejar los costos económicos de la baja disponibilidad de agua (Pullen and Colby, 2008). La existencia de mercados también es capaz de reducir la vulnerabilidad a fenómenos climáticos extremos, reduciendo la dependencia de la oferta de agua de los agentes con mayor valor (Garrido, 2007) y mejorando los resultados económicos de los agentes de menor valor (Houston and Whittlesey, 1986). Sin embargo, es importante considerar no solo la oferta, sino que también la demanda, es decir, un enfoque conjunto de balance hídrico para la gestión del riesgo (Gil *et al.,* 2011), ya que en muchos casos el problema de escasez se agrava por las altas demandas. En el caso de Arica y Parinacota, la escasez de agua y la creciente demanda de las últimas décadas, unida a la sequía es precisamente el problema fundamental que deben afrontar los recursos hídricos.

En el contexto político local, la actual discusión nacional sobre la reforma del código de aguas enfatiza la gestión sostenible del recurso considerando que el cambio climático incrementa el riesgo de sufrir fenómenos extremos (MOP, 2014). De manera que esta reforma se presenta como una oportunidad para modificar ciertas reglas que permitan un correcto funcionamiento de los mercados de agua en conjunto con el medio ambiente (Boletín 9538-09, 2014). Para ello se requiere de estudios concretos en las zonas más afectadas por los efectos del cambio climático (sequías y escasez hídrica) sobre los mecanismos de asignación del recurso que permitan desarrollar los instrumentos adecuados para lidiar correctamente con el desafío actual del uso del agua en Chile y de adaptación a situaciones de escasez.

Disponer de una visión completa del funcionamiento de los distintos mecanismos de asignación de agua, debería permitir una correcta comparación entre los mismos y solventaría algunas de las preguntas clásicas sobre la eficiencia en el funcionamiento de los mercados de agua. La consideración de distintos tipos de barreras y de los elevados costos de transacción ha justificado en cierta medida la ineficiencia del

mercado. Los datos disponibles para los estudios de caso demuestran la existencia de barreras de diferente naturaleza (Garrick *et al.*, 2013; McCann and Easter, 2004). En Chile, las barreras institucionales han constituido una de las limitaciones a las ventas de derechos al imponer elevados costos (Hadjigeorgalis and Lillywhite, 2004). Es por ello que, la existencia de mercados informales muestra un mayor número de intercambios de agua (Easter *et al.*, 1999; Hadjigeorgalis and Lillywhite, 2004).

En conclusión, en Chile donde los mercados de agua son el mecanismo establecido para su gestión, donde la liberalización del agua debería actuar como un mecanismo de mitigación de eventos extremos (FAO, 2010), sigue siendo imprescindible contar con el conocimiento necesario para hacer un buen uso de ellos. Para ello, se plantea analizar los mercados de agua en la Región de Arica y Parinacota, a través de cuatro puntos fundamentales. Primero se presenta el contexto socioeconómico de la región y su evolución a través de distintas encuestas CASEN, después se plantea un modelo económico teórico de funcionamiento de un mercado de agua en Chile, con el fin de enmarcar el funcionamiento de las distintas transacciones, más adelante se describe un modelo conceptual que fundamentalmente describe y caracteriza las variables más relevantes que afectan a los mercados, y por último se plantea un modelo econométrico que permite evaluar el peso que ciertas variables tienen sobre los precios de venta del agua.

6.4.1 Contexto socio-económico de los mercados de agua

La región de Arica y Parinacota se encuentra situada en la zona extrema norte del país, lo que hace que tenga unas características socioeconómicas y climáticas especiales. En general los ingresos de la región son bajos o medios, siendo la comuna de Arica la que acumula el mayor porcentaje de hogares con ingresos superiores (CASEN). En la sección del modelo conceptual planteado a continuación se puede ver un análisis más en profundidad de este aspecto. El clima de la región es árido y la escasez de agua es evidente especialmente en la última década, ya que el desarrollo económico de la región ha hecho que la demanda de agua aumente, sin embargo la oferta se ha visto mermada especialmente por los efectos del cambio climático. En la región de Arica y Parinacota, la principal fuente de abastecimiento es de tipo subterránea, ya que la superficial es escasa (Informe del Estado del Medio Ambiente, MMA, 2011). La demanda supera a la oferta que está en torno a los 100 m^3/s (Informe del Estado del Medio Ambiente, MMA, 2011).

En este contexto se puede hacer una descripción de los posibles mercados que operarían si se eligieran como mecanismo de gestión eficiente del agua. A continuación se presenta una caracterización teórica de los mercados (Hadjigeorgalis, 2009; Thobani, 1997) y una descripción de la idoneidad como mecanismos de gestión de escasez.

a) Mercados informales: los mercados informales son aquellos que se dan entre dos usuarios de agua sin que medie entre ellos ninguna institución y por tanto su precio y volumen no queda registrado, en general son mercados de derechos o de volúmenes (se explican a continuación), pero con la salvedad que se evitan muchos de los costos institucionales.
b) Mercados formales
    - Bancos de agua: Un banco de agua es una institución central que actúa como cámara de compensación para los usuarios que deseen comprar o vender agua. El agua se vende a un costo con un margen añadido a cubrir los costos de operación del banco, que suelen ser asumidos por el comprador. Los bancos de agua pueden ser instituciones temporales o permanentes.
    - Mercado de derechos: en este caso el precio no se fija por una autoridad central o institución. Son mercados que permiten a los compradores y vendedores para publicar ofertas y demandas de derechos de agua o de agua por lo general a través de las oficinas centrales de las organizaciones de usuarios de agua (OUA) de la comunidad de regantes por medio de una plataforma electrónica.
    - Mercado de volúmenes o mercado spot: Son mercados en los que se transan volúmenes de agua y no derechos, por lo tanto se pueden considerar como arriendos temporales de derechos de uso de agua. Estos mercados tienen la particularidad que no implican la transferencia permanente del derecho de agua. Ya en los 90 se reportan arriendos de agua a agricultores en la ciudad de Arica para cubrir la demanda residencial de agua potable (World Bank, 1997; Hearne & Easter, 1996).
    - Mercados de doble subasta requieren los compradores y vendedores para presentar ofertas cerradas para un volumen específico de agua o derechos permanentes. El operador de bolsa agrega todos los precios de oferta y

demanda para determinar un precio de la piscina en la que el mercado va a borrar la mayor parte del agua.

- Mercado de opciones: Los mercados de derivados implican el uso de opciones o contratos a plazo para realizar transacciones de agua de manera temporal. Los contratos a plazo requieren que el comprador adquiera el agua del vendedor en la fecha fijada en el contrato, y a un precio acordado previamente. Los contratos de opción permiten al comprador renunciar a la compra de agua antes de la fecha fijada en el contrato, y, del mismo modo el vendedor no recibe el pago. La fecha estipulada suele estar ligada a ciertos indicadores que en general tienen que ver con escasez de agua.
- Mercado de derechos de agua y tierra: en algunas ocasiones los derechos de uso de la tierra están unidos a los derechos de agua. No es el caso de Chile, pero sin embargo, si se dan transacciones que incluyen ambos bienes en un mismo precio.
- Arriendo de agua para el medio ambiente: se trata de la creación de programas de compra o arriendo de derechos, fundamentalmente a los regantes para aumentar en los caudales ambientales para la protección de ecosistemas, como peces, fauna y flora. Incluyen fideicomisos de agua, leasing gubernamental y compra de derechos de regantes, programas de recompra y de arriendo.

6.4.2 Modelo Económico

Se plantea un modelo microeconómico que captura el funcionamiento general de los distintos tipos de mercado que pueden existir bajo la regulación chilena, y que demuestra el comportamiento de los mismos como mecanismos de adaptación ante situaciones de escasez hídrica. Se trata de un modelo de optimización, cuya forma resumida incluye distintas alternativas (mercados de derechos, de volúmenes y de opciones). Es decir, refleja en qué forma se transan los derechos de aprovechamiento de agua, que es la transacción más común, pero también incluye la forma en que se transan volúmenes de agua en un momento determinado del tiempo y sin necesidad de que el intercambio sea permanente (es decir, arriendo de derechos de agua), y por último incluye una novedosa herramienta que ha sido utilizada en otras partes del mundo (Estados Unidos o España) que son los mercados de opción. Los mercados de opción en el caso del agua funcionan como mercados de futuro en los que, mediante

un contrato, el vendedor tiene la opción de arrendar su derecho de agua al comprador, siempre que se cumplan ciertas condiciones. Las condiciones están relacionadas con la escasez de agua, por lo que este tipo de contrato puede ser una herramienta útil a la hora de gestionar la sequía o escasez hídrica. La formulación general queda reflejada a en la Tabla 6.91.

Tabla 6.91 Planteamiento del modelo microeconómico de funcionamiento de mercados de agua. Fuente: elaboración propia.

Tipo de mercado	Ingresos netos en t_0	Ingresos netos en t_{0+m}	Ingresos netos en t_{1+m}
Activo fijo transable, mercado spot y mercados de opción	$\pi(A_x, P_{opc}/S, a^*) = [p * Y(a^*) - P_A * A_x + P_{opc}] + [p * Y(a_1^*) + P_{opc}] * \rho$ s.a. $-A_x \leq A_0$ $a^* = argmax\ \Pi(a/S, \tilde{k}, A_0)$ $a_1^* = argmax\ \Pi(a_1/S, \tilde{k}, A_0 + A_x)$	$\Pi(a/S, k, A_0) = [p * Y(a) - P_A * A_x - P_a * a_x - P_{aOpc} * a_{opc} * D + P_{opc}]$ s.a. $a = k_0 * A_0 + a_{opc} * D + a_x$ $-a_x \leq k_0 * A_0$ $-a_{opc} \leq k_0 * A_0$	$\pi(a, a_{opc}, a_x, A_x) = [p * Y(a_1) - P_a * a_{x1} - P_{aOpc} * a_{opc} * D + P_{opc}] * \rho$ s.a. $a_1 = k_1 * (A_0 + A_x) + a_{opc} + a_{x1}$ $-a_{1x} \leq k_1 * (A_0 + A_x)$ $-a_{opc} \leq k_1 * (A_0 + A_x)$

En general este modelo considera el intercambio del bien como un insumo de producción que puede ser agricultura, ya que es el principal usuario de agua con más de un 70% del total. Por lo tanto, $p * Y(a)$ indica el precio de la producción por el rendimiento, y a está relacionado con la cantidad de agua empleada en el proceso de producción, dependiendo de la procedencia del agua existirían distintas adaptaciones del modelo general para reflejar las diferencias tanto de gestión como de comercialización del agua. Entonces, a es el volumen de agua utilizado en el proceso de producción y a^* la cantidad de agua que maximiza ese resultado, a_x *es el volumen de agua neto (diferencia entre compras y ventas),* a_1 es el volumen de agua

correspondiente a los derechos que posee el agricultor en el siguiente periodo, a_{x1} las compras netas del siguiente periodo. Las letras mayúsculas, por el contrario, indican que se trata de derechos de agua en lugar de volúmenes. Entonces, A es la cantidad de derechos de agua total, A_0 la cantidad de derechos de agua inicial, y A_x es la cantidad de derechos de agua netos (diferencia entre los comprados y los vendidos) o compra neta, y A_1 la cantidad de derechos de agua disponibles al inicio del siguiente periodo. Adicionalmente hay que definir un factor de transformación de los derechos en volumen (k). Este factor es importante porque depende del clima, en aquellas zonas, más áridas, como es el caso de Arica y Parinacota, este factor implica un riesgo mayor, y por tanto puede afectar al precio de los derechos de agua. Este y otros puntos se van a comprobar a través del modelo econométrico con los datos recopilados en terreno.

6.4.3 Modelo Conceptual y Modelo Econométrico

Se plantea una caracterización del mercado de agua en la región a partir de las bases de datos recopiladas y creadas. Esta caracterización considerará los distintos mecanismos (mercados de derechos, de volúmenes, bancos de agua, etc.) y los clasificará en relación a su idoneidad como mecanismos de gestión de escasez de agua. Además, considerará el tipo de uso, la transacción y la funcionalidad de cada uno. Esta caracterización debe sentar el marco general para el diagnóstico de los mercados en la Región.

6.4.3.1 Tratamiento de los datos

Para el desarrollo del modelo conceptual y del consiguiente modelo econométrico se requiere de una serie de datos históricos relacionados a las transacciones de mercado de agua en Arica y Parinacota, como lo son las series históricas de clima o de los caudales de los principales ríos de la Región.

Los datos recopilados del Conservador de Bienes Raíces (CBR) han servido como base para este análisis. En ella se recogen los datos de transacciones de derechos desde el año 1988 hasta el 2015. Alrededor de 2.800 transacciones disponen de información sobre su precio, y los años en que éstas están registradas van desde 1988 hasta 2015. Por ello, se han recopilado datos de precipitaciones medias anuales y de caudales entre 1980 y 2015. Se ha seleccionado una estación pluviométrica representativa por cada

comuna, de manera que en Arica se cuenta con información de Azapa, en Camarones de Esquiña, en Putre de Belén y en General Lagos de Humapalca. El criterio de selección se atiene no solo a la representatividad, sino que también a la disponibilidad de datos en series históricas lo suficientemente largas. Lo mismo sucede con los caudales, se seleccionó un caudal medio anual por comuna con el fin de utilizarlo como variable explicativa del modelo econométrico, dando una noción general de la abundancia o escasez de agua para un año determinado y poder compararlo con la venta de derechos.

El conjunto de datos proveniente del conservador de bienes raíces se ha sometido a un proceso de depuración y validación. Primero se han caracterizado las transacciones en cuanto a su unidad hidrológica, es decir, se consideran por separado las transacciones de derechos en Acciones, de las transacciones en l/s y de las que están registradas en minutos. Teniendo en cuenta esta diferenciación, se han eliminado datos anómalos u outliers mediante el criterio del valor medio más menos 3 desviaciones standard. Los datos se depuran en cuanto a precios y caudales. Todos aquellos precios o caudales que superen el valor medio más tres desviaciones estándar del mismo, no se consideran.

Con respecto a los costos de las transacciones, en primer lugar, se transformaron todos los valores a pesos corrientes mediante el valor medio anual de la UF entregado por el Banco Central (2016), y posteriormente se convirtieron los valores a pesos reales de 2008 como se muestra en la siguiente ecuación. Se considera el 2008 porque es el valor de referencia sobre el que se presenta el IPC en las series históricas y empalmadas del INE (2015). Los precios deben aparecer en la misma unidad y expresados en términos reales para no imputar efectos de la inflación a las variaciones de precio que puedan ser debidas a la escasez o abundancia de agua en la Región. Finamente, disponemos de 2.743 transacciones con precio válidas para ser analizadas y utilizadas en el modelo.

$$Precio_{2008} = \left(\frac{PrecioCorriente}{IPC}\right) * 100$$

Adicionalmente, se emplearon datos de ingresos extraídos de las encuestas CASEN de 2003, 2009, 2011 y 2013. Se dispone de ingresos medios por nivel socioeconómico para el análisis socioeconómico. Para fines del modelo econométrico, estos datos se

agregaron hasta obtener un valor medio por comuna para los años señalados. Dado que la base de datos de mercados de agua contiene registros para todos los años desde 1988 hasta 2015, se estimaron los ingresos de los años faltantes mediante una regresión simple por mínimos cuadrados ordinarios que captura la evolución y la tendencia seguida a lo largo del tiempo por comuna, ya que incluye una dummy por comuna. Los resultados de esta regresión son buenos y se muestran en la Tabla 6.92, y se puede destacar que capta las diferencias de ingresos entre las distintas comunas, siendo Arica la de mayores ingresos, el coeficiente de la tendencia es moderado por lo que es un buen estimador de la tendencia del ingreso. A continuación, se muestra la forma de esta regresión y sus resultados.

$$IngresoMedio = a + b * \text{año} + DummyComuna$$

Tabla 6.92 Resultados de la regresión de estimación de la evolución de los ingresos medios por comuna. Fuente: elaboración propia.

Variables	Coeficientes	Significatividad
Arica	2.282,99	0,788
Camarones	-49.343,11	0,584
Putre	-88.161,98	0,335
General Lagos	-105.539,10	0,253

6.4.3.2 Modelo conceptual

En esta sección se plantea un modelo conceptual que analiza el funcionamiento del mercado de agua y que considera los siguientes puntos, muchos de ellos se apoyarán en la base de datos disponible y en la revisión de la literatura:

CARACTERIZACIÓN Y DIAGNÓSTICO SOCIO-ECONÓMICO DE LA REGIÓN, EN RELACIÓN A LOS RECURSOS HÍDRICOS

Como ya se mencionó en la sección 6.4.1, la distribución de ingresos en la región de Arica y Parinacota puede caracterizarse a partir de las encuestas CASEN 2003, 2009, 2011 y 2013. De ellas se extraen los ingresos y la población que recibe esos ingresos. Así se puede determinar qué porcentaje de la población está en un determinado rango de ingresos por comuna, y cómo han evolucionado esos porcentajes a lo largo del tiempo, el que se puede ver en la Tabla 6.93. Los rangos de ingresos que se

consideran son: bajo (menos de 350.000 pesos), medio (entre 350.000 y 800.000 pesos) y alto (más de 800.000 pesos).

La Tabla 6.93 muestra como la comuna de Arica es la que durante todo el periodo ha presentado un mayor porcentaje de población con ingresos totales por nivel alto. Sin embargo, la comuna de General Lagos es un ejemplo de lo contrario, donde en la última encuesta CASEN que se ha registrado (2009) no tiene ninguna persona con ingresos superiores a 800.000 pesos. En el otro lado de la distribución, aquellas comunas más rurales presentan mayor peso. Por ejemplo, Putre pasó de tener un 78% de la población con un ingreso medio bajo en 2003 a un 42% en 2013. En general se observa una región con la mayoría de su población en los bloques de ingresos caracterizados como bajos o medios, esto es un factor muy relevante cuando se analizan los mercados de agua, ya que la capacidad de pago se ve reducida por la restricción presupuestaria.

Tabla 6.93 Evolución de los ingresos en tres niveles para todas las comunas. Fuente: modificado de CASEN (2003, 2009, 2011 y 2013).

Comuna	Año	Nivel de ingresos	Ingreso medio por nivel	% población por nivel
Arica	2003	bajo <350.000	197.084	48,82
		medio 350.000 <x< 800.000	519.025	34,23
		alto >800.000	1.456.820	16,95
	2009	bajo <350.000	215.728	30,17
		medio 350.000 <x< 800.000	550.859	33,72
		alto >800.000	1.514.166	36,10
	2011	bajo <350.000	236.496	32,10
		medio 350.000 <x< 800.000	547.395	38,01
		alto >800.000	1.502.849	29,89
	2013	bajo <350.000	234.332	26,98
		medio 350.000 <x< 800.000	553.507	39,41
		alto >800.000	1.506.066	33,61

Comuna	Año	Nivel de ingresos	Ingreso medio por nivel	% población por nivel
Camarones	2003	bajo <350.000	169.952	59,29
		medio 350.000 <x< 800.000	523.538	33,57
		alto >800.000	1.328.819	7,14
	2009	bajo <350.000	187.621	45,93
		medio 350.000 <x< 800.000	517.297	36,10
		alto >800.000	1.423.282	17,97
	2011	bajo <350.000	132.700	30,77
		medio 350.000 <x< 800.000	552.780	53,85
		alto >800.000	1.721.881	15,38
	2013	bajo <350.000	231.678	61,00
		medio 350.000 <x< 800.000	561.920	30,85
		alto >800.000	1.090.743	8,15
Putre	2003	bajo <350.000	181.510	78,49
		medio 350.000 <x< 800.000	491.301	17,74
		alto >800.000	908.511	3,76
	2009	bajo <350.000	209.491	67,10
		medio 350.000 <x< 800.000	558.188	27,51
		alto >800.000	1.485.885	5,40
	2011	bajo <350.000	233.308	44,32
		medio 350.000 <x< 800.000	533.391	43,18
		alto >800.000	1.205.512	12,50
	2013	bajo <350.000	205.061	42,70
		medio 350.000 <x< 800.000	520.882	39,89
		alto >800.000	1.443.345	17,42
General Lagos	2003	bajo <350.000	152.695	76,92
		medio 350.000 <x< 800.000	473.029	22,22
		alto >800.000	1.899.409	0,85
	2009	bajo <350.000	183.417	80,39
		medio 350.000 <x< 800.000	550.735	19,61
		alto >800.000	-	0

En cuanto a la relación entre la estructura socioeconómica de la región y la disponibilidad de agua y participación en mercados, se presenta una serie de gráficos que reflejan la evolución del precio pagado por comuna y qué comunas participan más en el mercado. Dada la estructura de los datos registrados en el conservador de bienes raíces, se debe hacer un análisis por separado de los derechos de agua registrados en

minutos, de los registrados en l/s y de los registrados en Acciones, para que los gráficos sean comparables y legibles.

La Figura 6.20 muestra la evolución del precio pagado por el agua (registrada en minutos), y por tanto la medida de comparación se da en CLP reales de 2008 por minuto. Arica (en azul) es la principal comuna con transacciones de este tipo, junto con Camarones que registra dos en todo el periodo. Hay que señalar que, pueden existir estas transacciones en otras comunas, pero que al no registrar precio en la base de datos, no son consideradas para esta parte del estudio. El precio del agua pagado por minuto va desde menos de un millón de pesos hasta casi 8 millones de pesos al final del periodo.

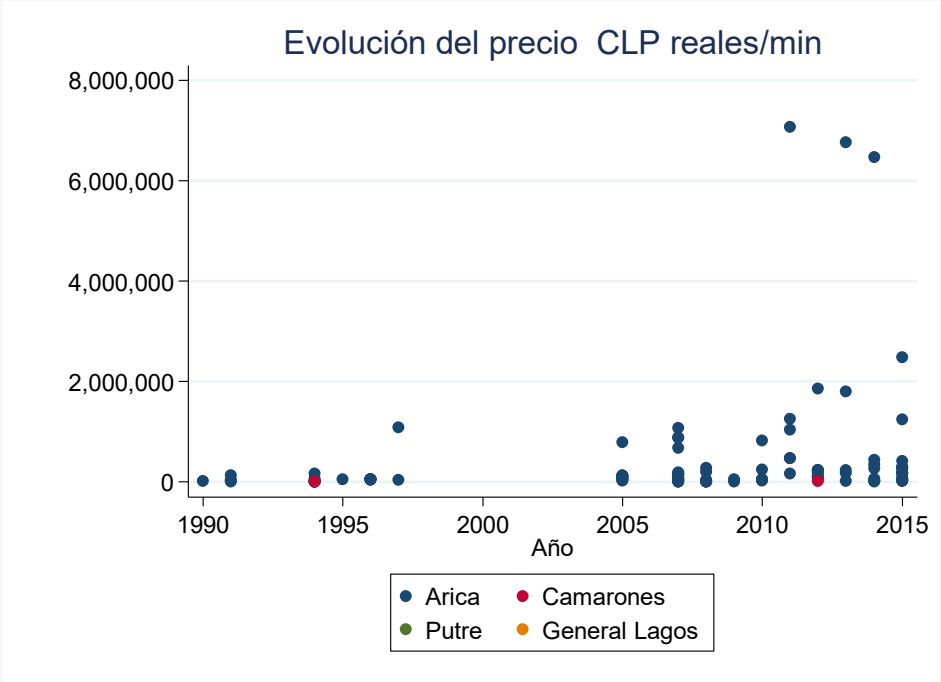


Figura 6.20 Evolución del precio en CPL reales de 2008 por minuto de caudal transado por comuna. Fuente: elaboración propia.

La Figura 6.21 por su parte, muestra una situación muy diferente con respecto a los caudales transados en l/s, donde la participación de las comunas es mucho más homogénea, participando todas ellas desde mediados de los 90 hasta la actualidad. Los precios pagados también siguen una leve tendencia creciente, pero en general se mantienen por debajo de los 50 millones de pesos, salvo en algunos casos extremos, que merecen mayor atención para su análisis.

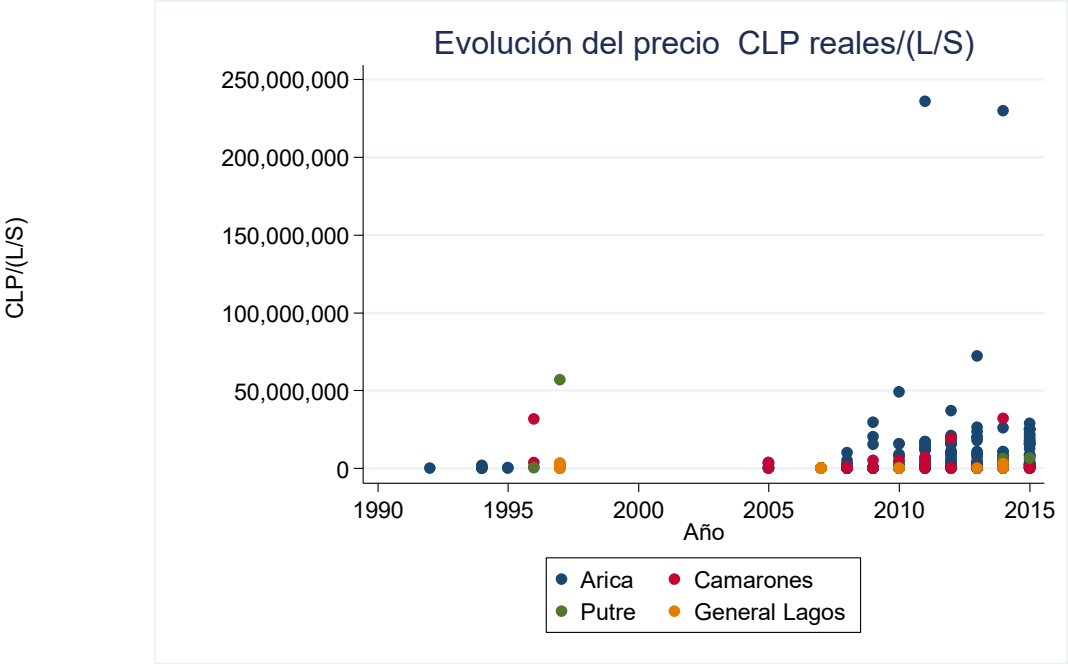


Figura 6.21 Evolución del precio en CPL reales de 2008 por l/s de caudal transado y por comuna. Fuente: elaboración propia.

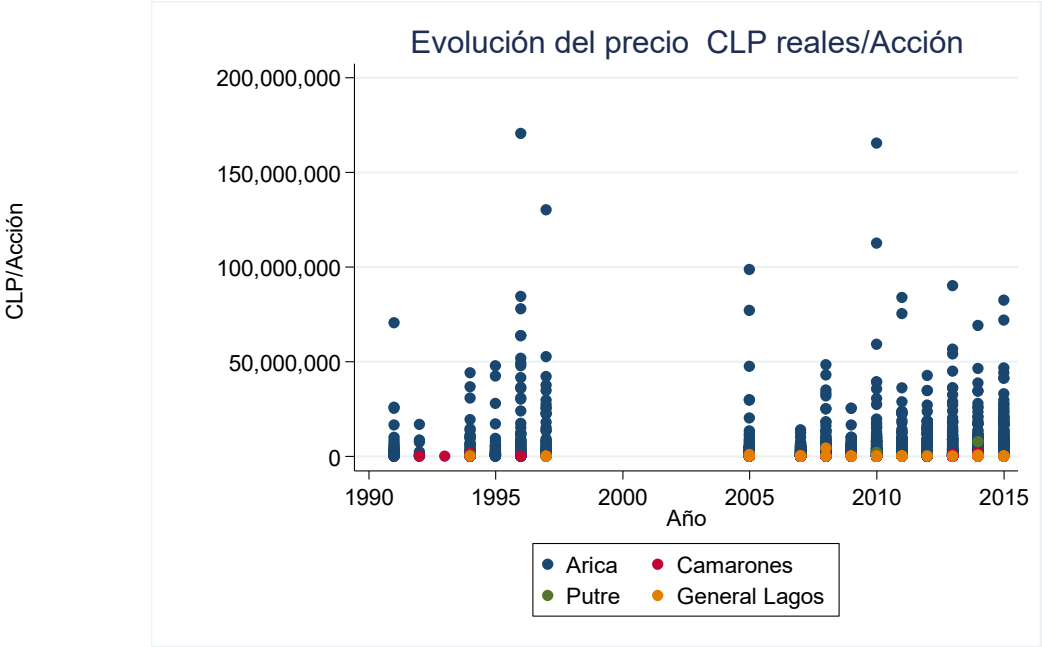


Figura 6.22 Evolución del precio en CPL reales de 2008 por acción transada y por comuna. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 6.22 contiene la evolución de los precios por acción. Este tipo de transacción es la más común y a la vez la más heterogénea en cuanto a los precios. Los valores pagados por lo general están por debajo de los 50 millones de pesos, pero la variabilidad es muy elevada llegando hasta casi 200 millones. Cabe señalar que la comuna con mayor participación de nuevo es Arica.

NÚMERO DE TRANSACCIONES PRODUCIDAS; SU PERFECCIÓN O IMPERFECCIÓN

El número de transacciones consideradas fue de 2.743, que corresponden a transacciones válidas con precio y caudal determinado en el CBR de Arica. En cuanto a la perfección o imperfección de las mismas, por estar registradas en el CBR, se trata de transacciones legales, sin embargo, nuestro análisis descartó aquellas transacciones con valores anómalos que pueden deberse a aparecer en conjunto con la venta de tierra o incluso a errores de digitación. Y en cuanto a la evolución del número de transacciones en el tiempo, se aprecia en la base de datos que están presentes desde 1988, y que en la última década aumentan bastante más que en las dos anteriores.

COSTOS TRANSACCIONALES, TANTO DIRECTOS COMO INDIRECTOS

En economía de Recursos Naturales las transacciones de bienes o servicios que afectan al medio ambiente pueden producir externalidades. Una externalidad es un costo no registrado en términos monetarios en la compra-venta del bien del que se trate. En el caso del agua, se pueden producir numerosas externalidades, como por ejemplo contaminación de cauces aguas abajo en el caso de mineras u otras industrias. Sin embargo, las externalidades o costos indirectos no quedan registrados en los CBR, por lo que es imposible medirlos si no existe un estudio dedicado exclusivamente a ese fin. Sin embargo, existe otro costo indirecto que ha sido reportado en la literatura de manera recurrente cuando se habla de mercados de agua como herramientas de gestión de sequía. Este costo es el costo de transacción, que incluye el costo de transportar el agua desde el punto donde se vende hasta el punto donde se compra y se usa. El análisis de estos costos con datos reales requiere también de estudios específicos que dimensionen su valor en la región de Arica y Parinacota. Pero si es importante mencionar que no es un costo menor y que hay que considerarlo a la hora de proponer los mercados de agua como herramientas útiles de gestión. Por la

naturaleza del agua, su transporte y almacenamiento no se puede considerar como el de otro commodity cualquiera.

En cuanto a los costos directos de las transacciones, a partir de la información del CBR podemos identificar el costo de la compra-venta. El gráfico de la Figura 6.23 contiene la evolución de los costos totales por comuna. El mayor peso se encuentra localizado en Arica, donde supera los mil millones de pesos anuales a partir de 2012. El resto de comunas, acorde a su nivel socioeconómico menor, tienen un gasto mucho menor.

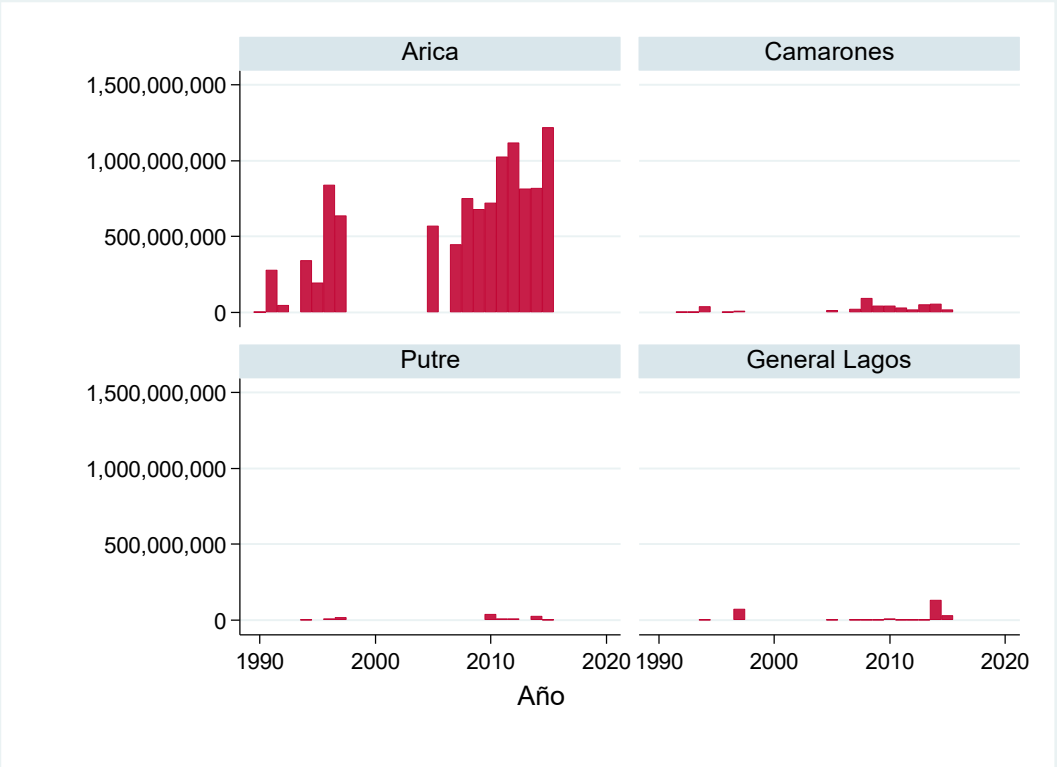


Figura 6.23 Evolución de los costos directos totales del mercado de agua por comuna. Fuente: Elaboración propia.

LA DISPONIBILIDAD DEL RECURSO, CON SU IMPACTO EN EL NÚMERO DE TRANSACCIONES SEGÚN SU MAYOR O MENOR DISPONIBILIDAD

Este punto de la caracterización de los mercados es muy relevante y tiene relación con el modelo econométrico que se propone más adelante. La relevancia radica en poder comprobar si la escasez de agua hace que aumente el número de transacciones, y por tanto demuestre que en momentos donde el agua se vuelve un bien más valorado, se

aprecie un mayor movimiento del mercado que esté tratando de redistribuir el recurso de una manera más eficiente.

A continuación, se presenta el análisis que enfrenta el número de transacciones con el caudal. Se asume para esta interpretación que el caudal representa la disponibilidad de agua por comuna. Se asume un caudal medio anual representativo de cada comuna y se enfrenta al número de transacciones ocurridas en la misma comuna durante el mismo año. La selección del caudal medio anual es una simplificación, pero resulta muy útil como indicador representativo para el análisis.

Sin embargo, en la Región de Arica y Parinacota, donde la escasez de agua es sistémica, y la aridez es muy elevada (con ríos que en los años más secos no tienen caudal), este principio de la economía no se cumple del todo. En general, en la Figura 6.24 se observa que cuanto menos caudal está disponible, existe un menor número de transacciones (se comprueba con los datos). Existe una segunda interpretación de la Figura 6.24, y es que para caudales menores de 0,5 l/s no se dan (a penas) transacciones, ya que la disponibilidad de agua es casi nula. Si el gráfico se analiza a partir de 0,5 l/s, si se cumpliría el principio de funcionamiento de los mercados, porque para caudales bajos se dan muchas transacciones y para caudales alto estas transacciones vuelven a disminuir.

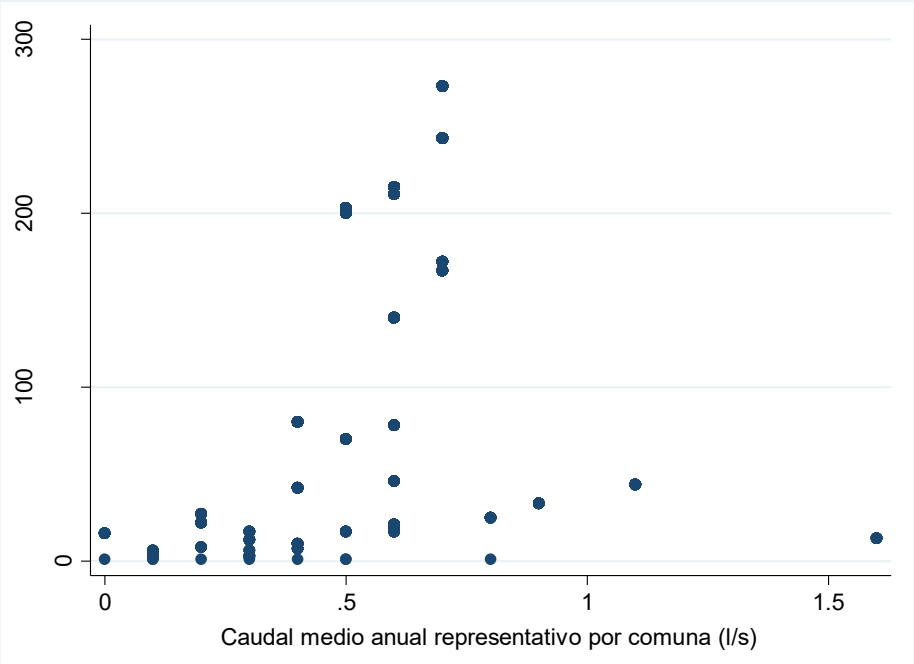


Figura 6.24 Número de transacciones en función de la disponibilidad de agua por comuna. Fuente: elaboración propia.

Sin embargo, lo que realmente refleja la relación entre la escasez y las transacciones del mercado es el precio pagado por las mismas. La Figura 6.25 contiene el precio por unidad de caudal enfrentado al caudal medio anual por comuna (caudal representativo o indicador de disponibilidad de agua en un año seco o abundante). Si observamos el comportamiento de las transacciones en acciones es muy similar al de la Figura 6.25, y podría tener una interpretación muy parecida, para aquellos años donde la disponibilidad de agua no es cero (o prácticamente cero) el precio del agua aumenta, esto es, el valor del agua refleja el valor de escasez, y para caudales mayores, el precio de la acción baja drásticamente. Sin embargo, al analizar los mercados de acciones hay que ser cuidadosos, ya que pueden tener costos de transacción elevados, especialmente en tiempo, de manera que, si una acción se compra en una temporada seca, puede no ser efectiva hasta la siguiente temporada, donde existe incertidumbre sobre la disponibilidad futura del recurso.

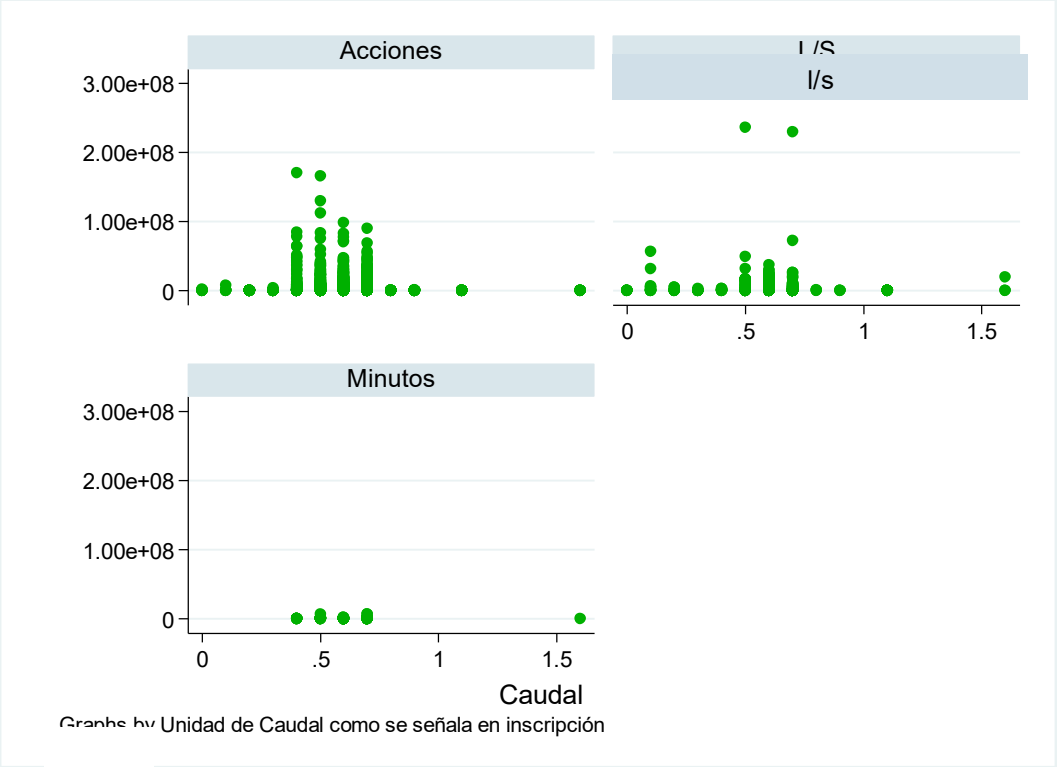


Figura 6.25 Precio por unidad de caudal en función del caudal medio anual por comuna (Caudal representativo). Fuente: Elaboración propia.

La Figura 6.25 también muestra las transacciones en l/s y en min, con respecto a las últimas no se aprecia ninguna variación en el precio con respecto a la disponibilidad del recurso, y se podría afirmar que, si la venta se registra en minutos de uso de agua, el efecto de los mercados no existe. Pero, en el caso de las transacciones en l/s, se vuelve a observar un comportamiento de precios elevados para caudales bajos (que no sean cero o casi cero) y una bajada del precio para caudales bajos. Este tipo de transacciones puede estar asociada a una particularidad, y es que al tratarse de l/s podemos estar ante arriendos de agua. Los arriendos de agua son los mecanismos más flexibles cuando se está gestionando una sequía o un momento de escasez hídrica, ya que no es necesario el traspaso permanente del título de derecho.

ANÁLISIS DE LA INFRAESTRUCTURA EXISTENTE Y PROYECTADA, CON UN ANÁLISIS EX ANTE Y EX POST SOBRE EL MODELO DE LOS MERCADOS

En cuanto a las grandes obras de infraestructura planteadas por el gobierno existe un plan de una Planta desaladora para Arica, con capacidad para 200 l/s, que sustituiría a las captaciones del Valle de Azapa, y cuya inversión estimada es de MMUS$30 (DGA).

Adicionalmente la DOH programa entre los años 2015 y 2017, el inicio de la construcción de obras de canales y entubamientos, en el que uno de los principales es el Entubamiento del Canal Azapa. Este tipo de obras mejora la distribución del agua y desde el punto de vista de los mercados disminuye los costos de transacción.

ANALIZAR LA EVOLUCIÓN DEL NIVEL DE PRECIOS DE LOS DERECHOS DE AGUAS EN LA REGIÓN

Para analizar la evolución del nivel de precios de los derechos de agua en la Región se presentan tres gráficos (divididos por el tipo de caudal que se transa), de acuerdo a la evolución del precio unitario registrado en el CBR. El análisis se hace en CLP reales de 2008 para no generar confusiones. Las variaciones de los precios entre año y año no incluyen los aumentos en el IPC, y por ese motivo, gráficamente no se observan pendientes pronunciadas. Pero si se puede afirmar que los precios han crecido en todos los casos, demostrando por un lado la mayor actividad del mercado en la última década, y por otro las fuertes presiones entre la oferta y demanda de agua que se dan en la zona a medida que el crecimiento económico es mayor y las necesidades del recurso aumentan.

El aumento del precio más notorio se da en los derechos vendidos en minutos (Figura 6.26), mientras que la mayor heterogeneidad la presentan las acciones (Figura 6.28). Observando los datos disponibles se puede afirmar que en la región de Arica y Parinacota no hay especulación con el agua, dada su baja disponibilidad general a lo largo del tiempo.

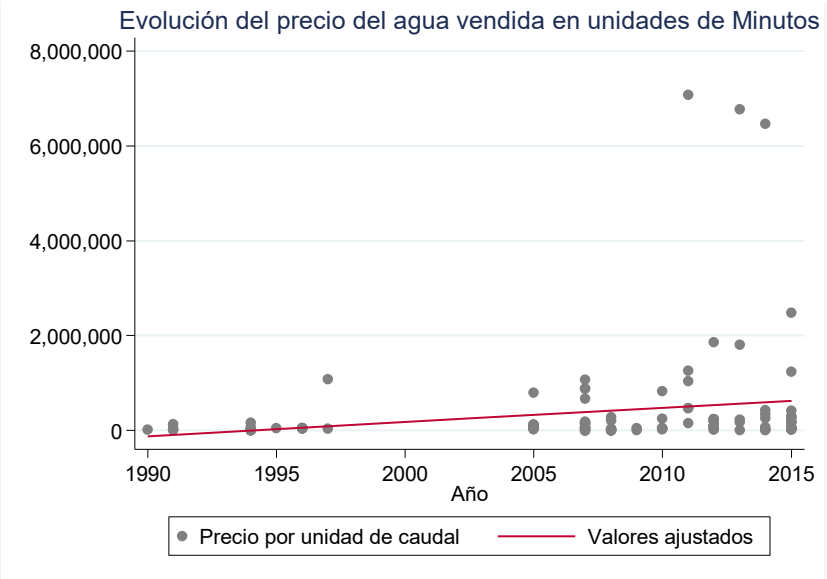


Figura 6.26 Evolución histórica del precio del agua transada en unidades de caudal de minutos. Fuente: Elaboración propia.

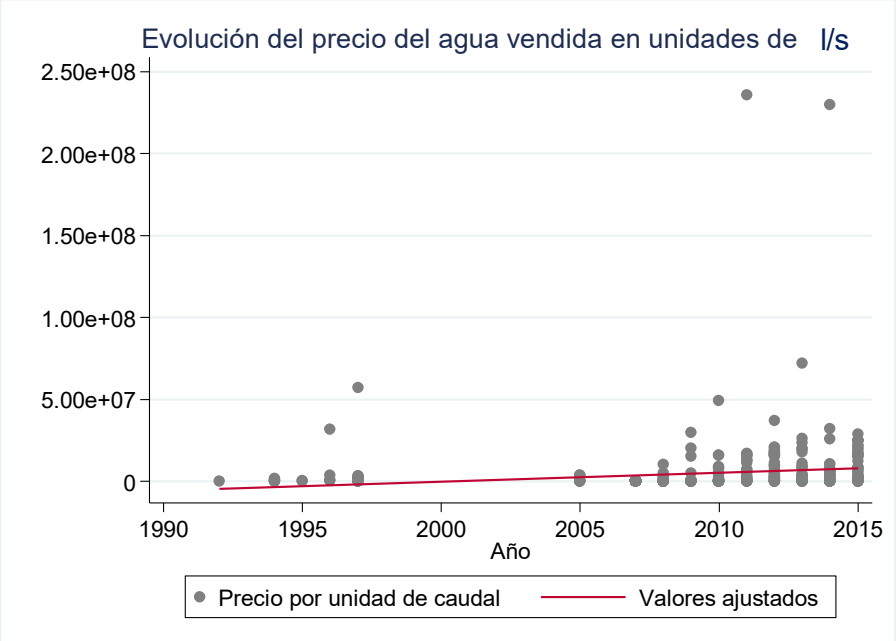


Figura 6.27 Evolución histórica del precio del agua transada en unidades de caudal de l/s. Fuente: Elaboración propia.

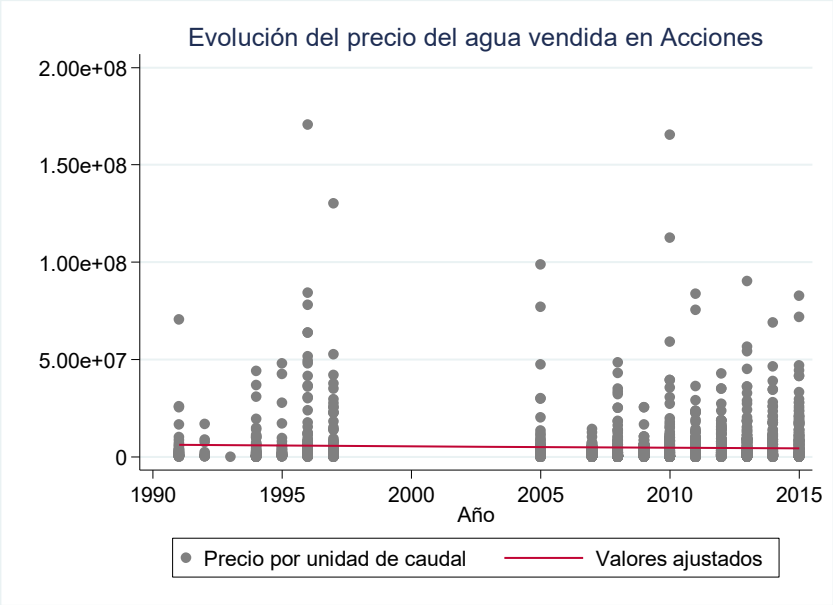


Figura 6.28 Evolución histórica del precio del agua transada en Acciones. Fuente: Elaboración propia.

IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LOS PARTICIPANTES EN EL/LOS MERCADOS Y COMO ÉSTOS INTERACTÚAN

El mayor énfasis en algunos estudios regionales está puesto en la estimación de demandas del recurso en que se diferencian los tipos de uso, los derechos concedidos, derechos ancestrales y las necesidades hídricas confrontado con la disponibilidad del recurso. En la cuenca de la quebrada Chaca-Vítor: Mayco (2013) obtuvo información acerca de los usuarios y derechos asociados, realizando un catastro de derechos superficiales y subterráneos otorgados y solicitados, un catastro de usuarios y un catastro de infraestructura asociada al uso.

La Tabla 6.94 contiene el número de transacciones y el valor medio de la transacción (Pesos/unidad de caudal) para aquellas OUA que tienen más de una transacción en acciones. Se identifican así aquellas OUA con mayor actividad en el mercado de aguas. El precio medio pagado por acción oscila desde los 48.000 pesos hasta los 9 millones. Existen valores elevados que responden a la conversión de una acción en l/s. El precio varía dependiendo del rendimiento de la misma y de la escasez del recurso.

Tabla 6.94 Transacciones de acciones y valor medio de las transacciones por Organización de Usuarios del Agua (OUA). Fuente: Elaboración propia.

OUA a que pertenece	N(n_tran~s)	mean(precio~l)
CDA Canal Amasaca Dos	2	13.889
CDA Canal Beneficencia	2	6.658.483
CDA Canal Beneficencia	4	4.467.823
CDA Canal Beyzan-Cora	2	537.207
CDA Canal Casicasco	2	48.211
CDA Canal Chacabuco	11	883.219
CDA Canal Chiñane	2	1.549.374
CDA Canal Chupisilca	3	5.354.638
CDA Canal Dos Oriente	2	6.084.816
CDA Canal Dos Poniente	2	6.084.816
CDA Canal El Muro	7	3.104.574
CDA Canal Huancarane	4	98.206
CDA Canal Ingenio	2	7.436.997
CDA Canal Mancaruma-Chulpane	3	7.298.528
CDA Canal Manzanane	3	7.436.996
CDA Canal Murmuntane Uno	2	9.145.532
CDA Canal Pachama	2	8.031.956
CDA Canal Poconchile	2	401.598
CDA Canal Pueblo de Chapiquiña	2	4.426.784
CDA Canal Pueblo de Socoroma	2	2.231.099
CDA Canal Sabiñaya	2	3.049.169
CDA Canal Santa Raquel	2	127.824
CDA Canal Sascapa	11	1.329.166
CDA Canal Tres Poniente	2	73.051
CDA Canal Valles Hermosos	8	3.052.686
COMCA	195	5.480.343

ANÁLISIS DE LA EVOLUCIÓN DE LOS COSTOS DE PRODUCCIÓN DE 1 l/s DE CADA UNA DE LAS FUENTES PRODUCTIVAS EN RELACIÓN A SUS FUENTES Y SECTORES

La información de los costos de producción de agua potable está disponible en la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS). Para el año 2016 las tarifas del agua potable de Aguas del Altiplano en Arica se divide en los siguientes ítems (Tabla 6.95).

Tabla 6.95 Costos de producción de agua potable en Arica (2016). Fuente SISS.

Cargos	Valores
Cargo fijo por cliente ($/mes)	786
Cargos variables ($/m^3)	
Agua potable con flúor Arica (no punta)	861,83
Alcantarillado no punta y punta Arica	399,54
Agua Potable con flúor Arica (punta)	856,27
Sobreconsumo agua potable con flúor Arica (punta)	2.276,06

BENEFICIOS ECONÓMICOS DEL MERCADO

En cuanto a los beneficios económicos y sociales que cada sector participante del mercado origina, se puede hacer una lectura general en base a la literatura. En general, los estudios sobre mercados de agua en Chile reportan ganancias entre los participantes en el mercado (Rosegrant *et al.*, 2000). Sin embargo, no existen estudios específicos para la región de Arica donde se puedan extender las mismas conclusiones.

ACAPARAMIENTO DEL RECURSO HÍDRICO Y BARRERAS DE ENTRADA

La DGA reconoce el acaparamiento por parte de empresas en aquellas regiones con mayor disponibilidad de agua, sin embargo, no hay evidencia de acaparamiento en la región de Arica. Solo las semilleras podrían tener algo más de capacidad, pero no producen perjuicios mayores y no es demostrable el acaparamiento a partir de los datos disponibles.

ASPECTOS RELACIONADOS CON MERCADOS INFORMALES, NO LEGÍTIMOS Y OTRAS DISTORCIONES EVIDENCIADAS

En general, el uso de los mercados de agua en Chile han sido ampliamente tratados por la literatura especializada (Alevy *et al.*, 2012; Donoso, 2006; Hearne and Donoso, 2005; Rosegrant and Gazmuri, 1995). Una de las conclusiones clave a las que llegan estos estudios es que los mercados están guiados por la demanda desde los usos relativamente elevados y facilitados por bajos costos de transacción solo en aquellos valles en que la infraestructura existente permite el transporte y la acumulación del agua. En la ausencia de estas condiciones, las transacciones formales son menos comunes (Hearne and Donoso, 2005). Unido a esto aparece la restricción

presupuestaria que limita a los usuarios a realizar transacciones informales no registradas en los CBR y que tengan menores costos institucionales y de transacción.

Esto nos lleva a pensar que en el caso de Arica y Parinacota puedan existir mercados informales, pero la base de datos del CBR en ningún caso puede reflejar dichas transacciones, por lo que se requeriría de un estudio más detallado para llegar a conclusiones ampliamente aceptadas.

EXPECTATIVAS Y REALIDAD DE LA INFLUENCIA ESPERADA DE LAS MODIFICACIONES AL CÓDIGO DE AGUAS EN EL MERCADO DEL AGUA

En el contexto político de Chile, la actual discusión nacional sobre la reforma del código de aguas enfatiza la gestión sostenible del recurso considerando que el cambio climático incrementa el riesgo de sufrir fenómenos extremos (MOP, 2014). De manera que esta reforma se presenta como una oportunidad para modificar ciertas reglas que permitan un correcto funcionamiento los mercados de agua en conjunto con el medio ambiente (Boletín 9538-09, 2014). Para ello se requiere de estudios concretos en las zonas más afectadas por los efectos del cambio climático (sequías y escasez hídrica) sobre los mecanismos de asignación del recurso que permitan desarrollar los instrumentos adecuados para lidiar correctamente con el desafío actual de uso del agua en Chile y de adaptación a situaciones de escasez.

6.4.3.3 Modelo econométrico de análisis de datos

Con la definición del modelo microeconómico se procede a la caracterización a través de un modelo econométrico explicativo que se desarrolla a partir de la base de datos elaborada y que debe ser capaz de capturar y explicar aspectos claves del funcionamiento del mercado en la Región, tales como:

- Características y comportamiento (general) de los distintos usuarios o consumidores
- Disponibilidad del recurso, valoración económica (precios según segmento), disposición a pagar, costos de producción (según sea el caso), entre otras
- Determinar un escenario general de la situación actual de/los mercado/s, con sus principales variables determinantes, y la situación deseada, en base a un análisis de una propuesta de mejoramiento u optimización en el uso y comercialización del recurso.

Del mismo modo que en el modelo conceptual, el modelo econométrico se plantea considerando por separado la unidad en que se transa el derecho de agua, es decir, se plantea un modelo general que se aplica en tres escenarios distintos: i) transacciones realizadas en l/s; ii) transacciones realizadas en unidades de caudal de minutos; y, iii) transacciones realizadas en Acciones.

El modelo explica las variaciones en los precios unitarios pagados (en pesos reales de 2008, actualizados mediante le IPC), en función de una serie de variables clave. Las variables explicativas tienen en cuenta dos tipos de valores, los relacionados a los ingresos y los relacionados a la disponibilidad de agua. Se realizaron distintas pruebas en las que se descartaron aquellas variables que no aportaban ningún valor al modelo y finalmente el modelo resultante tiene la forma de las siguientes ecuaciones (para los tres casos).

$$\hat{I}_{jy} = \lambda + \theta * A_y + \eta DC_j + \varepsilon \qquad (1)$$

$$P_{ijy} = \zeta + \alpha * CT_{ijy} + \beta * \hat{I}_{jy} + \gamma * CC_{jy} + \varepsilon \qquad (2)$$

La primera ecuación corresponde a una etapa previa en la que se estiman los ingresos para todos los años a partir de las CASEN 2003, 2009, 2011 y 2013, como se explicó en la sección anterior de "tratamiento de los datos", y los resultados de esta regresión se detallaban en la Tabla 6.92. Esta regresión nos permite tener una serie histórica de ingresos completa para todos los años, que es una tendencia de los mismos considerando las diferencias entre ellos por causa de la comuna en la que se encuentren. De modo que, $\hat{I}_{jy}$ son los ingresos estimados para la comuna j y el año y (entre 1988 y 2015), A_y es el año, DC_j es una variable dummy para las comunas.

La segunda ecuación es el modelo econométrico propiamente tal, que predice el precio del agua en función de las variables explicativas. Donde P_{ijy} es el precio real unitario pagado por la transacción por el individuo i en la comuna j y en el año y, CT_{ijy} es el caudal transado en la misma transacción del individuo i en la comuna j y en el año y, $\hat{I}_{jy}$es el ingreso medio modelado en la primera etapa del modelo y que representa el ingreso medio de la comuna j en el año y; y por último CC_{jy} es el caudal medio anual representativo para una comuna j y un año y; ε es el error. En los dos casos las ecuaciones se estiman por mínimos cuadrados ordinarios.

La Tabla 6.96 muestra los resultados del modelo econométrico planteado. En todos los casos la mayoría de las variables explicativas son muy significativas o significativas. El caso que mejor responde es el de aquellas transacciones realizadas en l/s donde todas las variables explicativas son muy significativas, lo que quiere decir que la mayor parte del precio de venta del agua en l/s se explica por los ingresos medios de la comuna, el caudal transado (cuanto más caudal más precio) y el caudal medio comunal (cuanto menos caudal disponible menor es el precio). En el caso de las transacciones hechas en minutos, los ingresos no son significativos y el caudal transado y el caudal medio anual son significativos con el mismo signo que en el caso anterior. Esto tiene mucho sentido, ya que demuestra que los mercados reaccionan a la escasez y funcionan como mecanismos que compensan económicamente a las partes involucradas.

Tabla 6.96 Resultados del modelo econométrico de precios del agua. Fuente: elaboración propia.

	Tipo de venta					
	l/s		Minutos		Acciones	
Variables explicativas	Valor	Significatividad	Valor	Significatividad	Valor	Significatividad
Caudal transado	46.121,13	Significativo	8.680,74	Significativo	-4.957,78	Muy significativo
Ingresos	69,20	Muy significativo	26,74		2,02	
Caudal medio anual	-7.938.915,00	Muy significativo	-4.963.004,00	Significativo	-4.214.041,00	Muy significativo

En el caso de las transacciones en Acciones aparece un resultado contra intuitivo, y es que a mayor número de acciones, menor es el precio. Sin embargo, la interpretación de este signo va a depender de la transformación de esas acciones a caudal. Es decir, si las acciones transadas a un mayor precio otorgaban derecho para el uso de mayor cantidad de agua, el resultado del modelo sería lógico. Es importante conocer el factor de conversión de las acciones a litros o minutos para poder medir su impacto. Adicionalmente hay que señalar que el número de observaciones en las tres estimaciones es de 423 en l/s; de 2.202 en Acciones y de 117 en Minutos.

Los resultados detallados del modelo se presentan en la Tabla 6.97. Sin embargo, en general los modelos econométricos empleados consideran variables explicativas que son significativas o muy significativas, esto quiere decir, que su variabilidad influye directamente en la variabilidad de la variable a explicar. Para nuestro caso, la variable a explicar es el precio del agua, y las variables que la explican en forma significativa o muy significativa estadísticamente son el caudal transado, los ingresos de la comuna y el caudal medio anual. Esto parece intuitivo ya que, dependiendo del caudal medio

anual, que es un proxi de la disponibilidad de agua en un determinado año, el precio de las transacciones se verá influenciado. Cuanto menor es el caudal medio anual, mayor es el precio del agua. Algo similar ocurre con el caudal total transado, en que cuanto mayor es el mismo, mayor es el precio. Esto se comprueba estadísticamente en todos los tipos de transacciones. Los caudales transados, sin embargo, son muy significativos solo en las transacciones que se realizan en l/s, quizás como reflejo de la amplia muestra con la que se cuenta, donde el efecto entre comunas y años se puede apreciar. En el caso de los ingresos, aquellas comunas con menores ingresos, pagan menos por el agua. Los resultados del modelo demuestran cómo el mercado de agua en la práctica responde al funcionamiento esperado en la teoría.

Tabla 6.97 Resultados detallados del modelo econométrico. Fuente: elaboración propia.

```
. regress  precio_real caudal_transado ingreso_modelado caudal_comunal  if  unidad_caudal=="L/S"
```

Source	SS	df	MS		
Model	2.3835e+15	3	7.9449e+14	Number of obs	423
Residual	3.5945e+16	419	8.5787e+13	F(3, 419)	9.26
				Prob > F	0.0000
				R-squared	0.0622
				Adj R-squared	0.0555
Total	3.8328e+16	422	9.0826e+13	Root MSE	9.3e+06

precio_real	Coef.	Std. Err.	t	P>|t|	[95% Conf.	Interval]
caudal_transado	46121.13	25254.23	1.83	0.069	-3519.639	95761.9
ingreso_modelado	69.19909	14.13153	4.90	0.000	41.42157	96.97662
caudal_comunal	-7938915	2295740	-3.46	0.001	-1.25e+07	-3426313
_cons	-4.14e+07	1.00e+07	-4.12	0.000	-6.12e+07	-2.17e+07

```
. regress  precio_real caudal_transado ingreso_modelado caudal_comunal  if  unidad_caudal=="Acciones"
```

Source	SS	df	MS		
Model	1.4891e+15	3	4.9636e+14	Number of obs	2202
Residual	9.1289e+16	2198	4.1533e+13	F(3, 2198)	11.95
				Prob > F	0.0000
				R-squared	0.0161
				Adj R-squared	0.0147
Total	9.2778e+16	2201	4.2152e+13	Root MSE	6.4e+06

precio_real	Coef.	Std. Err.	t	P>|t|	[95% Conf.	Interval]
caudal_transado	-4957.778	1339.621	-3.70	0.000	-7584.834	-2330.722
ingreso_modelado	2.021714	5.860299	0.34	0.730	-9.470589	13.51402
caudal_comunal	-4214041	944299	-4.46	0.000	-6065853	-2362229
_cons	5096679	4234402	1.20	0.229	-3207170	1.34e+07

```
. regress  precio_real caudal_transado ingreso_modelado caudal_comunal  if  unidad_caudal=="Minutos"
```

Source	SS	df	MS		
Model	1.1171e+14	3	3.7236e+13	Number of obs	117
Residual	2.8396e+15	113	2.5129e+13	F(3, 113)	1.48
				Prob > F	0.2233
				R-squared	0.0379
				Adj R-squared	0.0123
Total	2.9513e+15	116	2.5442e+13	Root MSE	5.0e+06

precio_real	Coef.	Std. Err.	t	P>|t|	[95% Conf.	Interval]
caudal_transado	8680.736	5489.048	1.58	0.117	-2194.059	19555.53
ingreso_modelado	26.74319	30.06003	0.89	0.376	-32.81115	86.29752
caudal_comunal	-4963004	3744908	-1.33	0.188	-1.24e+07	2456334
_cons	-1.39e+07	2.26e+07	-0.61	0.540	-5.86e+07	3.09e+07

A continuación, se presenta un gráfico con la distribución de las variables más relevantes en una transacción de mercado que son el precio y la cantidad transada, y

el que no se ve claramente una relación directa entre el precio y el caudal transado, pero tal como se explicó anteriormente los caudales transados fueron muy significativos solo en las transacciones que se realizan en l/s, quizás como reflejo de la amplia muestra con la que se cuenta.

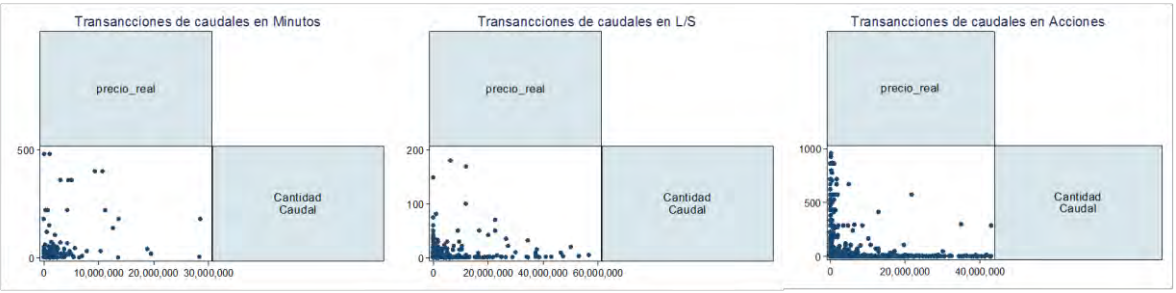


Figura 6.29 Distribución de la muestra de precio y caudal transado. Fuente: elaboración propia.

7. **Línea Base de la Oferta**

En el presente capítulo se presenta la estimación de los recursos hídricos disponibles en las nueve cuencas de la región de Arica y Parinacota, tanto en términos de cantidad como de calidad. Así mismo, inicialmente se hace un análisis regional de cada una de las componentes que inciden en los recursos hídricos para posteriormente entrar en detalle en cada una de las nueve cuencas que componen la región en estudio.

7.1 Análisis Regional

7.1.1 Geomorfología

Del punto de vista geomorfológico, la región queda definida (de oeste a este) por la Cordillera de la Costa, la Depresión Central, la Precordillera, y la Cordillera Occidental, donde se ubica el altiplano. En la Figura 7.1 se muestra las unidades geomorfológicas de la región de Arica y Parinacota. En este mapa se observa que las unidades tienen una orientación N-S a NNW-SSE.

CORDILLERA DE LA COSTA

La Cordillera de la Costa es un cordón de cerros estrecho, de hasta 15 km de ancho y una altitud no superior a 1.200 msnm, de topografía poco accidentada, con colinas redondeadas y valles y/o depresiones anchas. Su altitud disminuye progresivamente hacia el este, hasta la Depresión Central, mientras que en el oeste, su límite con el océano Pacífico es abrupto debido a una serie de acantilados, llamado "Escarpe Costero".

DEPRESIÓN CENTRAL

La Depresión Central tiene un ancho de 40 a 55 km. Es una región de topografía relativamente plana, donde la altitud aumenta de oeste a este, de 500-1.000 a 1.900-2.300 m, y está rellena con depósitos volcano-sedimentarios y volcánicos distales, limitada abruptamente al este por el WTS. El límite occidental de la Depresión Central es irregular y ondulante dado por la degradación de los depósitos de la cordillera de la Costa. Su superficie está localmente disecada por los cañones de Azapa, Vítor,

Camarones y Lluta. Al sur y al norte de esta última quebrada, se localiza un gran depósito de remoción en masa, la Avalancha Lluta, proveniente del borde occidental de la Precordillera.

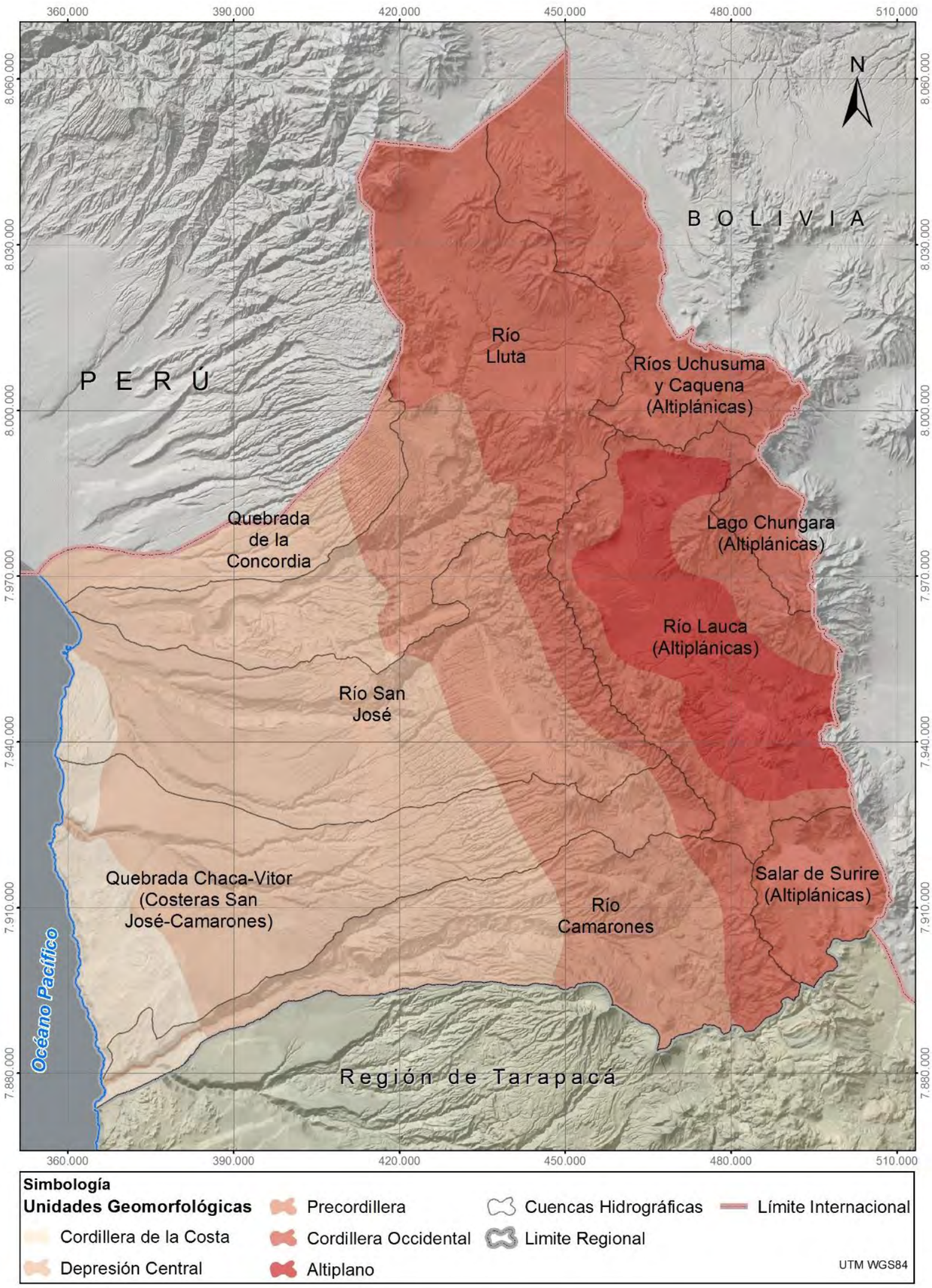


Figura 7.1 Distribución de las unidades geomorfológicas de la región de Arica y Parinacota. Fuente: modificado de Albers (2012).

PRECORDILLERA

La Precordillera corresponde a una meseta alargada, de un ancho variable entre 20 a 35 km, cuya altitud aumenta de oeste a este, de 1.900-2.300 a 3.200-3.800 m. La superficie es regular y relativamente continua; está cortada por las quebradas profundas de Lluta, San José, Vítor y Camarones. Al norte esta superficie se encuentra suavemente plegada. Al sur, la superficie de la Precordillera define un monoclinal suave que mantea al oeste.

CORDILLERA OCCIDENTAL Y ALTIPLANO

La Cordillera Occidental presenta una topografía muy irregular, con altitudes que aumentan abruptamente, de oeste a este, de 3.200-3.500 a 5.000-6.350 m. Las mayores elevaciones corresponden a los edificios volcánicos neógenos, que rodean las depresiones intramontanas del Lauca, Surire y Caquena-Cosapilla, que constituyen el Altiplano. El límite de la Cordillera Occidental con la Precordillera es de forma irregular y de origen tectónico. En este borde occidental se ubican las estrechas depresiones de Huaylas y Copaquilla. El borde oriental de la Cordillera Occidental, en Bolivia, es de forma sinuosa e irregular y está cubierto por los depósitos sedimentarios de la cuenca Altiplánica.

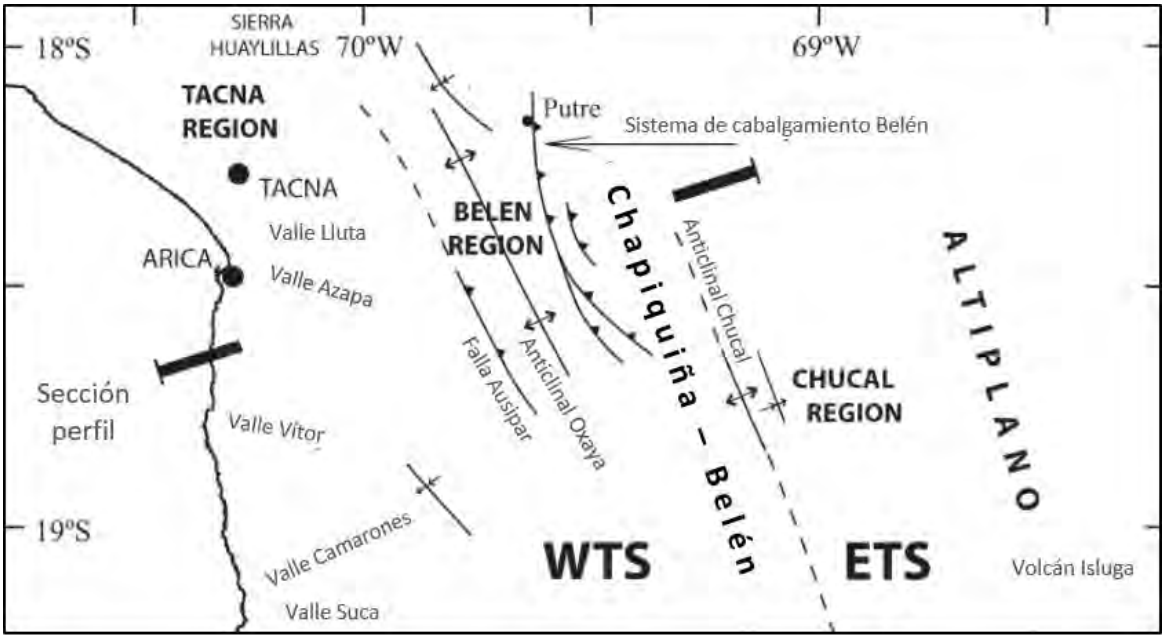


Figura 7.2 Esquema geomorfológico-estructural de la región de Arica y Parinacota. Fuente: modificado de Charrier R. (2012).

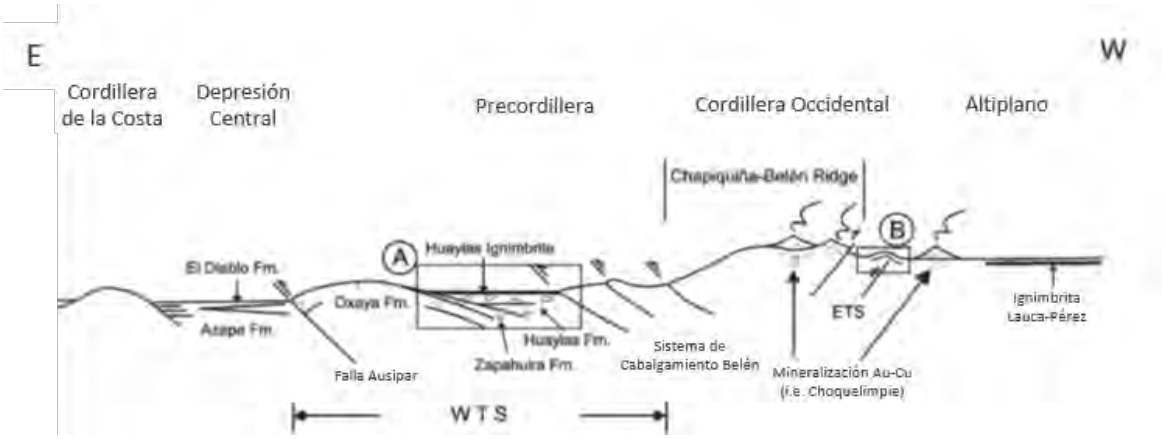


Figura 7.3 Perfil geomorfológico-estructural de la región de Arica y Parinacota. Fuente: modificado de Charrier R. (2012).

7.1.2 Geología

El basamento en la zona está compuesto por el Complejo Metamórfico de Belén, de edad proterozoica, que presenta dos unidades diferenciadas: (a) de esquistos, anfibolitas y gneises y (b) el ortogneis de Saitoco. Sus afloramientos se distribuyen en tres bloques con orientaciones norte-sur en las cercanías de Belén, en la quebrada Achacagua y en la quebrada Tignamar. Los Estratos Quichoco (CPq), de edad

paleozoica, se encuentran suavemente plegados y se componen principalmente por areniscas y conglomerados. Aflora al este y noreste de Belén.

Las rocas jurásicas conforman un arco y un trasarco. El arco jurásico de la Cordillera de la Costa se asocia a los Intrusivos del Jurásico Medio-Superior (Jmsi): (a) el intrusivo monzodiorítico cuarcífero Mal Paso, (b) el intrusivo gabróico fanerítico Lombriz e (c) intrusivos indiferenciados, que son cuerpos plutónicos e hipabisales, principalmente granodioritas, dioritas, gabros, monzodioritas y monzodioritas cuarcíferas. Las rocas asociadas al trasarco, que evidencian una transgresión-regresión marina son, de base a techo, las siguientes: Formación Camaraca (Jmc), que aflora al sur de Arica, y está compuesta por lavas andesíticas con intercalaciones de lavas basálticas y daciandesíticas, tobas y rocas sedimentarias; a la Formación Los Tarros (Jst), compuesta por areniscas y lutitas, suave a moderadamente plegada y aflora únicamente en la quebrada Los Tarros, al sudeste de Arica; la Formación Livilcar (JKil), correspondiente a una sucesión sedimentaria, clástica y carbonatada, de ambiente marino y transicional, moderadamente plegada y fallada, que aflora en las cercanías de la localidad de Livilcar, en el curso superior del valle de Azapa. Sobreyaciendo estratigráficamente a las anteriores formaciones en discordancia angular, se encuentra la Formación Atajaña (JsKia), compuesta por conglomerados de grano fino a muy grueso, areniscas y limolitas. Aflora en el sector del cerro Atajaña, en la Cordillera de la Costa. Sobreyaciendo a las anteriores formaciones en discordancia angular se ubica la Formación Suca (Kis), que corresponde a una sucesión volcánica continental levemente plegada, de lavas andesíticas y andesítica-basálticas, con intercalaciones menores de areniscas y limolitas rojas. Se ubica en las quebradas Suca y Camarones, en la Depresión Central.

Las rocas asociadas al Cretácico son las siguientes: Los intrusivos del Cretácico (Ki) son el de (a) Azapa, correspondiente a dioritas cuarcíferas y monzodioritas cuarcíferas y el de (b) Acha, pórfidos granodioríticos y granodioritas porfídicas. Afloran en las quebradas de Azapa y Acha respectivamente. Los Intrusivos del cretácico Superior – Paleoceno (KPi) se subdividen en los de Lluta (a), principalmente granodioritas y monzodioritas cuarcíferas, y que afloran en las quebradas de Lluta, Cardones y Azapa; y los de Esquiña (b), que corresponden a monzondioritas cuarcíferas y monzodioritas y se localizan al este y oeste de Esquiña. Los intrusivos del Eoceno (Eg) son una franja

de orientación NNW − SSE al sur del volcán Tacora, compuesta por granodioritas, monzodioritas y monzonitas cuarcíferas.

Las rocas asociadas al Oligoceno-Holoceno en la Depresión Central y la Precordillera son las siguientes: la Formación Azapa (Oa), que aflora en el curso medio de la quebrada del mismo nombre y está constituida por sucesiones sedimentarias cuya granulometría disminuye hacia el oeste, generando una facies oriental (a) de grano grueso, compuesta por conglomerados, brechas sedimentarias y areniscas, y una facies occidental (b) de grano fino, de areniscas y limolitas. La Formación Oxaya (OMo) es una sucesión volcánica continental, que se encuentra levemente plegada en la Precordillera y subhorizontal en la Depresión Central y está formada principalmente por mantos de tobas ignimbríticas. La Formación El Diablo (Mimd) es una sucesión sedimentaria fluvial y lacustre que se expone en la confluencia de las quebradas El Diablo y Azapa, y en varios sectores de la Depresión Central, y está constituida por areniscas, calizas, limolitas y gravas. La Formación Huaylas (Msh) es una secuencia sedimentaria fluvial constituida por gravas y areniscas, que se expone en las cuencas de Huaylas de manera subhorizontal y en la cuenca Copaquilla de manera subhorizontal a suavemente plegada y fallada.

Las rocas asociadas al Oligoceno-Holoceno en la Cordillera Occidental son: la Formación Lupica (OMl), secuencia sedimentaria continental con intercalaciones de tobas y lavas, que se caracteriza por variaciones laterales importantes tanto en los espesores como en las facies que presenta, además de mostrar localmente suaves discordancias angulares internas. Aflora, principalmente en el sector oriental de la Cordillera Occidental. La Formación Putani (Mimp) es una sucesión sedimentaria fluvial y lacustre y se encuentra plegada y fallada. Sus miembros son clástico-evaporítico y piroclástico de composición riodacítica. Aflora en el río Putani, al suroeste del poblado de Visviri. La Formación Joracane (Mij) corresponde a una secuencia sedimentaria fluvial compuesta por conglomerados y areniscas semiconsolidadas. Aflora de manera restringida en la quebrada Joracane, en el borde occidental de la Cordillera Occidental. La Formación Chucal (Mimc) es una sucesión sedimentaria fluvial y lacustre, la que se encuentra plegada y fallada, localizada al este y oeste del cerro Chucal. Se subdivide en dos miembros: inferior (Mimc1) de areniscas, limolitas y calizas, y superior (Mimc2) de areniscas y conglomerados y brechas, entre los cuales hay una suave discordancia angular. La Formación Macusa (Mmsm) está formada de tobas, andesitas y areniscas,

con intercalaciones de conglomerados. Aflora en la localidad de Macusa hasta el cerro Chucal. La Formación Lauca (PlPl) está conformada por arenas, areniscas, gravas semiconsolidadas, brechas sedimentarias, limolitas y arcillolitas, y se encuentra dispuesta subhorizontalmente rellenando la cuenca del río Lauca. La Ignimbrita Lauca (Pll) es un depósito de flujo piroclástico, el cual presenta una toba leve a moderadamente soldada, vítrea, de cristales, pómez y líticos. Se ubica discontinuamente en el sector de la Cordillera Occidental, en la Precordillera y en la Depresión Central. La Formación Visviri (PPlv) corresponde a una sucesión sedimentaria continental subhorizontal, compuesta de gravas, arenas, areniscas y limolitas e intercalaciones de tobas. Se localiza en gran parte del sector de Visviri. Los Intrusivos del Mioceno Medio (Mmi) son un grupo de cuerpos plutónicos e hipabisales, de composición intermedia, de diorita a monzonita.

Las rocas volcánicas cenozoicas son: los volcanes y remanentes de volcanes del Mioceno inferior (Miv), cuyas coladas de lavas se caracterizan por ser extensas, macizas, brechosas y/o fluidales. Su composición es andesítico a andesítico-balsáltico. Afloran en la zona oriental de la Cordillera Occidental y en la zona nororiental de la Precordillera. Los volcanes y remanentes de volcanes del Mioceno Medio (Mmv) corresponden predominantemente a coladas de lavas y subordinadamente a lavas-domo. Estas contienen de manera local intercalaciones de tobas y rocas sedimentarias epiclásticas. Los edificios volcánicos se ubican en la zona sur de la Precordillera, y los remanentes volcánicos en la Cordillera Occidental. Los volcanes del Mioceno Superior (Msv), se localizan predominantemente en el sector norte de la Cordillera Occidental. Los edificios volcánicos están constituidos por sucesiones de lavas de composiciones preferentemente andesíticas a dacíticas, basálticas y, en menor medida, riolíticas. Los volcanes y centros eruptivos menores del Plioceno (Plv) se encuentran localizados en la Cordillera Occidental y corresponden a coladas de lavas de composición andesítica a dacítica. Los volcanes y centros eruptivos del Pleistoceno (Pv) y del Holoceno (Hv) están conformados por estratovolcanes compuestos, domos y centros volcánicos menores, ubicados en la Cordillera Occidental, de composiciones andesíticas a riodacíticas.

Los depósitos no consolidados o semiconsolidados se distribuyen en el área de la siguiente manera: en la Cordillera de la Costa se encuentran los depósitos aluviales de la Cordillera de la Costa (OMma, MsPla), constituidos por arenas, gravas, brechas

sedimentarias y limos semiconsolidados, con intercalaciones de tobas y capas de halita (OMma), se presentan rellenando depresiones. Los depósitos salinos de la Depresión Central (Qsdc, PlHs) son mantos subhorizontales de sales, limos salinos y costras salinas y corresponden principalmente a depósitos de sulfatos y cloruros. Se localizan en el sector occidental de la Depresión Central. Los depósitos eólicos (Qe, He) corresponden a arenas finas a gruesas, bien seleccionadas, no consolidadas, que se localizan en gran parte de la zona occidental de la Depresión Central. Los depósitos litorales (Ql) están compuesto por los depósitos de playas actuales y antiguas. Se localizan a lo largo de la zona costera, predominantemente al norte de Arica. Están constituidos por arenas semiconsolidadas, de granulometría fina a gruesa, con presencia de líticos y conchas. En la Depresión Central y la Precordillera se pueden encontrar: los depósitos de la avalancha Lluta (Msrl), los que corresponden a grandes depósitos de remoción en masa localizados en la Depresión Central y borde occidental de la Precordillera, al norte y sur de la quebrada Lluta. El material rocoso proviene de la Formación Oxaya y en menor medida de la Formación El Diablo. Los depósitos de remoción en masa (PlQr, PlHrm), están asociados a deslizamientos y avalanchas gravitacionales, generados predominantemente en los bordes de las laderas y escarpes abruptos, y en quebradas profundas. Se observan principalmente en las quebradas mayores de Lluta, Vítor, Azapa y Camarones. Los depósitos coluviales (Qc, PlHc) son depósitos no consolidados, normalmente monomícticos, de origen gravitacional y se encuentran formados por bloques, bolones, rodados, arenas y limos. Pueden generar conos o abanicos, de carácter aluvial, en quebradas cortas de gran pendiente o mantos alargados en taludes abruptos. Los depósitos aluviales (Pa, Ha) están constituidos por gravas y brechas matriz soportadas, semiconsolidadas, con intercalaciones de arenas, limos y arcillas. Se disponen esencialmente como mantos, en las zonas de la Depresión Central y en las laderas de los volcanes, o en las depresiones y/o quebradas anchas de la Precordillera y Cordillera Occidental. Los depósitos fluviales (Plf, Pf, Hf) están constituidos por ripios y gravas clastosoportados, semiconsolidados, con intercalaciones de arenas y limos. Los depósitos del Plioceno y Pleistoceno (Plf, Pf) se observan a lo largo de los cauces mayores generando terrazas "colgadas", mientras que los depósitos del Holoceno (Hf) se ubican a lo largo de los cauces activos de las quebradas mayores. Los depósitos que se encuentran en la Cordillera Occidental corresponden a los depósitos lacustres del Plioceno (Pl) que son limos y areniscas, y se observan en el norte del sector de Visviri, en el río Putani y en la quebrada Guallancallani. Los depósitos glaciales (Qg, PlHg) se componen por morrenas laterales

y/o frontales, y mantos estratificados extensos y delgados; se encuentran esencialmente en los flancos del Cordón Belén y de los edificios volcánicos del Mioceno al Holoceno, y como material de relleno de la cuenca del río Lauca. Los depósitos salinos del salar de Surire (Qss) son mantos subhorizontales de sales, limos salinos y costras salinas, levemente detríticos; corresponden principalmente a boratos y subordinadamente sulfatos, carbonatos y cloruros. Se ubican en el salar de Surire. Los depósitos palustres (Hp) corresponden a depósitos de limos y turbas, consolidados a semiconsolidados, que se ubican esencialmente en quebradas y depresiones de la Cordillera Occidental. Se caracterizan por presentar material orgánico, cenizas volcánicas y detritos. Los depósitos antrópicos (Han) corresponden a limos, arcillas y arenas, acumulados en un embalse de regadío, al suroeste de Humapalca, al oeste de Pampa Chañonasa.

EVOLUCIÓN TECTÓNICA

La evolución de las principales unidades geomorfológicas que sobresalen en la región está inducida por la formación de orógenos característicos de márgenes activos. Durante los tres primeros ciclos tectónicos (Pampeano, Famatiniano y de Gondwana) se desarrolla una intensa actividad volcánica relacionada con procesos de subducción a lo largo del margen oeste del continente en formación. Dicha actividad fue continua hasta su interrupción (o reducción) durante el periodo Preandino, lo que favoreció la consolidación final del megacontinente en formación.

Cuando el proceso de subducción del margen oeste de Sudamérica se inició (Jurásico), la geología característica de entonces consistía en un margen continental principalmente formado por complejos de rocas metamórficas y de origen magmático que se desarrollaron durante el Proterozoico y Paleozoico, referidas como basamento de las secuencias mesozoicas y cenozoicas. Este basamento corresponde a PPb y CPq.

Posteriormente, se da inicio al periodo Andino (Jurásico inferior), donde se alcanza la actual configuración de los Andes, y cuyas tres etapas de este último ciclo tectónico se describen a continuación:

La primera etapa (Jurásico Medio-Cretácico Inferior) se evidencia en la Cordillera de la Costa y se subdivide en dos periodos: el primero se caracteriza por una intensa

actividad en el arco (Jmsi) y el desarrollo de un ciclo de transgresión - regresión marina en el retroarco; el segundo se caracteriza por un periodo de deformación transcurrente de rumbo NS. Una discordancia angular asignada al Jurásico Superior sugiere un alzamiento relativo de lo que hoy es la Cordillera de la Costa, evidenciado en un cambio de ambiente de depositación, de marino-litoral a continental (Jmc y Jsy a JsKia) Además, se encuentran fallas subverticales de rumbos principalmente NE-SW, N-S y E-W, activas entre el Jurásico Superior y el Eoceno, que evidencian un periodo de deformación transcurrente de rumbo N-S. El arco jurásico de la Cordillera de la Costa se asocia a los Intrusivos del Jurásico Medio-Superior (Jmsi). Las rocas asociadas al trasarco, que sufren una transgresión-regresión marina son, de base a techo Jmc, Jst, JKil, JsKia y Kis.

La segunda etapa (Cretácico Superior- Eoceno) se evidencia principalmente en la Precordillera y se caracteriza por periodos extensionales asociados con actividad magmática intensa y la migración hacia el este del arco magmático, representada por plutones y abundantes depósitos andesíticos y riolítico-dacíticos (KPi, Ki, Eg).

Al final de la segunda etapa (Eoceno medio) se produce la fase incaica, durante la cual se invierte la tectónica dominante, de extensiva a compresiva, y se forma el ridge Chapiquiña-Belén, de orientación NNE − SSW. Este ridge está asociado a dos sistemas de fallas divergentes entre sí: el primero es un sistema de cabalgamiento de orientación N-S a NNW-SSE, de alto ángulo, vergencia oeste y desarrollado en la Precordillera (WTS); el segundo es un sistema de cabalgamientos con vergencia este, desarrollado en el borde oeste del altiplano (ETS).

Durante la tercera etapa (Oligoceno-Holoceno) se producen los mayores cambios en el relieve, tales como el alzamiento andino, el desarrollo de las unidades morfoestructurales actuales, y el arco volcánico toma la posición que se conoce hoy y se emplazan los pórfidos cupríferos post-incaicos. El aumento en la tasa y cambio en el ángulo de convergencia entre las placas causan deformación compresional, movimientos transcurrentes y deformación extensional simultánea, controlados por la contracción prolongada desde la fase incaica hasta el presente. Los sistemas de falla WTS y ETS se relacionan estrechamente con el desarrollo paleogeográfico, la sedimentación y el alzamiento del relieve en la región. La deformación de este periodo se evidencia principalmente en el sector centro oriental de la región.

En la Cordillera Occidental las estructuras se presentan como cabalgamientos, pliegues y fallas inversas y de rumbo, principalmente del oligoceno. Las rocas asociadas a este periodo en la Cordillera Occidental son OMl, Mimp, Mij, Mimc, Mmsm, PlPl, Pll, PPlv y Mmi.

En la Precordillera, Depresión Central y Cordillera de la Costa, esta deformación se observa como pliegues suaves y fallas menores, además de fallas mayores inversas y de rumbo en la parte oriental de la Depresión central. Las rocas asociadas a este periodo en la Depresión Central y la Precordillera son Oa, OMo, Mimd y Msh.

En la zona oriental de la Precordillera y en la Cordillera Occidental se da una fuerte actividad volcánica, que queda evidenciada por distintos complejos eruptivos de distintos periodos cenozoicos, como Miv, Mmv, Msv, Plv, Pv y Hv.

Los sedimentos depositados desde el Cenozoico y hasta hoy, no han sido totalmente consolidados, conformando los depósitos no consolidados o semiconsolidados que se observan actualmente. En la Cordillera de la Costa se encuentran OMma, MsPla, Qsdc, PlHs, Qe, He, Ql. En la Depresión Central y la Precordillera se pueden encontrar Msrl, PlQr, PlHrm, Qc, PlHc, Pa, Ha, Plf, Pf y Hf. Los depósitos que se encuentran en la Cordillera Occidental corresponden a Pl, Qg, PlHg, Qss Hp y Han.

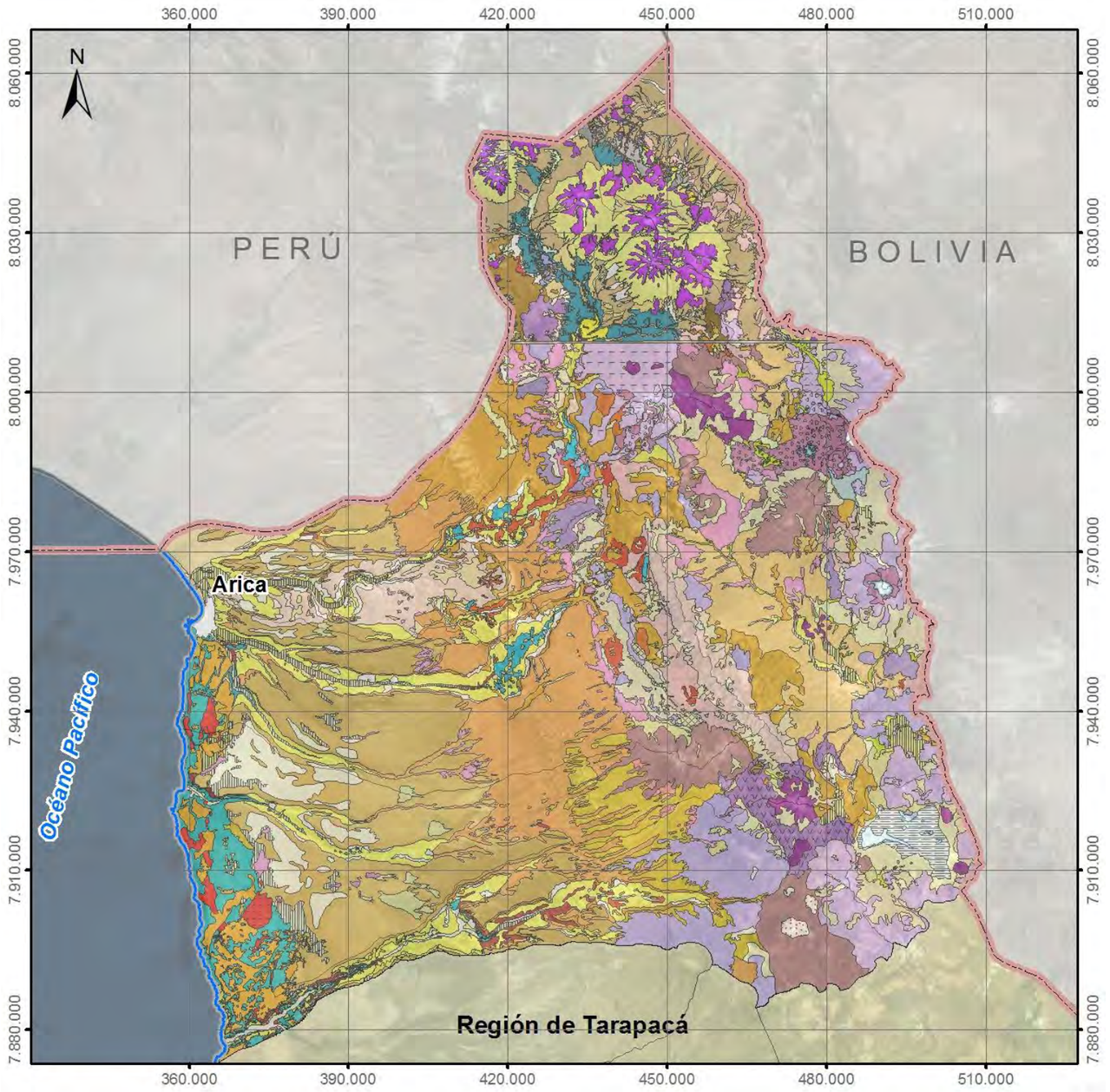


Figura 7.4 Mapa geológico de la región de Arica y Parinacota. Continúa con leyenda en página siguiente. Fuente: García et al (2004), García et al (2012), García y Fuentes (2012), García et al (2013).

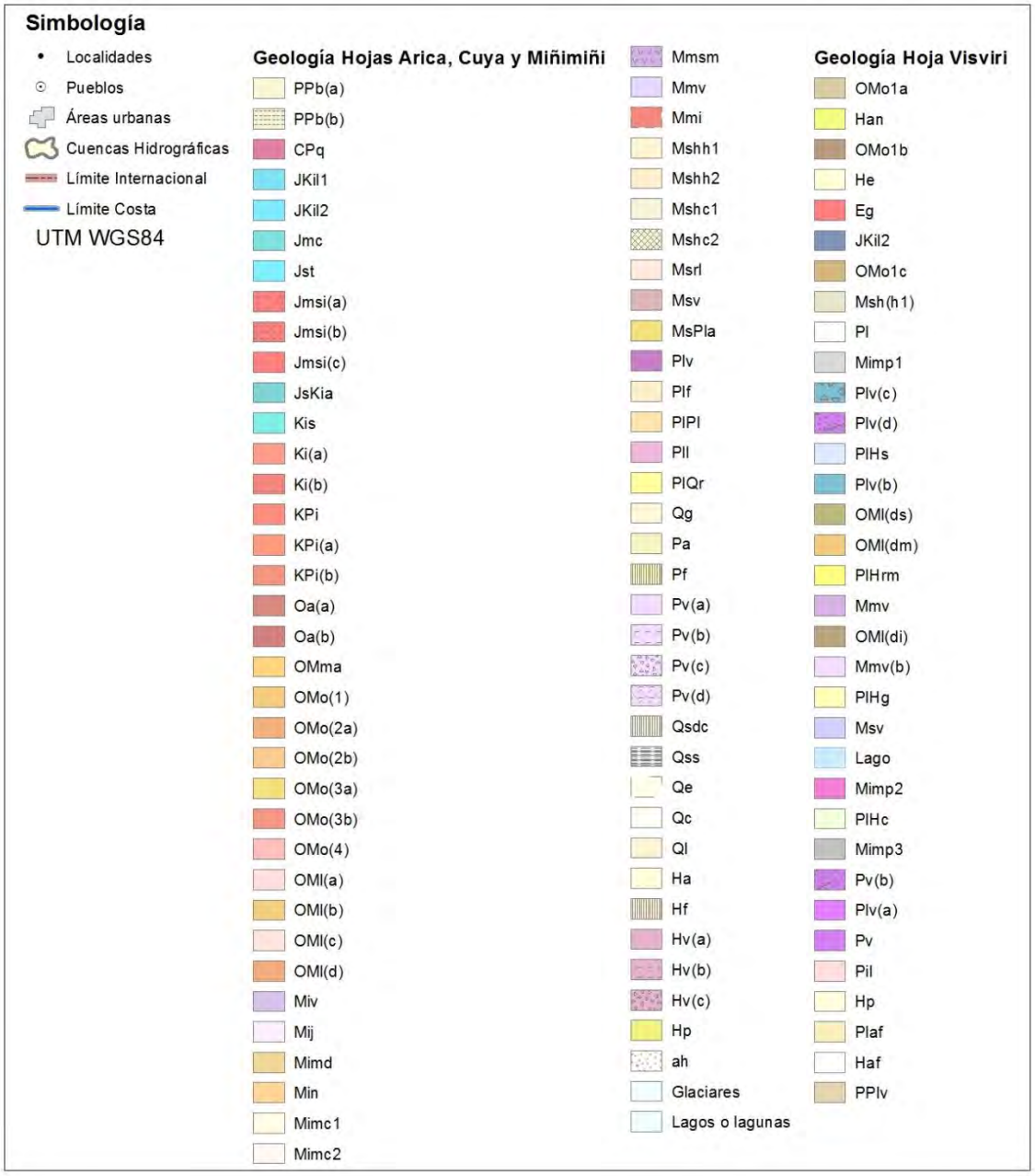


Figura 7.5 Leyenda de mapa geológico. Viene de página anterior. Fuente: García *et al.* (2004), García *et al.* (2012), García y Fuentes (2012), García *et al.* (2013).

7.1.3 Definición y caracterización de las cuencas de la región

Para cumplir los objetivos de esta materia se realizó un análisis que actualiza la delimitación de las cuencas de la XV Región, en el que se calcularon los parámetros de las cuencas relativos a su forma, relieve y red de drenaje.

DELIMITACIÓN DE LAS CUENCAS DE LA REGIÓN

La delimitación de las divisorias de agua de la región de Arica y Parinacota se realizó utilizando distintas fuentes de información, siendo la principal los Modelos de Elevación Digital (MDE) generados con imágenes satelitales de resolución 30 x 30 metros, de propiedad del satélite ASTER de la NASA y la actual delimitación de cuencas de la DGA. Otras fuentes de información utilizadas fueron las coberturas digitales (SIG) provistas por la DGA, la definición de cuencas hecha en el Convenio de Cooperación DGA - UCN - IRD (S.I.T. Nº 51, 1999), el Mapa Hidrográfico de Chile del Departamento de Recursos Hidráulicos de CORFO (1971).

La mayoría de estos antecedentes fueron montados en plataformas SIG, superponiendo y comparando las capas para obtener un mejor resultado. Los programas utilizados para estos efectos fueron ArcGis™ y Global Mapper™.

En la Figura 7.6 se muestra la delineación de las cuencas en estudio. El resultado de este proceso muestra que algunas de las cuencas hidrográficas trazadas coinciden con las definidas por las otras fuentes de información, o bien presentan pequeñas diferencias. La delimitación final representa en la mayoría de los casos una cuenca endorreica con su mayor superficie en territorio chileno, a excepción de las cuencas de la quebrada La Concordia, de los ríos Uchusuma y Caquena y del río Lauca que se desarrollan en mayor porcentaje en el territorio peruano la primera y en territorio boliviano las dos últimas.

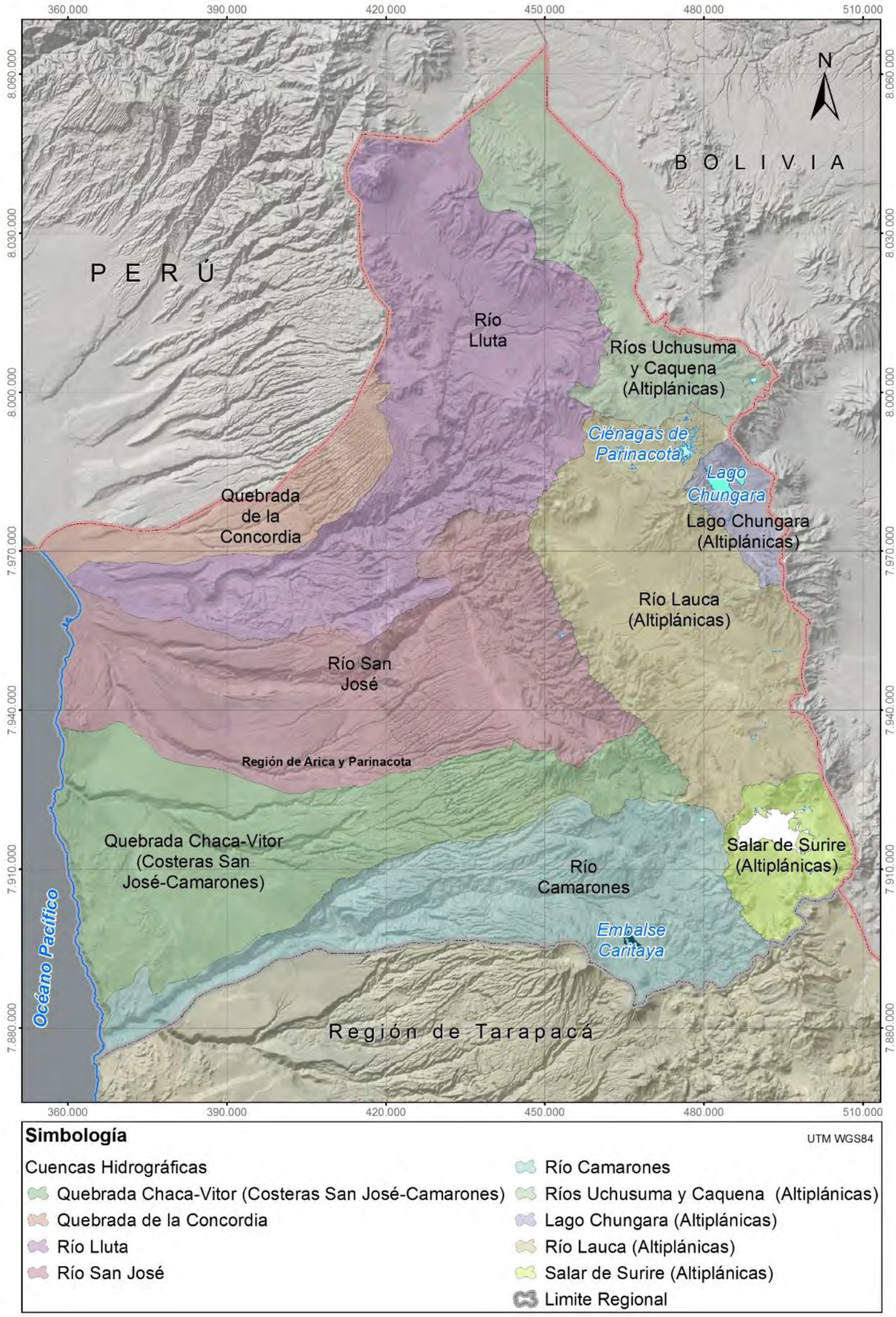


Figura 7.6 Delimitación de las cuencas hidrográficas de la XV Región de Arica y Parinacota. Fuente: elaboración propia.

CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS DE LAS CUENCAS DE LA REGIÓN

Las características morfológicas de las cuencas están dadas por los parámetros relativos a la forma, al relieve y a la densidad del drenaje. La forma se ha evaluado mediante el coeficiente de compacidad en función del perímetro y área de la cuenca, el relieve se refiere a la diferencia de cotas entre el punto más alto de la divisoria de la cuenca y el punto de salida, y la densidad del drenaje se determinó a partir de la longitud de los cauces y el área de la cuenca. Los detalles de la metodología se incluyen en Anexo VI.

En las Tabla 7.1 y Tabla 7.2 se resume las características de las cuencas de la XV Región. En esta se presenta el nombre de la cuenca, área y perímetro, elevación mínima y máxima, longitud de cauce principal, así como la clasificación de la forma y densidad del drenaje.

Tabla 7.1 Características morfológicas de las cuencas de la XV Región. Fuente: elaboración propia.

Cuenca	Área (km^2)	Perímetro (km)	Longitud cauce principal (km)	Elevación mínima (msnm)	Elevación máxima (msnm)
Quebrada de La Concordia	720,4	184	25,0	5	4.304
Río Lluta	3.479	408	149,8	4	5.961
Río San José	3.104	339	88,2	0	5.261
Quebrada Chaca Vítor	2.769	355	116,4	0	5.069
Río Camarones	2.223	350	105,2	0	5.579
Ríos Uchusuma y Caquena	1.320	251	39,3	4.033	6.336
Lago Chungara	276 Lago=22,8	82	-	4.559	6.311
Río Lauca	2.427	268	94,9	3.884	6.312
Salar Surire	552 Salar=61,7	103	-	4.305	5.728

Tabla 7.2 Continuación de las características morfológicas de las cuencas de la XV Región. Fuente: elaboración propia.

Cuenca	Coef Compacidad Kg	Forma	Longitud Cauces (km)	Densidad del Drenaje (km/km^2)	Clasificación del Drenaje
Quebrada de La Concordia	1,92	Rectangular	174,2	0,24	Pobre
Río Lluta	1,94	Rectangular	939,9	0,27	Pobre
Río San José	1,70	Oblonga	576,3	0,19	Pobre
Quebrada Chaca Vítor	1,89	Rectangular	391,6	0,14	Pobre
Río Camarones	2,08	Rectangular	557,0	0,25	Pobre
Ríos Uchusuma Y Caquena	1,93	Rectangular	302,8	0,23	Pobre
Lago Chungara	1,38	Ovalada	26,7	0,10	Pobre
Río Lauca	1,52	Oblonga	730,8	0,30	Pobre
Salar Surire	1,23	Redonda	66,6	0,12	Pobre

De acuerdo a la forma de la cuenca se puede indicar la tendencia a crecidas que ésta presenta. Si la cuenca es redonda, sin tener en cuenta otros factores, responde más rápido a la transformación de lluvia en escorrentía que la cuenca rectangular u oblonga. Por tanto, las cuencas del Salar de Surire y lago Chungara presentan una tendencia de crecidas alta y media, respectivamente.

Cuando la densidad del drenaje es baja se asocia a sitios donde los materiales del suelo son resistentes a la erosión, muy permeables y con pendiente baja. Es necesario destacar que este parámetro representa la densidad de drenaje promedio en cada cuenca, esto no excluye que existan cauces o quebradas al interior de la cuenca que dispongan de un drenaje muy desarrollado y por tanto, una rápida respuesta lluvia-escorrentía.

7.1.4 Hidrometeorología

7.1.4.1 Clima

La Región de Arica y Parinacota presenta condiciones climáticas de extrema aridez que se manifiestan especialmente en la depresión intermedia y en las cuencas cordilleranas (Matraz, 2015). Desde la costa hasta la cordillera se presentan variaciones climáticas dispuestas en franjas longitudinales (Figura 7.7) que a continuación se describen por categorías.

CLIMA ÁRIDO CON NUBLADOS ABUNDANTES

Se presenta en todo el sector costero caracterizándose por la nubosidad que se intensifica en invierno y la alta humedad que aporta el mar, que a su vez en contacto con los farellones costeros permite un aprovechamiento de las camanchacas o neblinas mediante atrapa nieblas que captan el agua. De esta manera, la alta humedad por la proximidad del mar y el efecto moderador de la corriente de Humboldt, producen bajas amplitudes térmicas tanto diarias como anuales, manteniéndose durante el año temperaturas entre 20 y 25ºC.

CLIMA ÁRIDO O DESÉRTICO NORMAL

Se presenta a partir de los 1.000 msnm, caracterizado por la muy baja humedad relativa, cielos permanentemente despejados, grandes cambios de temperatura entre el día y la noche y la ausencia de precipitaciones. A pesar de su cercanía con la fuente de vapor de agua que representa el océano Pacífico, existen dos factores que condicionan la aridez, por una parte está la influencia del anticiclón del Pacífico sur que bloquea el paso de sistemas frontales, y por otro, el efecto barrera de la cordillera de los Andes que impide la entrada de las masas de aire húmedas que provienen del sector tropical continental. Así mismo, la alta radiación solar y la emisión nocturna de radiación infrarroja desde la superficie, explican el fuerte contraste térmico entre el día y la noche, con temperaturas que varían desde los 25ºC en el día a los -15ºC durante la noche.

CLIMA ÁRIDO MUY FRÍO

Se presenta entre los 2.000 y 3.000 msnm. El régimen de precipitaciones es mezclado, observándose precipitaciones estivales y de origen ciclónico, aunque escasas en ambos casos. Las de origen ciclónico se presentan con intervalos de varios años, cuando suceden inviernos pluviométricamente rigurosos en la zona central del país. En estos casos, suelen ser mayores a las del verano. Debido a la altura, las temperaturas son relativamente frías, con un promedio no superior a los 10°C, en el que las oscilaciones térmicas anuales se atenúan, pero las diarias aumentan.

CLIMA FRÍO DE TUNDRA POR ALTURA

Se presenta a partir de los 3.000 msnm. La elevada altitud hace que las temperaturas sean muy frías, las temperaturas medias no sobrepasan los 5ºC y que se produzca una gran amplitud térmica entre el día y la noche. La principal característica es el aumento de las precipitaciones, las más importantes ocurren en las tardes de verano y son los llamados inviernos altiplánicos de origen convectivo, provenientes de nubosidad producida por el ascenso de masas de aire cargadas de humedad por la ladera oriental de los Andes, que tiene origen en la cuenca amazónica y en el Atlántico. En algunos sectores se registran hasta los 400 mm de precipitación en el año, alguna de ella en forma de nieve. A partir de los 5.700 msnm, las temperaturas hacen que las nieves sean perpetuas, caracterizando las cumbres más elevadas de la región, con una humedad relativa en general baja.

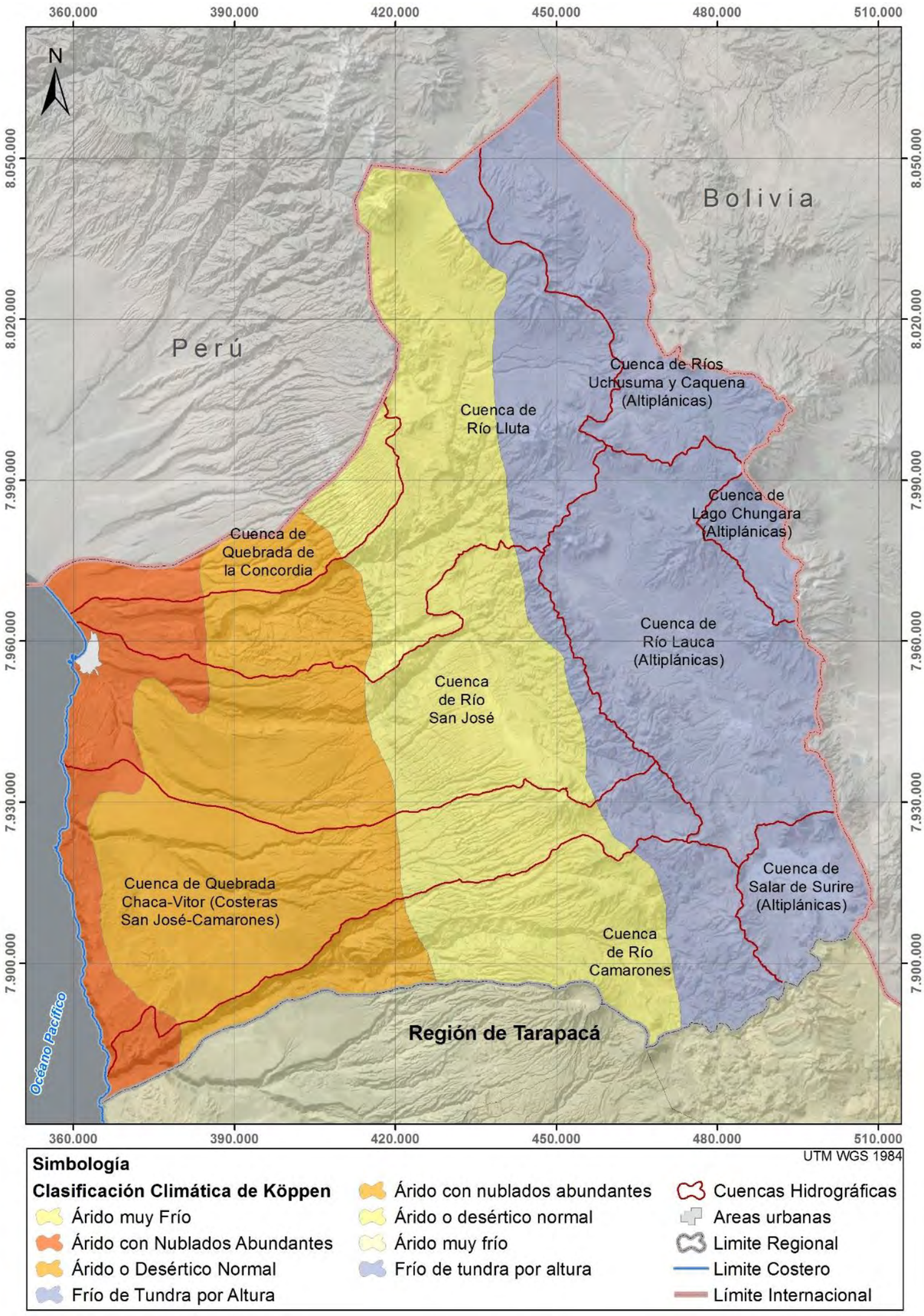


Figura 7.7 Clasificación climática de Köppen en la región de Arica y Parinacota. Fuente: Rioseco, R. y Tesser, C. Cartografía Interactiva de los climas de Chile [en línea]. Instituto de Geografía, Pontificia Universidad Católica de Chile.

7.1.4.2 Estaciones de monitoreo: meteorológicas, fluviométricas, calidad de agua

Respecto a la información hidrológica y meteorológica en la región, se dispone de registros históricos de 37 estaciones fluviométricas, 42 estaciones meteorológicas y 25 estaciones de calidad de aguas controladas por la Dirección General de Aguas (DGA). Adicionalmente, la Dirección Meteorológica de Chile (DMC) cuenca con 14 estaciones meteorológicas (2 activas) y una estación de transmisión en línea (Visviri Tenencia).

De las estaciones meteorológicas reportadas por la DGA, en la actualidad 23 están vigentes y 19 están suspendidas. Dentro de este grupo de estaciones, 10 cuentan con registros de temperatura, humedad relativa, radiación solar y evaporación, las demás sólo registran precipitación.

Por otro lado, de las estaciones fluviométricas, actualmente 21 están vigentes y 16 están suspendidas. En relación a los datos de calidad del agua, en la actualidad están vigentes 19 estaciones o puntos de medición. En la Tabla 7.3, Tabla 7.4, Tabla 7.5 y Tabla 7.6 se presentan los periodos de información disponibles y el estado de las estaciones de la red hidrometeorológica de la DGA. En la Figura 7.8 se muestra la localización de todas las estaciones.

Tabla 7.3 Estaciones meteorológicas con mediciones de variables climáticas. Fuente: elaboración propia.

No	Estación	Código BNA	DATUM WGS84 H19S		Periodo con Información de las variables climáticas			
			UTM Este	UTM Norte	Temperatura	Humedad relativa	Radiación solar	Evaporación
1	Putre	01202010-4	440.754	7.987.689	1980-2009	1988-1998	-	1982-2009
2	Putre-DCP	01202012-0	440.899	7.988.150	2002-2013	-	-	-
3	Azapa	01310019-5	375.384	7.952.366	1980-2014	1987-2013	1980-1989	1980-2014
4	Aeródromo el Buitre	01310022-5	364.443	7.952.691	1985-2012	1987-1999	1985-1996	1986-2012
5	Codpa	01410012-1	421.626	7.917.572	1980-2014	1987-2013	-	1980-2014
6	Caquena	01001005-5	478.658	8.003.810	1981-2012	1988-1989	1981-1985	1981-1990
7	Chungara Ajata	01010010-0	480.618	7.983.774	1986-2013	1986-2005	-	1984-2011
8	Parinacota Ex Endesa	01020017-2	471.626	7.987.205	1986-2014	1995-1996	1984-1996	1985-1997
9	Cotacotani	01020014-8	475.383	7.989.485	-	-	-	1960-1989
10	Chilcaya	01030003-7	491.101	7.921.976	1980-2013	-	-	1984-1999

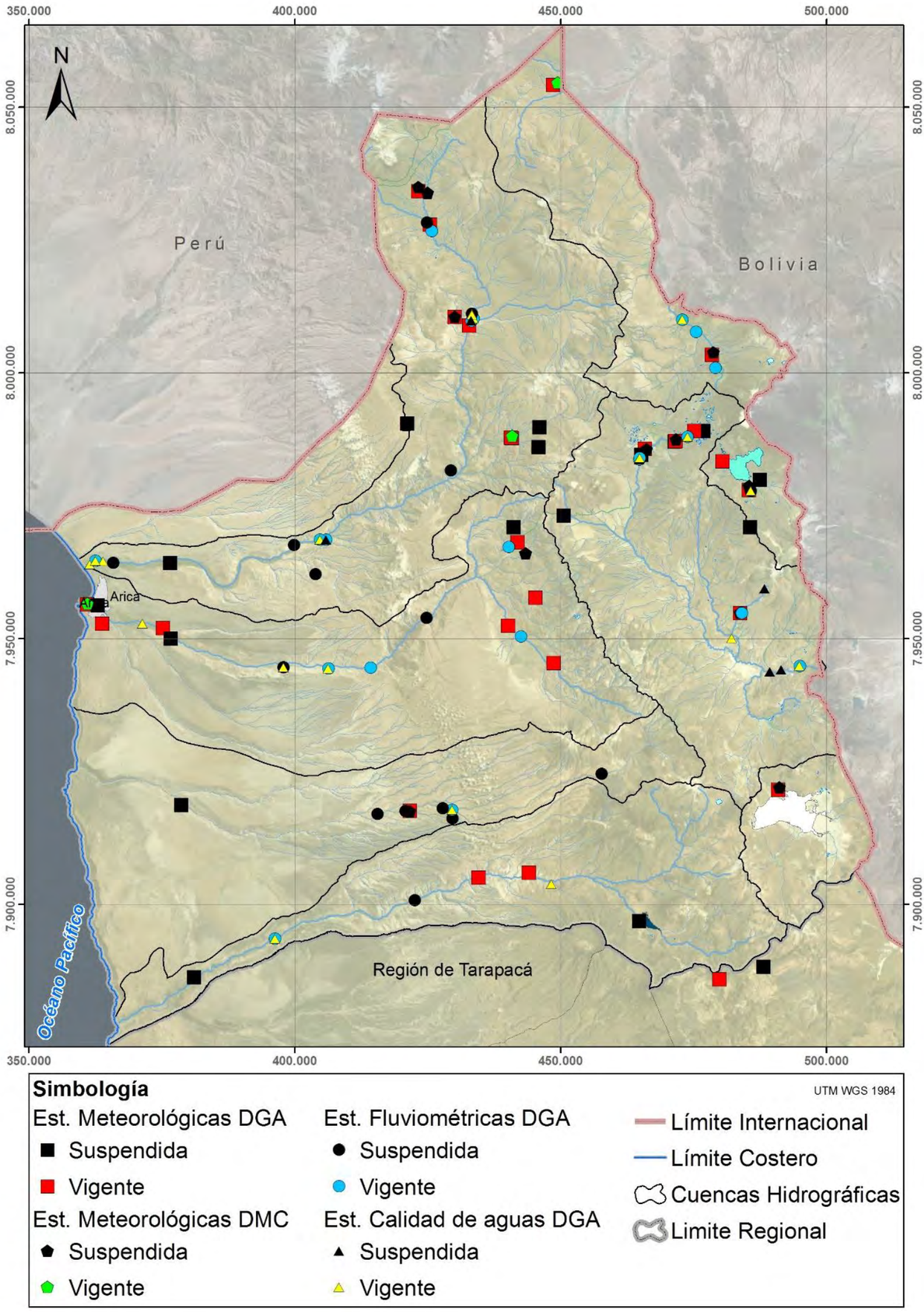


Figura 7.8 Ubicación de las estaciones meteorológicas, fluviométricas y de calidad de agua monitoreadas por la Dirección General de Aguas (DGA) y estaciones meteorológicas de propiedad de la Dirección Meteorológica de Chile (DMC). Fuente: elaboración propia.

Tabla 7.4 Listado de estaciones meteorológicas controladas por la DGA. Fuente: elaboración propia basado en información del SNIA, DGA.

No	Nombre Estación	Código BNA	DATUM WGS84 H19S		Altitud	Periodo	Años	Estado
			UTM Este	UTM Norte				
1	Pumire	01610003-K	488.134	7.888.240	4.150	1962-1991	30	Suspendida
2	Missituni	01010008-9	485.825	7.971.332	4.720	1967-1974	8	Suspendida
3	Chungara Guardería	01010009-7	487.668	7.980.276	4.600	1984-1987	3	Suspendida
4	Isla Blanca	01020013-K	477.352	7.989.241	4.540	1970-1989	20	Suspendida
5	Parinacota Conaf DGA	01020015-6	471.626	7.987.513	4.420	1973-1989	17	Suspendida
6	Chucuyo (Ex. Endesa)	01020018-0	466.019	7.985.660	4.400	1984-1990	7	Suspendida
7	Puquios	01110001-5	421.326	7.990.294	3.750	1975-1981	7	Suspendida
8	Pacollo	01202009-0	446.152	7.990.163	4.185	1978-1999	22	Suspendida
9	Las Cuevas Conaf	01202011-2	446.045	7.986.444	4.060	1986-1988	3	Suspendida
10	Lluta	01211006-5	376.511	7.964.024	290	1966-1993	7	Suspendida
11	Murmuntane	01300004-2	441.686	7.970.788	3.550	1970-1987	18	Suspendida
12	Portezuelo Chapiquiña	01300005-0	450.748	7.973.548	4.375	1976-1979	4	Suspendida
13	La Rivera	01310020-9	377.124	7.950.963	310	1970-1973	4	Suspendida
14	U. del Norte	01310021-7	363.424	7.955.850	55	1980-1984	5	Suspendida
15	Chaca	01410011-3	378.824	7.919.035	350	1969-1983	15	Suspendida
16	Caritaya Embalse	01501001-0	464.629	7.896.403	3.600	1932-1965	34	Suspendida
17	Cuya	01502006-7	381.463	7.886.435	200	1965-1979	15	Suspendida
18	Visviri	01000005-K	448.747	8.054.556	4.080	1970-2014	45	Vigente
19	Caquena	01001005-5	478.658	8.003.810	4.400	1969-2014	46	Vigente
20	Chungara Retén	01010007-0	485.379	7.978.738	4.570	1968-2014	47	Vigente
21	Chungara Ajata	01010010-0	480.618	7.983.774	4.585	1983-2014	32	Vigente
22	Cotacotani	01020014-8	475.383	7.989.485	4.550	1961-2014	54	Vigente
23	Chucuyo Retén	01020016-4	468.750	7.985.849	4.400	1960-2014	55	Vigente
24	Parinacota Ex Endesa	01020017-2	471.626	7.987.205	4.420	1983-2014	32	Vigente
25	Guallatire	01021007-0	483.667	7.954.672	4.240	1969-2014	46	Vigente
26	Chilcaya	01030003-7	491.101	7.921.976	4.270	1971-2014	44	Vigente
27	Villa Industrial (Tacora)	01200002-2	423.209	8.034.897	4.080	1975-2014	40	Vigente
28	Humapalca	01200003-0	425.414	8.027.929	3.980	1971-2014	44	Vigente
29	Río Lluta en Alcérreca	01201003-6	433.013	8.009.301	3.592	2001-2014	13	Vigente
30	Alcérreca	01201010-9	430.185	8.010.459	3.990	1970-2014	45	Vigente
31	Putre	01202010-4	440.754	7.987.689	3.545	1967-2009	43	Suspendida
32	Putre-DCP	01202012-0	440.899	7.988.150	3.560	2002-2014	12	Vigente
33	Central Chapiquiña	01300006-9	442.104	7.968.545	3.350	1962-2014	53	Vigente
34	Belén	01300007-7	445.449	7.958.074	3.240	1937-2014	78	Vigente
35	Tignamar	01300008-5	447.889	7.945.449	3.230	1967-2014	48	Vigente
36	Río Tignamar en Angostura	01300009-3	440.304	7.952.926	3.010	2006-2014	9	Vigente
37	Arica Oficina	01310018-7	362.304	7.956.488	20	1974-2014	41	Vigente
38	Azapa	01310019-5	375.384	7.952.366	365	1966-2014	49	Vigente
39	Aeródromo el Buitre	01310022-5	364.443	7.952.691	110	1985-2014	30	Vigente
40	Codpa	01410012-1	421.626	7.917.572	1.870	1961-2014	54	Vigente
41	Esquiña	01502007-5	443.905	7.905.542	2.170	1975-2014	40	Vigente
42	Río Camarones en Chilpe	01502008-3	434.751	7.905.359	1.565	2006-2014	9	Vigente

Sombreado: estaciones pluviométricas pertenecientes a la DGA que se utilizaron para el análisis de las precipitaciones de la región.

Tabla 7.5 Listado de estaciones meteorológicas controladas por la DMC. Fuente: elaboración propia.

No	Nombre Estación	DATUM WGS84 H19S		Altitud	Periodo	Años	Estado
		UTM Este	UTM Norte				
1	Chacalluta Arica ap.	360.905	7.956.813	63	1950-2014	64	Vigente
2	Putre Tenencia	440.709	7.988.291	3.563	1962-1987	25	Vigente
3	Visviri Tenencia	449.281	8.054.795	4.083	1962-2003	41	Vigente
4	Tacora Retén	423.123	8.035.139	4.091	1998-2009	11	Suspendida
5	Villa Industrial Retén	424.749	8.033.661	4.070	1961-1996	35	Suspendida
6	Alcérreca Retén	429.921	8.010.607	3.930	1963-2003	40	Suspendida
7	Caquena Retén	478.395	8.004.104	4.399	1963-2001	38	Suspendida
8	Puquios Retén	420.758	7.990.360	3.744	1961-1980	19	Suspendida
9	Parinacota	471.449	7.987.552	4.429	1960-1984	24	Suspendida
10	Chucuyo Retén	465.981	7.985.779	4.402	1960-2010	50	Suspendida
11	Chungara Retén	485.341	7.978.981	4.572	1962-1978	16	Suspendida
12	Chapiquina Retén	443.074	7.965.975	3.390	1963-2012	49	Suspendida
13	Guallatire Retén	483.272	7.955.187	4.251	1974-2011	37	Suspendida
14	Chilcaya Retén	491.400	7.922.231	4.279	1976-2009	33	Suspendida
15	Codpa Retén	421.350	7.917.502	1.866	1961-2008	47	Suspendida

Tabla 7.6 Listado de estaciones fluviométricas controladas por la DGA. Fuente: elaboración propia basado en información del SNIA, DGA.

No	Estación Fluviométrica	Código BNA	DATUM WGS84 H19S		Altitud	Periodo	Años	Estado
			UTM Este	UTM Norte				
1	Río Caquena en Vertedero	01001002-0	473.004	8.010.441	4.400	1970-2014	44	Vigente
2	Río Colpacagua en Desembocadura	01001003-9	475.565	8.008.078	4.400	1985-2014	30	Vigente
3	Canal el Embudo en Bt Caquena	01001006-3	468.235	8.013.477	4.400	2003-2014	11	Vigente
4	Río Desaguadero Cotacotani	01020002-4	474.004	7.988.376	4.500	1961-2014	54	Vigente
5	Río Lauca en Estancia el Lago	01020003-2	464.906	7.984.059	4.370	1967-2014	48	Vigente
6	Canal Lauca en Sifón N° 1 (km. 3.3)	01020004-0	464.993	7.984.398	4.384	1959-2014	56	Vigente
7	Río Lauca en Japu (O en el Limite)	01021001-1	495.076	7.945.274	3.907	1969-2014	46	Vigente
8	Río Guallatire en Guallatire	01021002-K	484.224	7.955.257	4.280	1968-2014	47	Vigente
9	Río Colpitas en Alcérreca	01201001-K	433.773	8.010.594	3.251	1956-2014	59	Vigente
10	Río Lluta en Alcérreca	01201003-6	433.013	8.009.301	3.550	1956-2014	50	Vigente
11	Río Caracarani en Humapalca	01201005-2	425.888	8.027.070	3.908	1956-2014	59	Vigente

No	Estación Fluviométrica	Código BNA	DATUM WGS84 H19S		Altitud	Periodo	Años	Estado
			UTM Este	UTM Norte				
12	Río Lluta en Tocontasi	01210001-9	404.890	7.969.012	1.850	1960-2013	7	Vigente
13	Río Lluta en Panamericana	01211001-4	362.683	7.965.067	10	1960-2014	55	Vigente
14	Río Laco en Cosapilla	01300002-6	544.009	7.965.416	3.000	1991-2014	24	Vigente
15	Río Tignamar en Angostura	01300009-3	440.304	7.952.926	3.010	2006-2014	9	Vigente
16	Río San José en Ausipar	01310002-0	414.389	7.944.959	1.300	1969-2014	46	Vigente
17	Acueducto Azapa en Bocatoma	01310004-7	406.447	7.944.798	960	1970-2014	45	Vigente
18	Río Codpa en Cala-Cala	01410004-0	429.731	7.918.189	1.745	1994-2014	20	Vigente
19	Río Camarones en Conanoxa	01502002-4	396.440	7.893.965	710	1968-2014	46	Vigente
20	Río Camarones en Chilpe	01502008-3	434.751	7.905.359	1.565	2005-2014	9	Vigente
21	Río Caquena en Nacimiento	01001001-2	479.248	8.001291	4.385	1997-2004	18	Suspendida
22	Río Chungara en Desembocadura	01010002-K	485.908	7.978.462	4.518	1973-1997	25	Suspendida
23	Río Azufre en Humapalca	01200001-4	422.351	8.013.349	3.970	1975-1983	8	Suspendida
24	Río Caracarani en Alcérreca	01201002-8	433.476	8.011.546	3.253	1956-1984	29	Suspendida
25	Río Lluta en Jamiraya	01202001-5	429.524	7.982.027	2.589	1937-1944	8	Suspendida
26	Río Lluta en el Molino	01210002-7	399.994	7.968.034	950	1956-2001	45	Suspendida
27	Río Lluta en Chapisca	01210003-5	406.416	7.969.019	1.850	1987-1995	9	Suspendida
28	Río Lluta en Puente Viejo km 15	01211002-2	366.031	7.964.691	145	1979-1988	10	Suspendida
29	Río Tignamar en Tignamar	01300001-8	442.656	7.950.813	3.800	1992-2005	12	Suspendida
30	Río San José en Livilcar	01310001-2	424.904	7.954.316	1.961	1937-1945	9	Suspendida
31	Río San José antes Bocatoma Azapa	01310003-9	398.004	7.945.001	960	1967-1989	23	Suspendida
32	Río San José en el Molino	01310005-5	404.071	7.962.553	1.629	1947-1948	2	Suspendida
33	Río Umirpa en Umirpa	01410001-6	457.841	7.924.943	3.945	1968-1971	4	Suspendida
34	Río Codpa en Chitita	01410002-4	428.003	7.918.520	1.750	1971-1978	8	Suspendida
35	Río Codpa en Ofragia	01410005-9	415714	7917.424	1.800	1946-1948	2	Suspendida
36	Río Codpa en Palca	01410006-7	429.766	7.916.560	1.920	1946-1948	2	Suspendida
37	Río Camarones en Taltape	01502001-6	422.748	7.901.194	1.226	1969-2002	34	Suspendida

Tabla 7.7 Listado de estaciones de calidad del agua controladas por la DGA. Fuente: elaboración propia basado en información del SNIA, DGA.

No	Estación Calidad de agua	Código BNA	DATUM WGS84 H19S		Estado
			UTM Este	UTM Norte	
1	Río Caquena en Vertedero	01001002-0	472.789	8.010.040	Vigente
2	Río Chungara en Desembocadura	01010002-K	485.658	7.977.806	Vigente
3	Rio Desaguadero Cotacotani	01020002-4	473.808	7.987.982	Vigente
4	Canal Lauca en Sifón no.1	01020004-0	464.800	7.984.017	Vigente
5	Río Lauca en Japu	01021001-1	494.862	7.944.893	Vigente
6	Río Guallatire en Desembocadura	01021004-6	482.093	7.950.096	Vigente
7	Pozo JICA B	01110012-0	363.887	7.964.540	Vigente
8	Pozo Gallinazos	01110013-9	361.392	7.963.936	Vigente
9	Río Colpitas en Alcérreca	01201001-K	433.574	8.010.216	Vigente
10	Río Caracarani en Alcérreca	01201002-8	433.261	8.011.158	Vigente
11	Caracarani antes Junta Colpitas	01201002-SC	433.233	8.010997	Vigente
12	Río Lluta en Tocontasi	01210001-9	404.690	7.968.629	Vigente
13	Río Lluta en Panamericana	01211001-4	362.473	7.964.681	Vigente
14	Río San José antes Bocatoma Azapa	01310003-9	397.795	7.944.614	Vigente
15	Acueducto Azapa en Bocatoma	01310004-7	406.241	7.944.399	Vigente
16	Pozo Albarracines	01310075-6	371.296	7.952.807	Vigente
17	Rio Codpa en Cala-Cala	01410004-0	429.519	7.917.794	Vigente
18	Río Camarones en Conanoxa	01502002-4	396.228	7.893.581	Vigente
19	Río Camarones en Condumaya	01502005-9	448.164	7.903.844	Vigente
20	Río Lauca en Estancia el Lago	01020003-2	464.705	7.983.680	Suspendida
21	Río Lauca en Ungalliri	01020005-9	491.375	7.944.156	Suspendida
22	Río Guallatire en Nacimiento	01021003-8	488.259	7.959.423	Suspendida
23	Río Lauca después de Quiburcanca	01021005-4	489.250	7.943.784	Suspendida
24	Río Lluta en Alcérreca	01201003-6	433.142	8.009.805	Suspendida
25	Río Lluta en Chapisca	01210003-5	405.798	7.968.607	Suspendida

Se incluyen a continuación algunas fotografías de las estaciones fluviométricas tomadas durante los trabajos realizados en las campañas de terreno.

Figura 7.9 Estación Río Colpitas en Alcérreca. Fuente: elaboración propia.

Figura 7.10 Estación Río Camarones en Conanoxa. Fuente: elaboración propia.

Figura 7.11 Estación Río Camarones en Chilpe. Fuente: elaboración propia.

Figura 7.12 Estación Río Guallatire en Guallatire. Fuente: elaboración propia.

Figura 7.13 Estación Río Lluta en el Tocontasi. Fuente: elaboración propia.

7.1.4.3 Análisis de las variables espacial y temporal

7.1.4.3.1 Pluviometría

TRATAMIENTO Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

Para el análisis de las precipitaciones de la región se utilizó la información de 32 estaciones pluviométricas que pertenecen a la DGA (sombreadas en la Tabla 7.4 del capítulo "Estaciones de monitoreo"), debido a que sus registros cubren los últimos 30 años. Cada estación cuenta con series temporales diferentes, desde un mínimo de 10 años hasta un máximo de 78 años, además de presentar registros con datos mensuales faltantes. La disponibilidad de datos se presenta en la Tabla 7.8 siguiente:

Tabla 7.8 Disponibilidad de información en las estaciones pluviométricas Fuente: elaboración propia, basado en información del SNIA, DGA.

No	Nombre Estación	Código BNA	Periodo	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
1	Chungara Guardería	01010009-7	1984-1987	12	10	3																											
2	Isla Blanca	01020013-K	1970-1989	12	12	11	12	6																									
3	Parinacota Conaf DGA	01020015-6	1973-1989	12	12	11	10	1																									
4	Chucuyo (Ex. Endesa)	01020018-0	1984-1990	12	12	11	10	12	3																								
5	Pacollo	01202009-0	1978-1999	12	12	12	12	12	10	12	12	12	12	12	12	12	12	5															
6	Las Cuevas Conaf	01202011-2	1986-1988	11	12	1																											
7	Lluta	01211006-5	1966-1993	12	12	12	5	5	0	3	4	12																					
8	Murmuntane	01300004-2	1970-1987	12	11	11																											
9	Visviri	01000005-K	1970-2014	12	12	12	12	12	11	9	12	8	7	8	12	12	12	11	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	11	12
10	Caquena	01001005-5	1969-2014	12	12	12	12	12	11	2	0	4	12	6	8	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	11	11	8	12
11	Chungara Retén	01010007-0	1968-2014	12	12	12	12	12	12	12	12	10	12	12	12	12	12	12	12	12	9	11	8	12	9	11	12	12	12	6	12	12	12
12	Chungara Ajata	01010010-0	1983-2014	12	12	12	12	12	12	12	12	10	12	12	12	11	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	9	12	12	7	5	11	12
13	Cotacotani	01020014-8	1961-2014	12	12	11	12	12	11	11	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	11	11	7	3	7	9	10	12	12
14	Chucuyo Retén	01020016-4	1960-2014	12	12	12	6	12	11	11	12	12	11	8	12	6	12	11	12	12	12	12	12	11	12	12	12	12	12	12	11	10	12
15	Parinacota Ex Endesa	01020017-2	1983-2014	12	12	11	10	6	10	11	12	12	12	12	11	11	9	7	10	12	12	12	12	11	11	11	12	11	12	12	12	12	11
16	Guallatire	01021007-0	1969-2014	12	12	12	11	12	12	12	12	12	12	12	10	12	11	11	12	12	12	12	12	12	12	11	12	12	11	12	11	12	12
17	Chilcaya	01030003-7	1971-2014	12	12	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
18	Villa Industrial (Tacora)	01200002-2	1975-2014	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	9	12	9	12	11	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	11	12	11	12
19	Humapalca	01200003-0	1971-2014	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	10	11	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
20	Río Lluta en Alcérreca	01201003-6	2001-2014																	1	12	12	12	2	12	12	12	12	12	12	12	12	12
21	Alcérreca	01201010-9	1970-2014	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	10	11	12	12	11	12	12	12	12	12	12	12	11	12	12	12	12	12	10	12
22	Putre	01202010-4	1967-2009	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	11	12	10	9					
23	Putre-DCP	01202012-0	2002-2014																	1	12	12	12	11	12	12	12	9	12	12	9	12	12
24	Central Chapiquiña	01300006-9	1962-2014	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	11	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
25	Belén	01300007-7	1937-2014	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	11	12	12	12	12	12	12	12	12	11	11	7	10	10	12	12
26	Tignamar	01300008-5	1967-2014	12	12	12	12	12	12	11	12	12	12	12	12	12	9	11	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
27	Río Tignamar en Angostura	01300009-3	2006-2014																						10	12	9	10	12	10	10	11	11
28	Arica Oficina	01310018-7	1974-2014	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	11	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
29	Azapa	01310019-5	1966-2014	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
30	Aeródromo el Buitre	01310022-5	1985-2014	4	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	11	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	3	0	0
31	Codpa	01410012-1	1961-2014	12	11	12	12	10	12	12	12	8	0	0	0	10	12	10	10	9	11	10	11	12	11	10	4	0	0	0	0	0	0
32	Esquiña	01502007-5	1975-2014	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	11	12	12	12	12	12	10	12	12	12	12	12	12	12	12	12
33	Río Camarones en Chilpe	01502008-3	2006-2014																						12	12	12	12	12	11	12	12	12

De 10 a 12 meses De 6 a 9 meses De 0 a 5 meses

Previo al análisis de la información pluviométrica a nivel mensual, se analizaron los datos comprobando su consistencia mediante curvas dobles acumuladas, análisis gráficos y estadísticos y en los casos en que existiesen correlaciones adecuadas entre estaciones, se rellenaron los datos faltantes con la finalidad de contar con una serie temporal común. Estos análisis se presentan en el Anexo VI.

El periodo seleccionado fue desde el año 1985 al 2014, es decir 30 años, de manera que se cubre la variabilidad hidrológica representativa del periodo más reciente, incluyendo tanto periodos secos como húmedos.

RELLENO DE DATOS Y ANÁLISIS DE CONSISTENCIA

Como se menciona anteriormente, para analizar la consistencia relacionada con los errores, así como para tener mayor confiablidad en la información, se realizó un análisis de doble masa para periodos comunes de información, el cual consiste en graficar la precipitación total mensual acumulada de las estaciones seleccionadas.

En el análisis del relleno de datos, se escogió una o más estaciones patrón por cada estación a rellenar que contase con un registro histórico lo más completo posible, además de considerar que las estaciones escogidas presentarán características geográficas similares, como cercanía y altitud; luego se analizó la correlación entre estaciones, verificando que el coeficiente de correlación mínimo aceptado fuera de 0,6. En el Anexo VI se presenta con detalle las series originales y rellenadas, así como la metodología utilizada, basada en lo desarrollado por Ph. Bois, Ch. Obled e I. Zin en su publicación Introduction au Traitement de Donnees en Hidrologie, E.N.S. d'Hydraulique et Mécanique de Grenoble (2007).

Las estaciones pluviométricas relacionadas por cuenca de la región, se presentan en la siguiente Tabla 7.9.

Tabla 7.9 Estaciones relacionadas entre ellas para el relleno y análisis de consistencia según cada cuenca. Fuente: elaboración propia.

Cuenca	Estaciones Pluviométricas
Río Lluta	Est. Alcérreca, Est. Putre y Est. Humapalca, Est. Putre y Est. Putre DCP, Est. Humapalca y Est. Villa Industrial (Tacora), Est. Pacollo y Est. Putre
Río San José	Est. Central Chapiquiña, Est. Tignamar y Est. Belén DCP, Est. Azapa, Est. Arica oficina y Est. Aeródromo el Buitre
Quebrada Chaca Vítor	Est. Esquiña y Est. Codpa
Río Camarones	Est. Esquiña y Est. Río Camarones en Chilpe
Ríos Uchusuma Y Caquena	Est. Cotacotani y Est. Caquena, Est. Villa Industrial (Tacora) y Est. Visviri
Lago Chungara	Est. Cotacotani y Est. Chungara Ajata, Est. Chungara Ajata y Est. Chungara Reten
Río Lauca	Est. Guallatire y Est. Parinacota Ex Endesa, Est. Parinacota Ex Endesa y Est. Chucuyo Retén
Salar de Surire	Est. Guallatire y Est. Chilcaya

PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL

En la XV Región de Arica y Parinacota se presenta un régimen de precipitaciones estivales (Diciembre a Marzo). En la Tabla 7.10 se agrupan las precipitaciones medias anuales de las cuencas en estudio, para ello se escogieron estaciones pluviométricas representativas de la región. Allí se observa que más del 80% de la precipitación anual está concentrada en el período Diciembre − Marzo y para el periodo Abril-Noviembre ocurren precipitaciones esporádicas.

Tabla 7.10 Precipitación media anual de la Región de Arica y Parinacota. Fuente: elaboración propia.

Cuenca	Id	Estación pluviométrica DGA	Precipitación media anual Periodo 1985-2014				
			Dic-mar		Abr-nov		Total
			Pp [mm]	Pp [%]	Pp [mm]	Pp [%]	Pp [mm]
Río Lluta	5	Pacollo	237	91%	22	9%	260
	18	Villa industrial (Tacora)	265	90%	30	10%	295
	19	Humapalca	306	92%	27	8%	333
	21	Alcérreca	201	92%	17	8%	218
	22	Putre	177	93%	13	7%	190
Río San José	24	Central Chapiquiña	146	96%	7	4%	153
	25	Belén DCP	157	95%	8	5%	165
	26	Tignamar	132	94%	8	6%	140
	28	Arica oficina	0,7	58%	0,5	42%	1,1
	29	Azapa	0,4	51%	0,4	49%	0,8
	30	Aeródromo El Buitre	0,5	66%	0,3	34%	0,8
Quebrada Chaca Vítor	31	Codpa	8,7	93%	0,7	7%	9
Río Camarones	32	Esquiña	43,1	94%	2,8	6%	46
	33	Río Camarones en Chilpe	8,1	90%	0,9	10%	9
Ríos Uchusuma y Caquena	9	Visviri	228	85%	41	15%	269
	10	Caquena	386	89%	46	11%	432
Lago Chungara	11	Chungara retén	262	88%	37	12%	299
	12	Chungara Ajata	318	87%	47	13%	365
Río Lauca	13	Cotacotani	363	86%	60	14%	423
	14	Chucuyo retén	318	90%	35	10%	353
	15	Parinacota ex Endesa	323	92%	27	8%	350
	16	Guallatire	211	89%	25	11%	236
Salar de Surire	17	Chilcaya	239	92%	20	8%	260
Estaciones de la I región	34	Pumire*	215	92%	19	8%	233
	35	Camiña*	37	90%	4	10%	41
	36	Colchane (Tte. Isluga)*	116	88%	16	12%	132
	37	Enquelca*	107	92%	10	8%	116

* Estación ubicada en la I Región de Tarapacá considerada para el análisis, datos tomados de DICTUC (2008)

Por otro lado, para analizar la variación de la precipitación con respecto a la elevación, en la Figura 7.14 se graficó la precipitación media anual de todas las estaciones representativas de la región con relación a la ubicación y elevación respectiva.

En ésta se aprecia que las mayores precipitaciones se desarrollan en la parte alta de la Región y disminuyen a medida que la cota altitudinal se hace menor en dirección hacia la costa. En cotas superiores a los 4.080 msnm se registran precipitaciones medias anuales entre 300 mm/año y 430 mm/año; así mismo entre las cotas 3.000 msnm y 4.080 msnm se registran precipitaciones medias anuales del orden de 140 mm/año y 295 mm/año, respectivamente. En la parte media entre los 1.500 msnm y 2.200 msnm, se registran precipitaciones del orden de los 14 mm/año y 46 mm/año. Y finalmente, en la parte baja de la región cerca a la costa, las precipitaciones anuales son mínimas, siendo del orden de 1 mm/año.

En general, las estaciones que se encuentran en el mismo rango de altitud registran precipitación similar, por lo tanto, es necesario considerar en el análisis la relación de las variables altitudinal y espacial en la región. El gradiente regional se podría separar en cuatro tramos, según la tendencia que se muestra en la Figura 7.14 y se describe así:

Altitud < 1.500 msnm	Pp [mm/año] = entre 0 y 1
1.500 msnm < Altitud < 3.000 msnm	Pp [mm/año] = 0,0607*Altitud [msnm] - 92,014
3.000 msnm < Altitud < 4.000 msnm	Pp [mm/año] = 0,1648*Altitud [msnm] - 387,58
Altitud > 4.000 msnm	Pp [mm/año] = 0,3069*Altitud [msnm] - 1.019,8

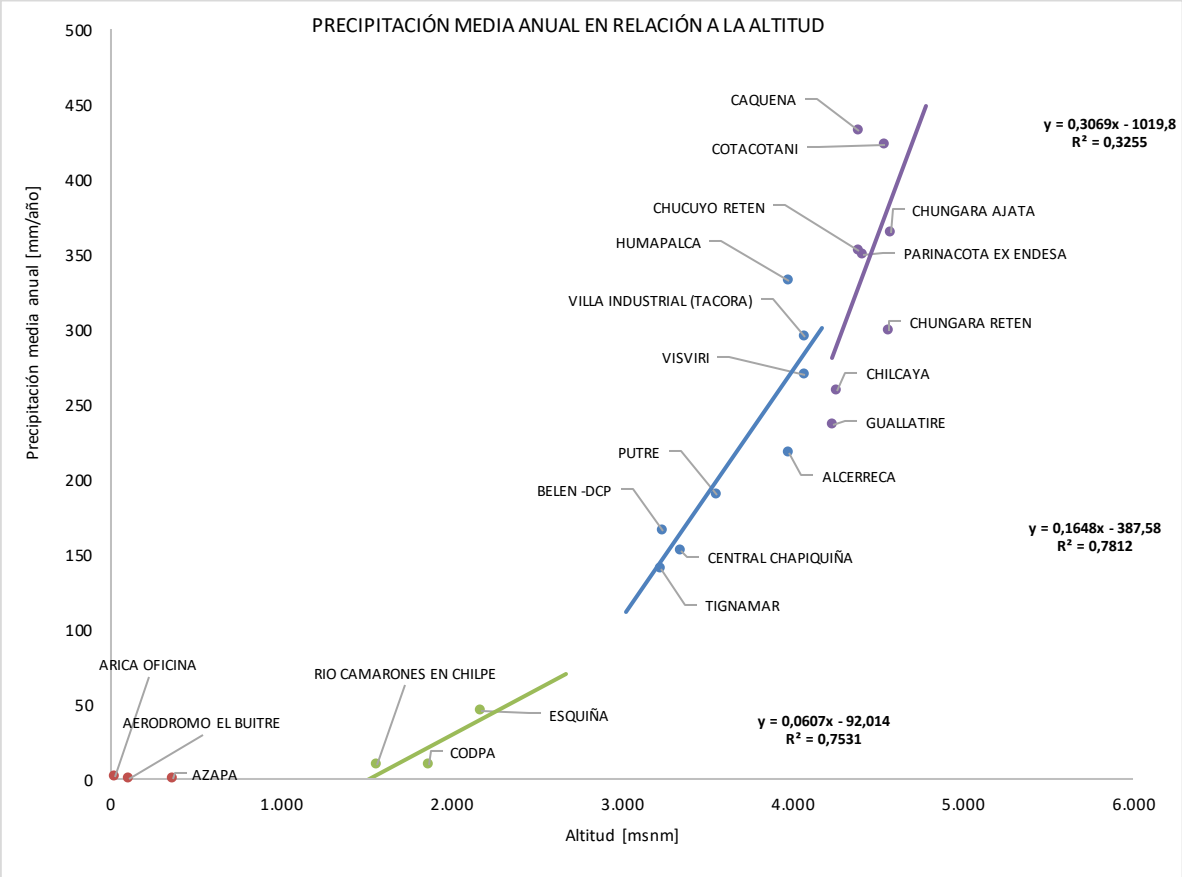


Figura 7.14 Precipitación media anual en relación a la altitud, en la Tabla 7.11 se presenta la información. Fuente: elaboración propia.

Tabla 7.11 Identificación de las estaciones según la numeración utilizada en la Figura 7.14, así como la altitud y precipitación correspondiente para el análisis. Fuente: elaboración propia.

No	Estación	Altitud [msnm]	Precipitación media anual [mm/año]	No	Estación	Altitud [msnm]	Precipitación media anual [mm/año]
1	Chungara Ajata	4.585	364,7	12	Alcérreca	3.990	218,3
2	Chungara Retén	4.570	298,9	13	Putre	3.560	190,2
3	Visviri	4.080	269,4	14	Central Chapiquiña	3.350	152,6
4	Caquena	4.400	432,4	15	Belén Dcp	3.240	165,4
5	Cotacotani	4.550	423,0	16	Tignamar	3.230	139,8
6	Parinacota Ex Endesa	4.420	349,8	17	Codpa	1.870	9,4
7	Guallatire	4.240	236,4	18	Esquiña	2.170	45,9
8	Chucuyo Retén	4.400	353,1	19	Río Camarones En Chilpe	1.565	9,1
9	Chilcaya	4.270	259,6	20	Azapa	365	0,8
10	Villa Industrial (Tacora)	4.080	294,8	21	Aeródromo El Buitre	110	0,8
11	Humapalca	3.980	333,0	22	Arica Oficina	20	1,1

A nivel espacial y regional de forma gráfica se puede ver la distribución de la precipitación media anual mediante el trazado de las isoyetas de precipitación, construidas a partir de los datos registrados en las 28 estaciones meteorológicas, 24 de ellas ubicadas en la XV Región de Arica y Parinacota y las 4 restantes en la I Región de Tarapacá. La información utilizada de las estaciones fue previamente completada y analizada, como se explicó anteriormente.

Para el trazado de las isoyetas inicialmente se realizó una interpolación espacial utilizando el programa ArcMap™ 10.2 (método Kriging Ordinary), seguidamente éstas fueron corregidas en base a la topografía y al gradiente altitudinal regional con la precipitación. Además se consideraron como referentes los trabajos presentados por la DGA (1987) y el DICTUC (2008) en las cuencas altiplánicas. La distribución de las isoyetas de precipitación media anual en la Región se presentan en la Figura 7.15.

Cabe mencionar que para el presente estudio, se realizó una comparación de los valores de precipitación media anual obtenidos en cada estación, considerando los últimos 30 años y los presentados por los referentes antes mencionados. En el balance hidrológico de Chile de la DGA (1987) se utilizó el periodo 1961-1980 y en el estudio del DICTUC (2008), el periodo evaluado fue de 1950-2006. En la Figura 7.16 se logra

visualizar que en algunas estaciones la tendencia se conserva, sin importar las diferencias entre los periodos evaluados. Sin embargo, existen otras estaciones en las que se observan cambios en la precipitación media anual, disminuyendo o aumentando. Destacando las de las cuencas altiplánicas, las estaciones Guallatire y Cotacotani (Cuenca del río Lauca), Chilcaya (Cuenca del Salar de Surire), Pumire (Región de Tarapacá de influencia en la Cuenca del Salar de Surire) y Chungara Retén (Cuenca del lago Chungara).

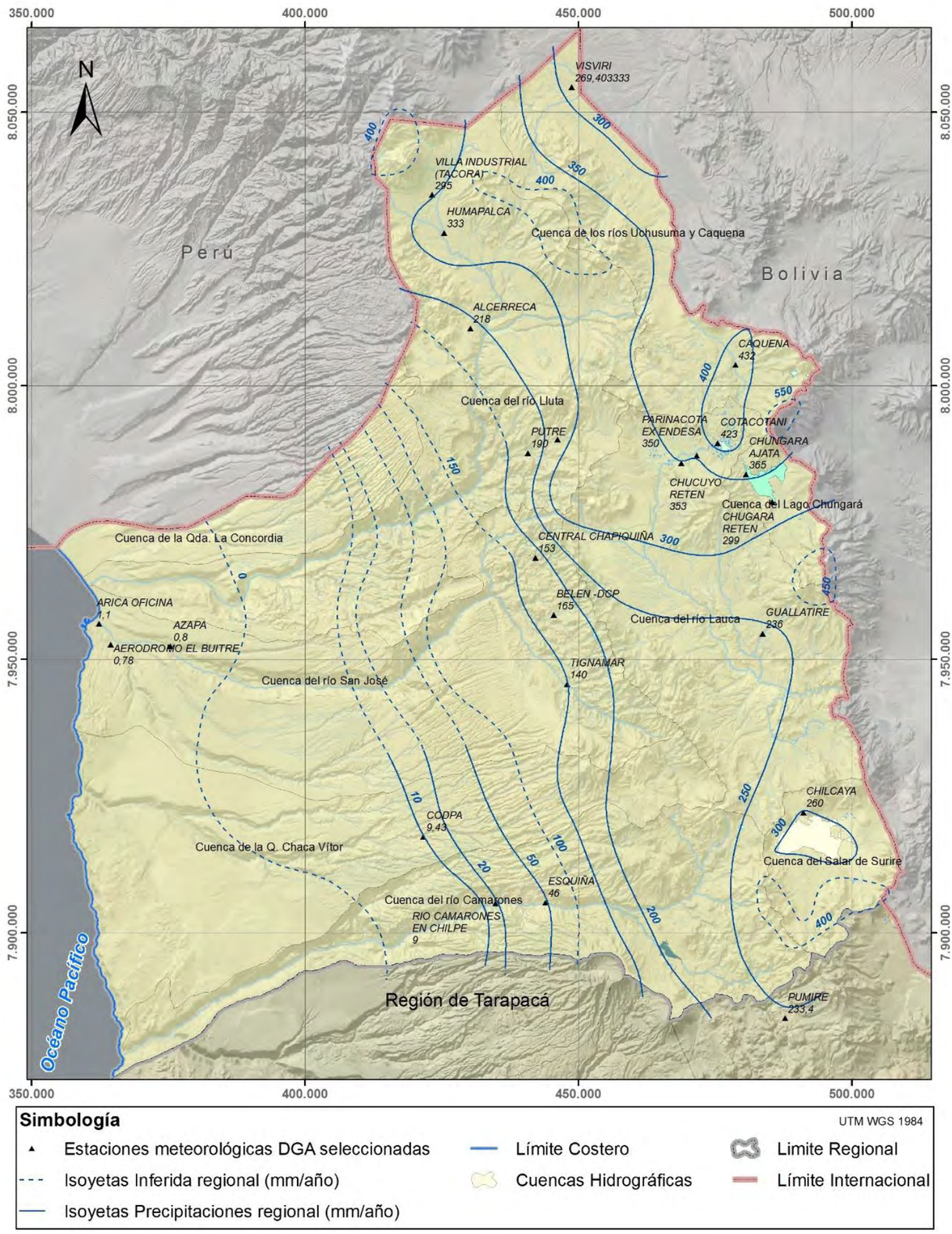


Figura 7.15 Mapa de isoyetas de precipitación media anual de la XV Región de Arica y Parinacota. Fuente: elaboración propia.

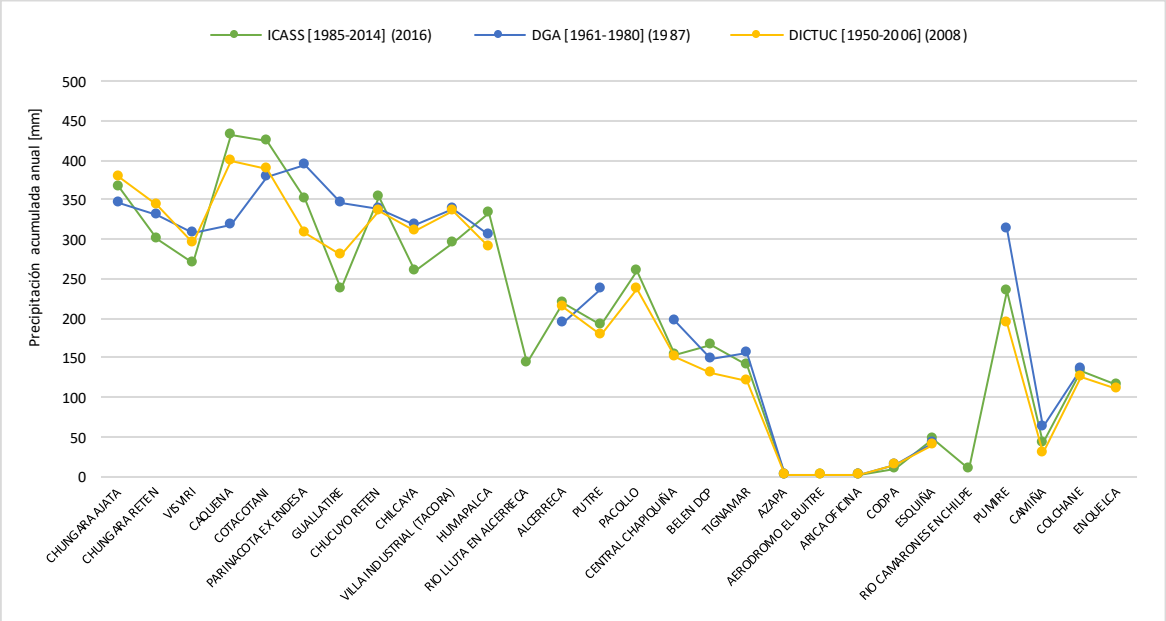


Figura 7.16 Comparación de la precipitación media anual obtenida para distintos periodos. Fuente: elaboración propia.

PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL

Las precipitaciones medias mensuales representan el año hidrológico medio, por lo tanto, mediante su análisis se determinó la estacionalidad existente en la región. En la Tabla 7.12 se muestran las precipitaciones medias mensuales de las cuencas en relación a las estaciones pluviométricas existentes.

Tal como se observa en la Figura 7.15 existe una marcada estacionalidad, sin considerar las diferencias altitudinales en la región. Los meses más húmedos del año corresponden a Diciembre, Enero, Febrero y Marzo. En los demás meses del año las precipitaciones son esporádicas o nulas. De esta manera, se corrobora que la región de Arica y Parinacota tiene fuerte influencia tropical, por lo tanto las lluvias que se originan son de tipo orográficas provenientes de la región del Amazonas en el altiplano de la cordillera de los Andes, comúnmente denominado Invierno Altiplánico.

En términos regionales, los rangos de las precipitaciones medias registradas en el mes de Diciembre son del orden de 10 mm a 60 mm, en Enero entre 50 mm y 140 mm, en Febrero entre 50 mm y 100 mm, y en Marzo del orden de los 30 mm a 60 mm, cuyos datos se presentan en mayor detalle en la Tabla 7.12 y Figura 7.17.

Tabla 7.12 Precipitaciones medias mensuales por cuencas de la Región de Arica y Parinacota y otras consideradas. Fuente: elaboración propia.

Cuenca	Estación pluviométrica DGA	Precipitación media mensual [mm] periodo 1985-2014												
		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Pp ACUM
Río Lluta	Villa Industrial (Tacora)	94,8	84,6	51,5	9,1	1,7	2,7	5,3	3,1	0,7	2,0	5,1	34,2	294,8
	Humapalca	109,1	108,3	58,4	6,7	1,6	3,4	4,4	3,1	1,4	1,6	5,3	29,9	333,0
	Alcérreca	79,2	60,1	40,9	4,7	0,9	2,5	3,4	3,0	0,4	0,5	2,0	20,8	218,3
	Putre	62,7	64,2	29,2	4,0	1,5	0,7	1,6	1,8	1,6	0,4	1,7	20,8	190,2
	Pacollo	79,3	95,9	36,0	7,9	0,4	1,0	3,0	3,9	2,1	0,7	3,3	26,1	259,7
Río San José	Central Chapiquiña	52,1	53,3	25,0	1,6	0,1	0,6	1,2	1,8	0,6	0,2	0,5	15,5	152,6
	Belén -Dcp	57,0	54,8	29,7	0,9	0,6	0,7	1,4	2,9	0,4	0,5	0,8	15,7	165,4
	Tignamar	52,1	42,8	20,9	1,4	0,7	0,5	1,3	1,8	1,5	0,2	0,5	16,1	139,8
	Azapa	0,2	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8
	Aeródromo El Buitre	0,1	0,1	0,2	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8
	Arica Oficina	0,3	0,2	0,2	0,0	0,0	0,0	0,3	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	1,1
Quebrada Chaca Vítor	Codpa	3,6	3,7	1,2	0,0	0,0	0,0	0,2	0,4	0,0	0,0	0,0	0,3	9,4
Río Camarones	Esquiña	12,1	20,0	9,0	0,7	0,0	0,0	0,7	1,1	0,3	0,0	0,0	2,0	45,9
	Río Camarones En Chilpe	2,8	4,3	0,6	0,1	0,0	0,0	0,4	0,3	0,2	0,0	0,0	0,4	9,1
Ríos Uchusuma y Caquena	Visviri	84,0	59,9	48,6	10,5	1,9	2,7	2,8	4,1	1,3	9,0	9,0	35,7	269,4
	Caquena	137,9	113,4	78,8	13,0	1,6	3,7	9,5	7,5	0,1	3,0	7,6	56,3	432,4
Lago Chungara	Chungara Ajata	123,5	84,1	62,4	13,5	2,2	4,0	3,7	4,4	1,9	4,4	12,6	48,0	364,7
	Chungara Retén	104,0	74,3	45,2	8,3	2,2	3,0	10,4	1,6	0,9	2,4	8,2	38,4	298,9
Río Lauca	Visviri	84,0	59,9	48,6	10,5	1,9	2,7	2,8	4,1	1,3	9,0	9,0	35,7	269,4
	Caquena	137,9	113,4	78,8	13,0	1,6	3,7	9,5	7,5	0,1	3,0	7,6	56,3	432,4
	Cotacotani	133,8	98,7	68,8	18,9	2,4	2,4	3,6	5,8	2,2	7,9	16,8	61,8	423,0

Cuenca	Estación pluviométrica DGA	Precipitación media mensual [mm] periodo 1985-2014												
		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Pp ACUM
	Parinacota Ex Endesa	111,4	88,4	75,3	10,6	0,9	1,1	2,4	1,5	0,4	1,7	7,9	48,1	349,8
	Guallatire	72,0	66,6	45,8	5,7	1,0	0,6	5,5	3,7	2,1	2,1	4,7	26,6	236,4
	Chucuyo Retén	129,3	88,2	58,4	11,6	1,7	0,9	7,2	3,0	1,5	1,8	7,1	42,3	353,1
Salar De Surire	Chilcaya	90,2	70,1	49,3	11,1	1,1	0,4	2,1	0,9	0,3	0,6	3,7	29,8	259,6
Estaciones De La I Región	Pumire*	75,1	88,3	33,2	5,5	1,4	1,0	0,9	1,5	5,4	1,1	1,8	18,2	233,4
	Camiña*	9,8	19,3	6,9	1,6	0,0	0,3	1,6	0,5	0,0	0,1	0,0	0,8	40,9
	Colchane (Tte. Isluga)*	48,2	38,2	19,0	5,5	0,0	0,6	6,5	0,3	0,5	0,8	1,7	10,8	132,2
	Enquelca*	42,8	36,4	17,4	2,6	0,2	1,7	1,6	0,7	0,6	0,4	1,8	10,1	116,2

* Estación ubicada en la I Región de Tarapacá considerada para el análisis, datos tomados de DICTUC (2008)

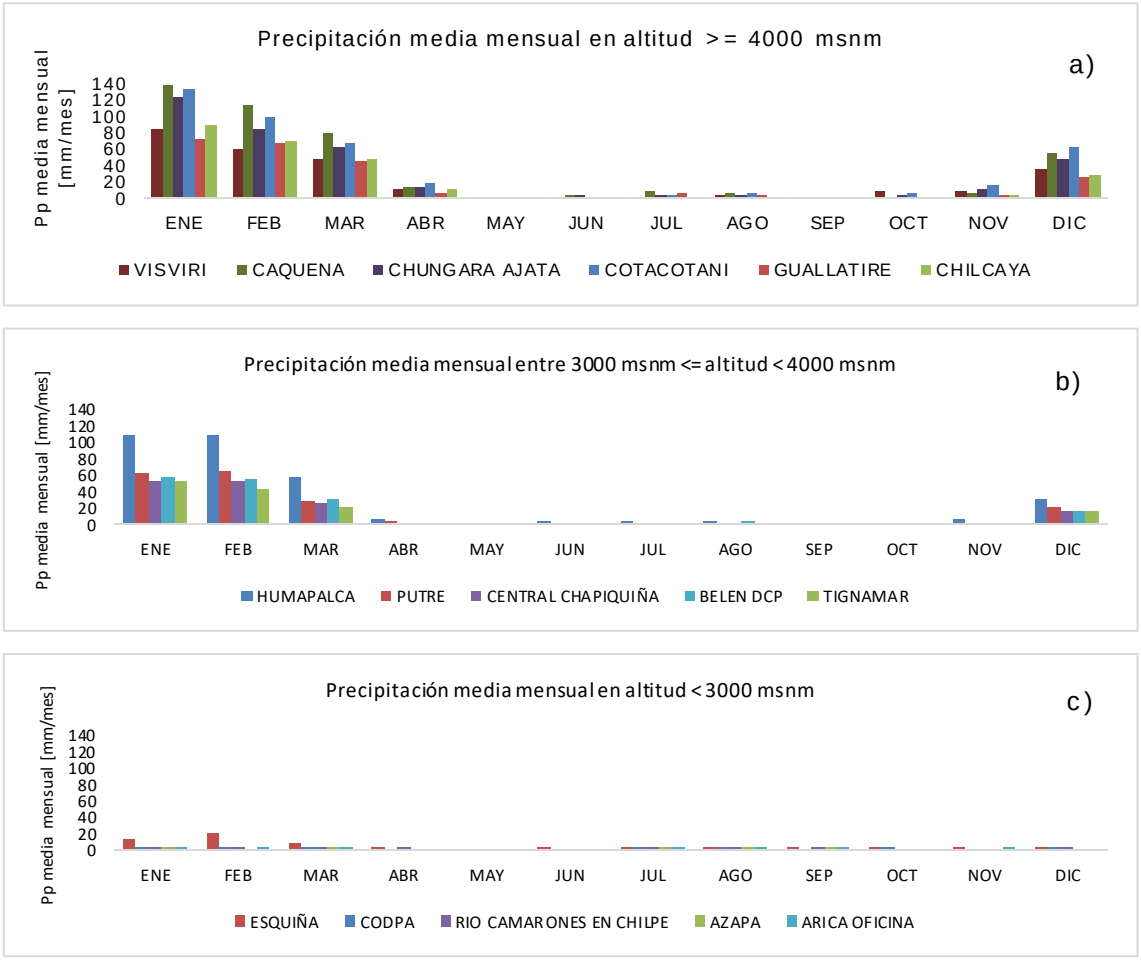


Figura 7.17 Precipitación media mensual en la Región de Arica y Parinacota, **separada por rangos de altitud: a) precipitación media mensual en altitud ≤ 4.000 msnm, b) precipitación media mensual entre 3.000 msnm ≤** altitud < 4.000 msnm y c) precipitación media mensual en altitud < 3.000 msnm. Fuente: elaboración propia.

7.1.4.3.2 Evapotranspiración

TRATAMIENTO Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

Para el análisis de la evapotranspiración de la región se utilizó información de 12 estaciones meteorológicas que pertenecen a la DGA. Cada estación cuenta con una serie temporal diferente de las variables climáticas evaporación, temperatura, humedad relativa y radiación solar, con un mínimo de 2 años hasta un máximo de 35

años, además de presentar registros con datos mensuales faltantes. En el capítulo "Estaciones de monitoreo" se relacionan las estaciones existentes en cada cuenca y los periodos con información histórica.

En primera instancia se analizaron los registros de evaporación de tanque tipo A de las estaciones que cuentan con estas mediciones, para ello se escogieron años con información superior a 9 meses completa, para lo cual se consideró un periodo mínimo de datos de 8 años. Las estaciones escogidas junto con los periodos de información se relacionan en la Tabla 7.13.

Seguidamente se analizaron los registros de información mensual existente en la región de las variables climatológicas: temperatura, humedad relativa y radiación solar. Con esta información, además de conocer la precipitación, fue posible estimar la evapotranspiración aplicando la formulación matemática del método Turc. Adicionalmente, se contó con información de los principales cultivos y usos de suelo en la Región, referenciada de documentos que fueron previamente recopilados y revisados.

Tabla 7.13 Coordenadas y periodo de información de las estaciones con medición de evaporación tanque tipo A Fuente: elaboración propia.

Estación Meteorológica DGA	ID	Código BNA	DATUM WGS84 H19S		Altitud	Periodo	Años	Estado del Tanque
			UTM Este	UTM Norte				
Putre	13	01202010-4	440.754	7.987.689	3.545	1982-2009	27	V
Azapa	20	01310019-5	375.384	7.952.366	365	1980-2014	34	V
Aeródromo El Buitre	21	01310022-5	364.443	7.952.691	110	1986-2012	26	V
Codpa	17	01410012-1	421.626	7.917.572	1.870	1980-2014	34	V
Caquena	4	01001005-5	478.658	8.003.810	4.400	1981-1990	9	S
Parinacota Ex Endesa	6	01020017-2	471.626	7.987.205	4.420	1985-1997	12	S
Chungara Ajata	1	01010010-0	480.618	7.983.774	4.585	1984-2011	27	V
Cotacotani	5	01020014-8	475.323	7.989.490	4.500	1960-1989	29	S
Coyacagua *	29	01050007-9	517.429	7.782.949	3.990	1964-2006	42	V
Pampa Lirima Lagunilla *	30	01730018-0	515.706	7.805.083	3.940	1982-2006	24	V
Huara En Fuerte Baquedano *	31	01700010-1	421.599	7.775.403	1.000	1994-2006	12	V
Cerro Colorado *	32	01740002-9	479.082	7.784.789	2.630	1993-2002	9	V

V: Vigente, S: Suspendida. * Estación ubicada en la I Región de Tarapacá, datos tomados de DICTUC (2008).

EVAPORACIÓN Y TEMPERATURA MEDIA ANUAL

A escala regional se estima una tasa de evaporación potencial media anual de 5,2 mm/d, con un rango entre 4 mm/d y 7 mm/d. Para el análisis, se relacionó la evaporación media anual del registro histórico de cada estación meteorológica con la altitud (Figura 7.18). Allí se observa que existe cierta correlación entre las componentes, con cierto intervalo de confianza, pues se considera que la evaporación no es función sólo de la altura, el viento es otra variable a considerar. A pesar de ello se puede comentar que las estaciones Azapa y Aeródromo El Buitre ubicadas a menos de 1.000 msnm, presentan una mayor evaporación (> 6 mm/d) que las ubicadas a una cota superior a los 2.000 msnm (Est. Codpa, Est. Parinacota, Est. Caquena y Est. Chungara Ajata). A excepción de la estación Putre ubicada a 3.545 msnm que registra una tasa de evaporación media anual de 5,5 mm/d, lo que podría indicar que no es un patrón lineal la relación de la evaporación potencial con la altitud.

En promedio la Región podría presentar una evaporación anual acumulada entre los 1.429 mm y 2.572 mm, que comparando con la temperatura media anual, en general tendrían directa relación. Como se presenta en la Figura 7.19, a mayor temperatura mayor es la tasa de evaporación, a excepción de la estación Chungara Ajata que se encuentra a una altura de 4.595 msnm, lo que podría estar fuertemente influenciada por las bajas temperaturas. Cabe mencionar que la evaporación media registrada en el tanque tipo A es potencial y se distribuye en distinta proporción durante los meses del año.

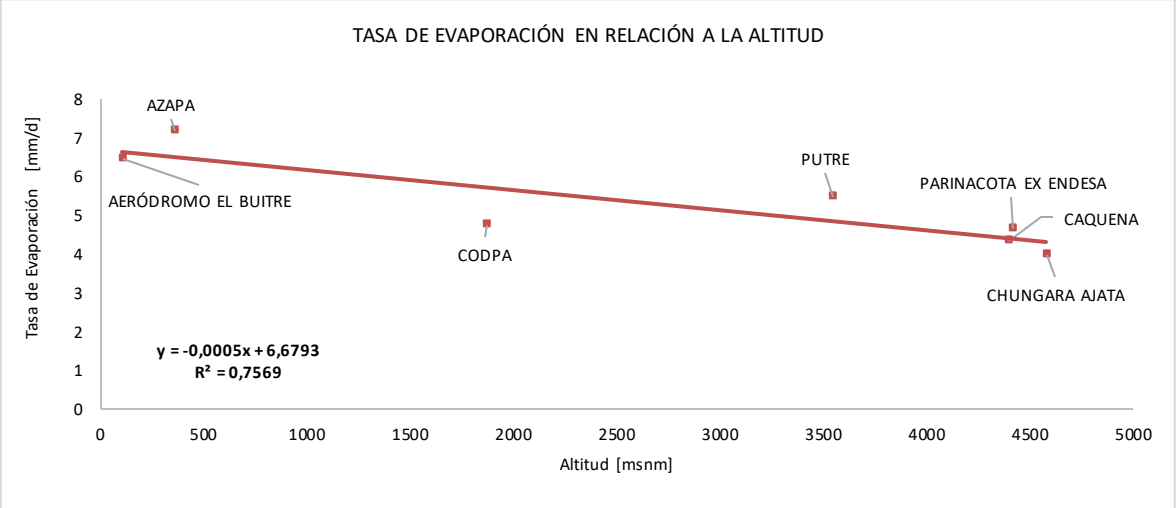


Figura 7.18 Variación de la evaporación media anual del tanque tipo A con la elevación (valores promedio anual). Fuente: elaboración propia.

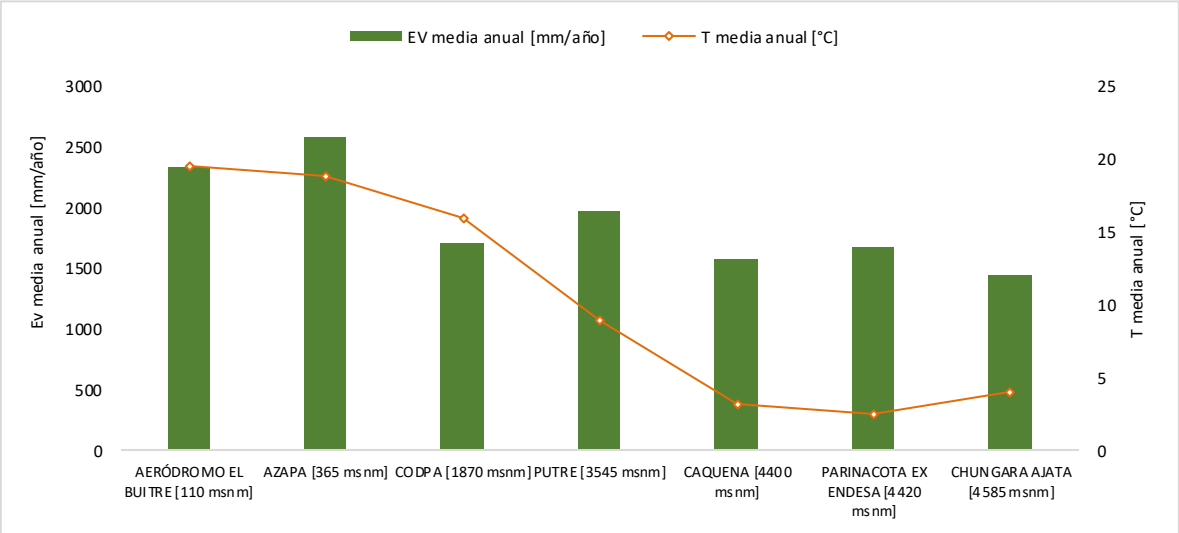


Figura 7.19 Relación entre la evaporación media anual y la temperatura media anual. Fuente: elaboración propia.

Por otro lado, se analizó la variación de la temperatura media absoluta en relación a la altura (Figura 7.20). En ésta se observa que existe una marcada influencia del océano en la temperatura hasta una altitud de 500 msnm, apreciándose que la temperatura tiende a mantenerse constante. Para altitudes sobre y mayores a los 1.800 msnm existe una influencia continental, en el que se observa una marcada disminución en forma lineal de la temperatura con el aumento de la altitud.

A partir de la Figura 7.20 se estimaron gradientes para la temperatura media absoluta anual en la XV Región, los cuales son corresponden a:

1. Para una altitud menor a 1.800 msnm, se presentan mínimas variaciones de la temperatura.
2. Para una altitud entre los 1.800 y 4.500 msnm, se estima una disminución de 0,59°C cada 100 m.

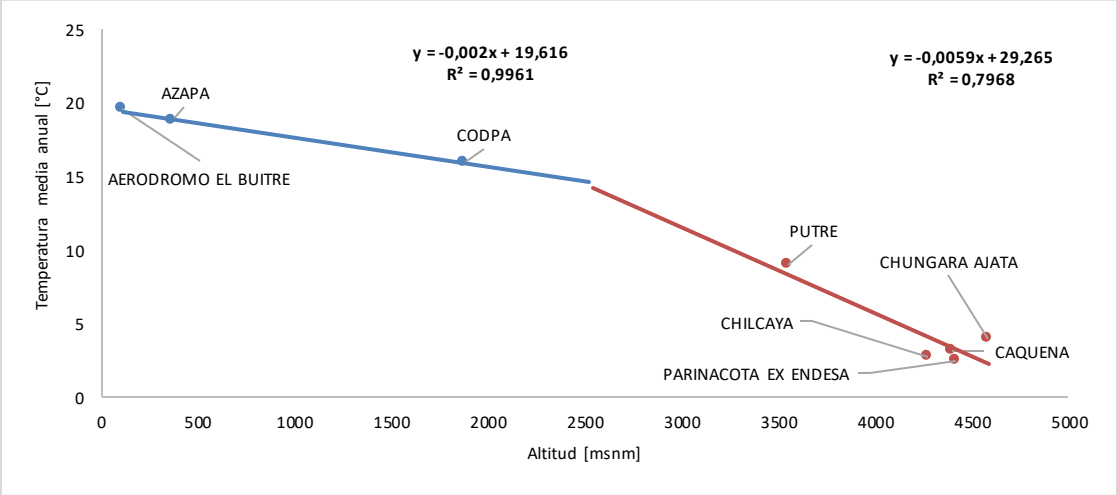


Figura 7.20 Variación de la temperatura media anual con la altitud. Fuente: elaboración propia.

Para analizar la distribución espacial de la evaporación media anual en la región, se trazaron isolíneas en base a la tasa de evaporación media anual [mm/d]. Estas fueron construidas a partir de los datos registrados en 12 estaciones meteorológicas, 8 de ellas ubicadas en la XV Región de Arica y Parinacota y las 4 restantes en la I Región de Tarapacá. La información utilizada de las estaciones fue previamente analizada, tal como se explicó anteriormente.

Para el trazado de las isolíneas inicialmente se realizó una interpolación espacial utilizando el programa ArcMap™ 10.2 (métodos IDW y Kriging Ordinary), seguidamente éstas fueron corregidas en base a las isotermas de temperatura regionales reportadas en los estudios "Balance hidrológico de Chile" de la DGA (1987) y "Levantamiento hidrogeológico para el desarrollo de nuevas fuentes de agua en áreas prioritarias de la zona norte de chile, regiones XV, I, II y III" del DICTUC (2008), además de considerar las franjas de clasificación climática de Koppen en Chile. Las isolíneas de la tasa de evaporación media anual en la Región se presentan en la Figura 7.21.

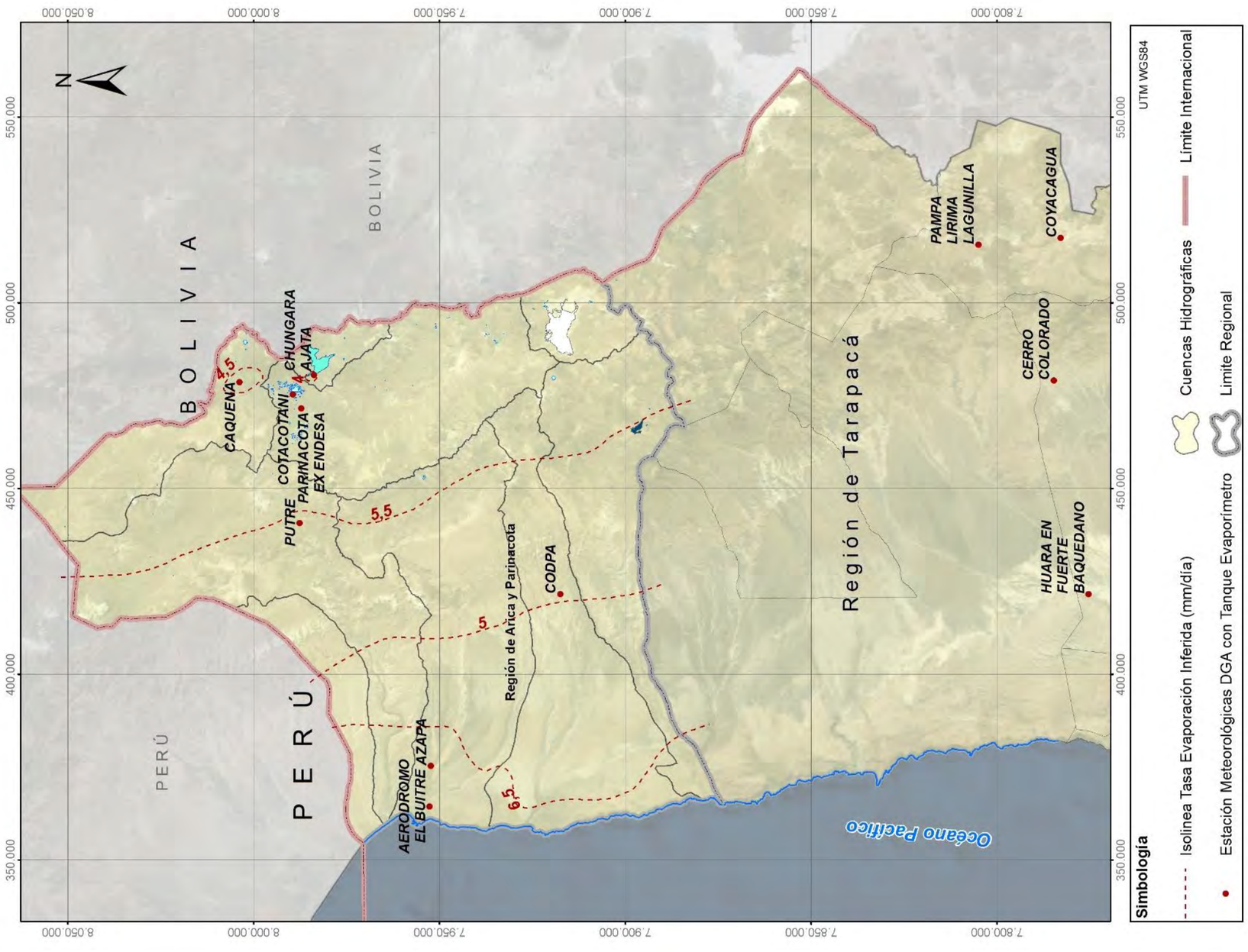


Figura 7.21 Mapa de isolíneas de la tasa de evaporación media anual en la Región de Arica y Parinacota. Se muestran las 8 estaciones de la región de Arica y Parinacota y las 4 estaciones de la región de Tarapacá que fueron utilizadas para el análisis. Fuente: elaboración propia.

EVAPORACIÓN Y TEMPERATURA MEDIA MENSUAL

Los registros de la evaporación potencial media mensual en la región se presentan en la Tabla 7.14. Posteriormente, con mayor detalle se analizó cada estación con relación al gradiente de temperatura (Figura 7.22). Allí se observa la variación temporal de la evaporación durante los meses del año, además de encontrar diferencias en cuanto a la ubicación espacial de la estación.

En las estaciones de las cuencas altiplánicas (Chungara Ajata, Caquena y Parinacota Ex Endesa) y en la estación Putre, este parámetro presenta un comportamiento muy similar durante el año, no se registran diferencias significativas, a pesar de que los meses con mayor evaporación son los meses de octubre, noviembre y diciembre. Se considera que el factor moderador del gradiente térmico es orográfico dado por la cordillera de los Andes.

Por otro lado, las estaciones de las cuencas del valle y costeras (Azapa, Aeródromo El Buitre y Codpa) registran cambios de mayor importancia en la evaporación media mensual. La evaporación más alta ocurre en los meses de octubre, noviembre, diciembre, enero, febrero y marzo, periodo que coincide con la temporada de verano y otoño. El comportamiento del gradiente térmico y la evaporación obedece al mismo patrón, a menor temperatura menor es la evaporación y se presenta en los meses de junio y julio. A diferencia de las cuencas altiplánicas, el factor moderador en estas cuencas está dado por el océano y con ello las corrientes de Humboldt.

Tabla 7.14 Evaporación media mensual del tanque tipo A en algunas cuencas de la Región. Fuente: elaboración propia.

Estación	EVAPORACIÓN MEDIA MENSUAL [mm]												Evap. Prom. [mm/d]
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	
Putre	145	129	151	169	157	150	153	170	179	201	190	170	5,5
Azapa	293	257	255	202	181	154	153	166	186	224	238	263	7,1
Aeródromo El Buitre	264	243	243	196	167	130	129	139	158	192	213	248	6,5
Codpa	169	140	147	122	109	94	104	127	150	177	180	182	4,7
Chungara Ajata	85	86	105	124	120	106	103	115	136	154	156	140	4,0
Caquena	127	122	122	116	128	93	102	122	144	155	168	166	4,3
Parinacota Ex Endesa	134	128	132	142	125	121	119	136	147	172	162	154	4,6
Cotacotani	129	117	129	158	161	147	153	166	183	214	213	184	5,4
Coyacagua *	197	175	194	185	153	127	134	155	188	228	241	241	6,2
Pampa Lirima Lagunilla *	182	161	187	159	141	103	105	136	168	218	224	221	5,6
Huara En Fuerte Baquedano *	229	287	310	297	261	251	249	228	250	290	311	253	8,9
Cerro Colorado *	211	181	189	196	212	207	212	234	252	270	272	263	7,0

* Estación ubicada en la I Región de Tarapacá considerada en el análisis, datos tomados de DICTUC (2008)

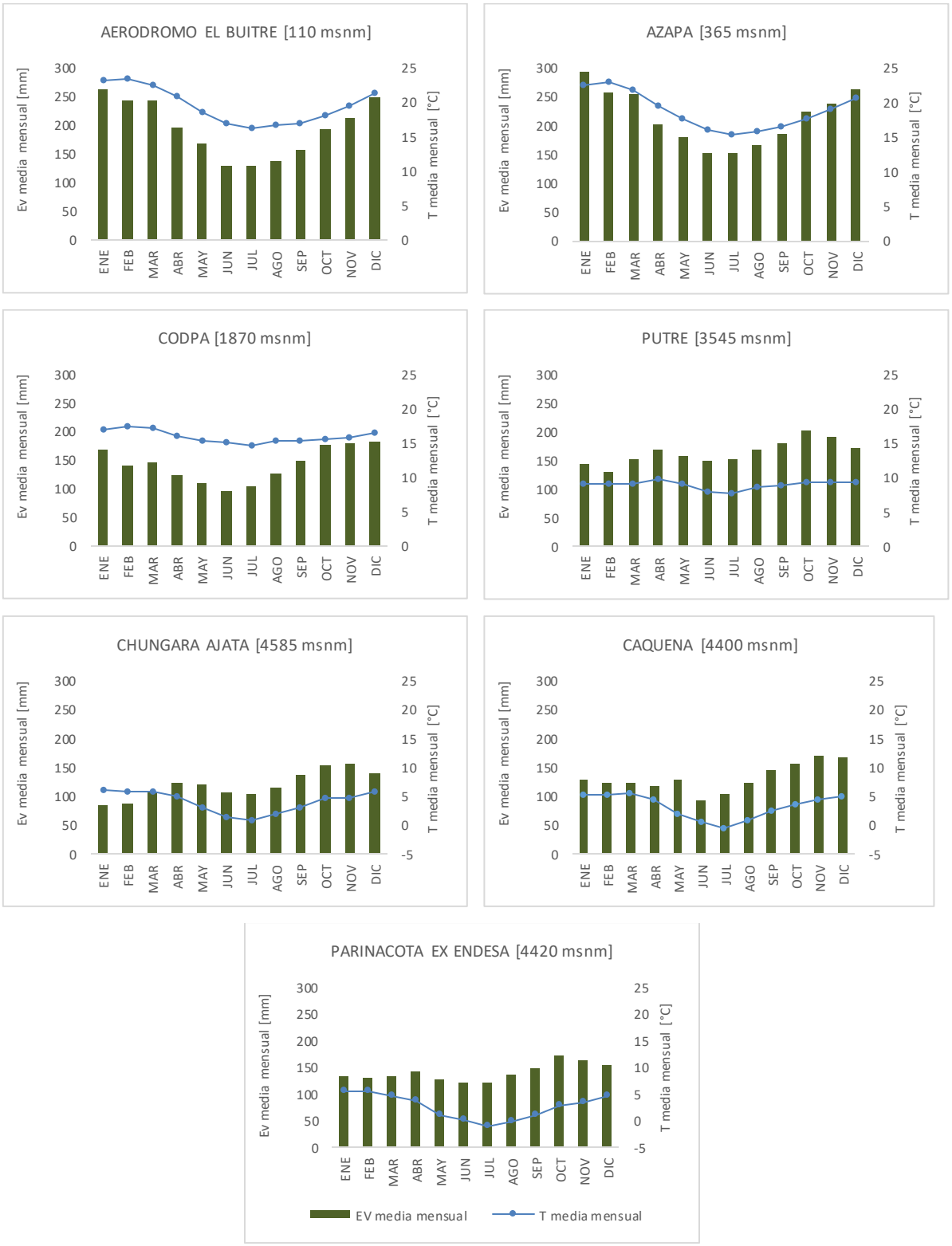


Figura 7.22 Variación de la evaporación media mensual en estaciones meteorológicas de la Región. Fuente: elaboración propia.

Con relación a la variación de la temperatura a nivel mensual, en la Tabla 7.15 se presentan los registros de las estaciones existentes. Gráficamente (Figura 7.23) se observa con mayor claridad la tendencia. En los meses de junio, julio y agosto las temperaturas alcanzan valores mínimos (<0 °C en altitud ≥ 4.000 msnm) durante el año, y durante los meses de diciembre, enero y febrero se alcanzan los valores máximos (23,2 °C en altitud ≤ 500 msnm). Sin embargo, llama la atención el comportamiento de la temperatura en las estaciones Putre y Codpa, donde la magnitud de la temperatura es muy uniforme durante los meses del año, y ocurren pequeñas variaciones.

Tabla 7.15 Temperatura media mensual absoluta registrada en estaciones meteorológicas de la Región. Fuente: elaboración propia.

Estación Meteoro-lógica	Altitud [msnm]	TEMPERATURA MEDIA MENSUAL [°C]												T media [°C]
		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	
Putre	3.545	9,1	9,1	9,2	9,7	9,0	8,0	7,7	8,5	8,9	9,2	9,3	9,3	9
Azapa	365	22,5	22,8	21,8	19,6	17,6	16,0	15,3	15,7	16,6	17,7	19,0	20,6	19
Aeródromo el Buitre	110	23,2	23,4	22,5	20,8	18,6	17,0	16,2	16,6	16,9	18,1	19,6	21,2	20
Codpa	1.870	17,0	17,4	17,1	16,1	15,3	15,0	14,6	15,3	15,4	15,6	15,7	16,4	16
Caquena	4.400	5,2	5,1	5,5	4,4	2,0	0,4	-0,6	0,8	2,5	3,5	4,3	4,9	3
Chungara Ajata	4.585	5,9	5,8	5,6	4,9	3,0	1,4	0,9	1,8	3,1	4,6	4,7	5,7	4
Parinacota Ex Endesa	4.420	5,4	5,3	4,5	3,5	1,0	0,1	-1,2	-0,3	0,8	2,7	3,3	4,4	2
Chilcaya	4.270	6,6	6,3	5,9	2,8	0,8	-0,7	-1,3	-0,9	0,8	2,2	3,8	5,9	3

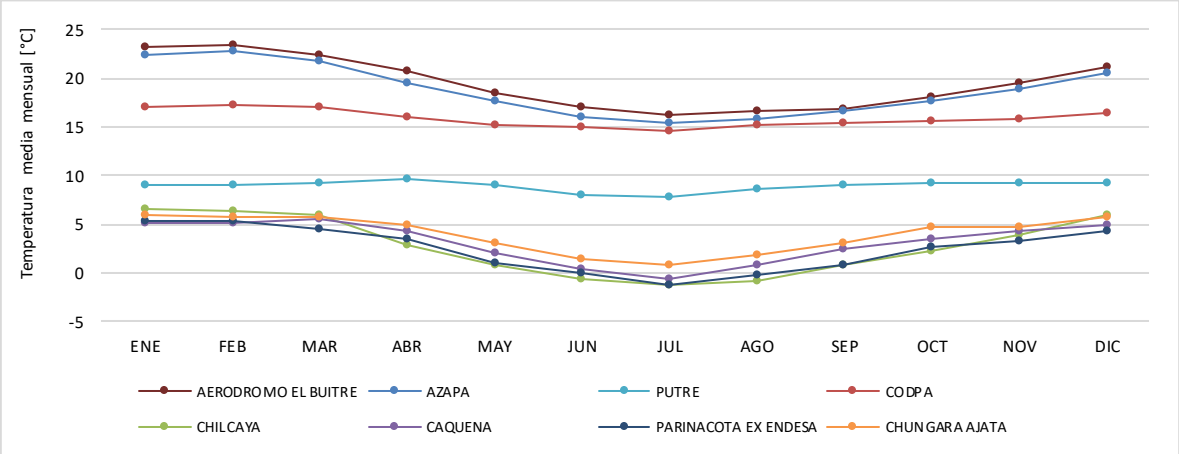


Figura 7.23 Temperatura media mensual absoluta reportada en las estaciones meteorológicas. Fuente: elaboración propia.

EVAPOTRANSPIRACIÓN MEDIA ANUAL

Entre las fórmulas empíricas que usualmente se utilizan en Chile, se destacan las de Turc, Coutagne y Blaney-Criddle. Los dos primeros métodos permiten determinar la evapotranspiración real de un área y el último la evapotranspiración potencial. Debido a la disponibilidad de información y a la aplicabilidad de dichos métodos se ha optado por utilizar el método de Turc, ya que el método de Blaney-Criddle requiere información de porcentajes de horas de luz, mientras que el método de Coutagne funciona sólo dentro de ciertos rangos. Por lo tanto, y con el ánimo de estimar la evapotranspiración a nivel regional se utilizó el método de Turc, que se define con la siguiente fórmula:

$$ETP\ [mm/\text{año}] = \frac{P}{\sqrt{(0{,}9 + P^2/L^2)}}$$

$$L = 300 + 25 * T + 0{,}05 * T^2$$

Donde;

P es la precipitación en mm/año,

T es la temperatura media anual °C

Para aplicar el método se debe cumplir que $\frac{P^2}{L^2} \geq 1$, en caso contrario se considera que $ETP = P$.

Dado que es mayor la cantidad de estaciones meteorológicas que cuentan con registros pluviométricos que las que cuentan con información de temperatura media, esta variable fue estimada en algunas estaciones a partir de la relación de la temperatura con la altitud, la que fue anteriormente determinada para la Región. En la Tabla 7.16 se presentan las estaciones utilizadas en este análisis y su respectiva estimación de evapotranspiración media anual a nivel regional.

Tabla 7.16 Estaciones consideradas y valor estimado de la evapotranspiración en la Región. Fuente: elaboración propia.

Est. Meteorológica DGA	Altitud [msnm]	Pp	T	Precipitación media anual [mm/año]	Temperatura media anual [°C]	ETP [mm/año] estimación método Turc
Villa Industrial (Tacora)	4.080	x		294,8	5,2 *	252,1
Humapalca	3.980	x		333,0	5,8 *	275,9
Alcérreca	3.990	x		218,3	5,7 *	204,4
Putre	3.545	x	x	190,2	8,9	187,4
Central Chapiquiña	3.350	x		152,6	9,5 *	154,2
Belén -Dcp	3.240	x		165,4	10,1 *	166,4
Tignamar	3.230	x		139,8	10,2 *	142,6
Azapa	365	x	x	0,8	18,8	0,9
Aeródromo El Buitre	110	x	x	0,8	19,5	0,8
Arica Oficina	20	x		1,1	19,6 *	1,2
Codpa	1.870	x	x	9,4	15,9	9,9
Esquiña	2.170	x		45,9	15,3 *	48,3
Río Camarones en Chilpe	1.565	x		9,1	16,5 *	9,6
Visviri	4.080	x		269,4	5,2 *	237,2
Caquena	4.400	x	x	432,4	3,2	292,1
Chungara Ajata	4.585	x	x	364,7	4,0	277,5
Chungara Retén	4.570	x		298,9	2,3 *	236,5
Cotacotani	4.550	x		423,0	2,4 *	280,5
Parinacota Ex Endesa	4.420	x	x	349,8	2,5	258,6
Guallatire	4.240	x		236,4	4,2 *	212,5
Chucuyo Retén	4.400	x		353,1	3,3 *	267,0
Chilcaya	4.270	x	x	259,6	2,7	219,6

* Temperatura estimada a partir de la relación entre la Temperatura y la altitud en la región.

De acuerdo a la estimación de la evapotranspiración media anual en la Región de Arica y Parinacota, se observa que en la mayor parte del territorio (Tabla 7.17), el valor de la evapotranspiración equivale cerca del 100% de la precipitación, exceptuando la estimación en las estaciones Caquena y Cotacotani ubicadas a 4.400 msnm y 4.550 msnm, respectivamente, en donde la evapotranspiración potencial equivale al 88% de la precipitación media anual reportada.

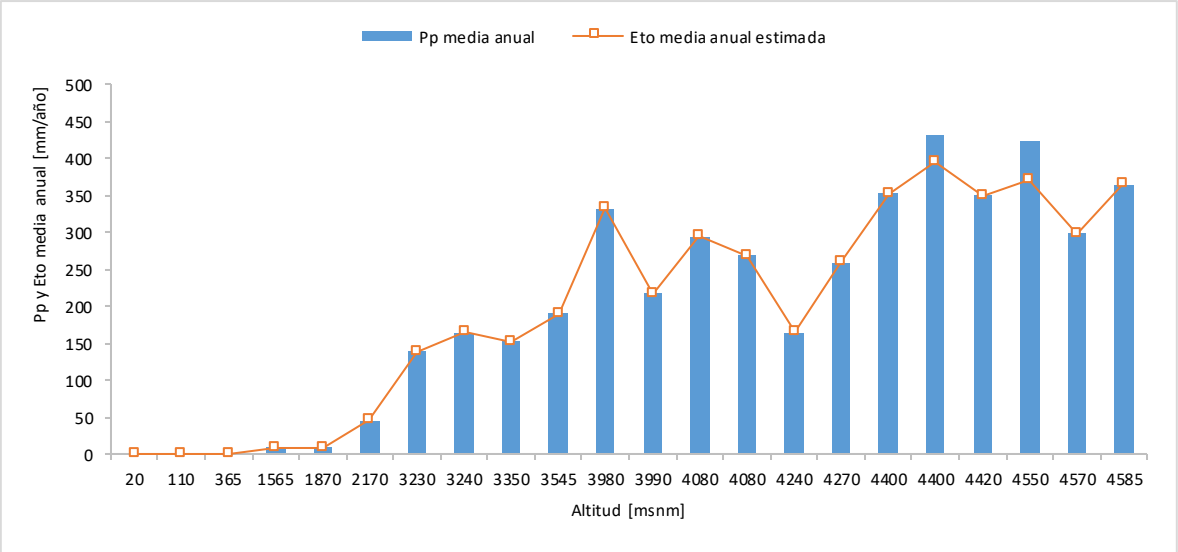


Figura 7.24 Relación Precipitación media anual y Evapotranspiración media anual estimada. Fuente: elaboración propia.

7.1.4.3.3 Fluviometría

TRATAMIENTO Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

Para el análisis de caudales de la región se utilizó la información de las 22 estaciones fluviométricas que pertenecen a la DGA (sombreadas en la Tabla 7.4 del capítulo "Estaciones de monitoreo"). Cada estación dispone de una serie temporal diferente, desde un mínimo de 7 años hasta un máximo de 60 años, además de presentar registros con datos mensuales faltantes. La disponibilidad de datos se muestra en la Tabla 7.17 siguiente:

Tabla 7.17 Disponibilidad de información en las estaciones fluviométricas. Fuente: elaboración propia.

No	Nombre Estación	Código BNA	Periodo	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
1	Río Caracarani en Humapalca	01201005-2	1956-2014	12	11	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	10	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	7	7	11
2	Río Colpitas en Alcérreca	01201001-K	1956-2014	11	12	11	12	12	11	11	5	7	10	12	12	10	11	10	10	6	11	12	12	10	12	12	10	12	12	10	7	3	12
3	Río Lluta en Alcérreca	01201003-6	1956-2014	8	12	11	12	12	12	10	8	9	12	12	12	11	12	10	10	3	0	0	9	2	12	8	12	12	12	9	12	10	9
4	Río Lluta en Chapisca	01210003-5	1987-1995			4	12	9	12	8	7	1	6	12																			
5	Río Lluta en Tocontasi	01210001-9	1960-2013	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	2	11	12	12	8	1	1	4	5	7	1	0
6	Río Lluta en Panamericana	01211001-4	1960-2014	10	7	8	1	12	9	11	8	11	8	9	5	12	12	5	11	11	9	9	8	11	11	11	11	11	12	7	5	5	5
7	Río Laco en Cosapilla	01300002-6	1991-2014	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	9	12	2	6	7	8	9	9	12	5	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	Río Tignamar en Tignamar	01300001-8	1992-2005	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	9	12	2	6	7	8	9	9	12	6	10									
9	Río Tignamar en Angostura	01300009-3	2006-2014																						9	8	12	9	7	7	6	6	11
10	Río San José en Ausipar	01310002-0	1969-2014	0	0	0	0	0	10	12	10	6	11	12	12	11	10	12	12	11	11	12	12	12	12	12	12	12	12	3	8	3	11
11	Acueducto Azapa en bocatoma	01310004-7	1970-2014	8	12	10	12	11	12	12	7	12	12	12	12	11	12	7	10	8	8	10	12	12	9	12	12	7	10	12	7	12	10
12	Río Codpa en Cala-Cala	01410004-0	1994-2014	9	12	12	12	11	12	12	12	4	5	12	12	4	5	6	12	9	10	12	5	12	10	12	11	4	9	7	8	11	12
13	Río Camarones en Chilpe	01502008-3	2005-2014																					1	12	12	7	6	9	10	2	2	2
14	Río Camarones en Conanoxa	01502002-4	1968-2014	12	12	11	12	12	12	11	8	11	10	11	12	12	2	0	0	0	0	1	11	11	7	12	12	8	8	9	10	7	11
15	Río Caquena en Vertedero	01001002-0	1970-2014	9	12	12	12	12	12	11	6	7	11	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	10	9	10	12
16	Río Colpacagua en Desembocadura	01001003-9	1985-2014	0	0	0	7	12	12	1	0	2	11	12	11	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	6	4
17	Río Caquena en Nacimiento	01001001-2	1997-2004	0	1	10	7	12	12	12	8	12	12	12	12	10	12	12	12	12	12	11	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	Río Desaguadero Cotacotani	01020002-4	1961-2014	11	12	11	12	10	11	10	8	7	11	11	9	12	12	12	11	12	6	8	12	10	12	12	12	12	10	8	4	9	11
19	Río Lauca en Estancia El Lago	01020003-2	1967-2014	12	12	12	12	11	12	12	12	10	12	12	12	12	12	11	12	12	12	12	12	12	12	12	12	10	10	12	12	12	12
20	Canal Lauca en sifón n.1 (km^3.3)	01020004-0	1959-2014	12	12	12	12	12	12	12	11	12	11	12	12	12	12	12	12	12	11	12	12	11	12	12	12	12	12	10	10	11	12
21	Río Guallatire en Guallatire	01021002-K	1968-2014	11	12	11	12	12	12	10	6	9	11	12	12	12	12	12	10	11	11	12	12	11	12	12	12	10	12	12	7	12	12
22	Río Lauca en Japu	01021001-1	1969-2014	9	8	12	9	7	12	9	9	9	12	11	12	12	12	12	12	6	12	12	9	12	10	11	11	12	12	11	0	0	0

De 10 a 12 meses De 6 a 9 meses De 0 a 5 meses

Se realizó un tratamiento previo al análisis de la información fluviométrica a nivel mensual, con la finalidad de homogeneizar los datos, comparando las series de caudales de igual periodo entre estaciones ubicadas sobre el mismo cauce, para ello se graficaron curvas doble masa con el caudal anual acumulado y se analizaron los estadísticos respectivos para su correlación. Estos análisis se presentan en el Anexo VI.

Debido a que en algunas cuencas, existen pocas estaciones fluviométricas y no se dispone de información mínima para realizar las correlaciones apropiadas, se decidió no extender ni rellenar dichas series de caudales medios mensuales. Sin embargo, fue posible en su mayoría comparar la respuesta de los cauces a la precipitación, según los registros de las estaciones pluviométricas.

El periodo seleccionado fue desde el año 1985 al 2014, es decir, 30 años. El criterio para seleccionar este periodo se basa en la existencia de años en común de las diferentes estaciones y que este periodo es representativo de los caudales medios históricos en la Región.

RELLENO DE DATOS Y ANÁLISIS DE CONSISTENCIA

Los registros se sometieron a un riguroso análisis estadístico de caudales medios mensuales, de modo de generar las estadísticas rellenadas y corregidas en las estaciones fluviométricas de las cuencas en estudio que contarán con un registro histórico superior a los 5 años y con mínimo 7 meses de información completa por año.

En primera instancia se conformaron grupos de estaciones en cada cuenca, según su localización (aguas arriba o aguas abajo) de un respectivo cauce, teniendo en consideración la red de drenaje y localización espacial. Seguidamente se detectaron puntos anómalos, definidos como puntos que aparecían subestimados o sobreestimados entre estaciones correlacionadas entre sí. Se conformaron estadísticas depuradas de las estaciones y mediante la construcción de las curvas dobles acumuladas se analizó la consistencia y correlación entre las estaciones rellenadas.

Otros métodos utilizados para completar la serie de caudal mensual de las estaciones que no tenían correlación con ninguna otra estación, fue el cálculo de la media móvil, en el caso de contar con dato disponible antes y después de un mes faltante, y el cálculo del valor medio mensual del periodo existente en cada estación.

A continuación se presentan las estaciones fluviométricas correlacionadas por grupos en cada cuenca de la región en estudio.

CUENCA DEL RÍO LLUTA

- Grupo 1: Est. Río Caracarani en Humapalca y Est. Río Colpitas en Alcérreca
- Grupo 2: Est. Río Caracarani en Humapalca, Est. Río Colpitas en Alcérreca y Est. Río Lluta en Alcérreca.
- Grupo 3: Est. Río Lluta en Panamericana se completó algunos años de acuerdo a la media móvil y media mensual.
- Grupo 4: Est. Río Lluta en Tocontasi, se completó algunos años de acuerdo a la media móvil y media mensual.

Los registros de caudales a su vez se correlacionaron con las precipitaciones de los mismos periodos, escogiendo como estaciones pluviométricas de influencia Villa Industrial y Putre ubicadas a 4.080 msnm y 3.560 msnm, respectivamente.

CUENCA DEL RÍO SAN JOSÉ

- Grupo 1: Est. Río Tignamar en Tignamar y Est. Río Tignamar en Angostura fueron comparadas con la Est. Pluviométrica Tignamar ubicada a 3.230 msnm y se completaron algunos años de acuerdo a la media móvil y media mensual.
- Grupo 2: Est. Río San José en Ausipar se completó algunos años de acuerdo a la media móvil y media mensual.

En términos generales, no fue posible establecer relación entre las estaciones fluviométricas de la cuenca, lo que podría deberse a extracciones o aportes intermedios no contralados, no cuantificados y que afectan significativamente los caudales reportados en el registro.

Por otra parte, es importante tener presente que en general, la precipitación es sectorizada, es decir, en algunos puntos de la cuenca precipita y en otros no. Esta distribución espacial puede generar que los aportes intermedios tomen relevancia en relación al caudal generado aguas abajo de la estación.

Para complementar el análisis, se comparó el registro de caudales con las precipitaciones de estaciones Central Chapiquiña y Tignamar, ubicadas aguas arriba,

que pudieran explicar los comportamientos de los caudales reportados en los ríos principales de la cuenca.

CUENCA DE LA QUEBRADA CHACA VÍTOR

- Grupo 1: Est. Río Codpa en Cala-Cala se completaron algunos años de acuerdo a la media móvil y media mensual y se comparó con el registro de precipitaciones de la Est. Codpa ubicada a 1.870 msnm.

Cabe mencionar que en la cuenca sólo existe una estación de control fluviométrico, y es la estación Río Codpa en Cala-Cala, por lo tanto no es comparable el registro de caudales.

CUENCA DEL RÍO CAMARONES

- Grupo 1: Est. Río Camarones en Chilpe y Est. Río Camarones en Conanoxa, se completaron algunos años de acuerdo a la media móvil y media.

Las estaciones existentes no cuentan con registros comunes de información que sean comparables, por lo tanto los análisis fueron por separado, aun considerando las precipitaciones de la estación pluviométrica Esquiña ubicada a 2.170 msnm.

CUENCA DE LOS RÍOS UCHUSUMA Y CAQUENA

- Grupo 1: Est. Río Caquena en Vertedero y Est. Río Caquena en Nacimiento
- Grupo 2: Est. Río Colpacagua en Desembocadura se completó algunos años de acuerdo a la media móvil

Los registros de caudales a su vez se relacionaron con las precipitaciones en periodos iguales, escogiendo como estaciones pluviométricas de influencia Caquena ubicada a 4.400 msnm.

CUENCA DEL LAGO CHUNGARA

En la cuenca sólo existe una estación de control fluviométrico, correspondiente a la estación Río Chungara en desembocadura, la que fue suspendida en el año 1997 y que cuenta con registro histórico de caudales de 3 años, lo cual es muy poca información para el análisis.

CUENCA DEL RÍO LAUCA

- Grupo 1: Est. Río Lauca en estancia El Lago y Est. Río Lauca en Japu.
- Grupo 2: Est. Río Guallatire en Guallatire Cotacotani se completó algunos años de acuerdo a la media móvil.
- Grupo 3: Est. Río Desaguadero Cotacotani se completó algunos años de acuerdo a la media móvil y media mensual, además de comparar con el registro de precipitaciones de la Estación Cotacotani ubicada a 4.550 msnm.

Los registros de caudales a su vez se relacionaron con las precipitaciones registradas en la estación pluviométrica Parinacota ex Endesa ubicada a 4.420 msnm.

CAUDAL MEDIO ANUAL

En la Región de Arica y Parinacota se presentan distintos regímenes de escorrentía en las cuencas, entre ellos de régimen nival, régimen pluvial y régimen mixto.

En la Tabla 7.18 se muestran los caudales: medio anual, mínimo anual y máximo anual, además del factor de rendimiento del caudal medio en relación a la cuenca aportante, para el periodo de tiempo evaluado (1985-2014) o según el registro histórico de cada estación fluviométrica. Se observa que el caudal medio anual más bajo ($\leq 0{,}1$ m^3/s) lo reportan las estaciones ubicadas sobre el río Tignamar (cuenca del río San José) y sobre el río Codpa en Cala-Cala (cuenca de la quebrada Chaca Vítor). Por el contrario, el caudal medio anual más alto ($\geq 2{,}5$ m^3/s) lo reportan las estaciones ubicadas sobre el río Lluta en Tocontasi y el río Lauca en Japu.

De acuerdo a lo observado, no es factible relacionar los escurrimientos con la localización geográfica en la región, ya que los cauces de cada cuenca presentan un comportamiento distinto, por su recorrido, red de drenaje (afluentes), captaciones y demás intervenciones específicas que ocurren aguas arriba de la estación de control fluviométrico. Sin embargo, al comparar el factor de rendimiento con los valores presentados en el balance hidrológico de Chile (DGA, 1987), se observa (Figura 7.25) que las diferencias encontradas son mínimas, aun tratándose de distintos periodos evaluados. La gran diferencia en los valores de la estación Guallatire en Guallatire (cuenca del río Lauca), se atribuye a las diferencias en el área de la cuenca aportante, en el estudio DGA (1987) se cita un área de 150 km^2 y al calcularla en el presente

estudio el área fue de 49 km^2. Se desconoce si hubo error en la edición del valor o si el método utilizado para el cálculo no fue el adecuado.

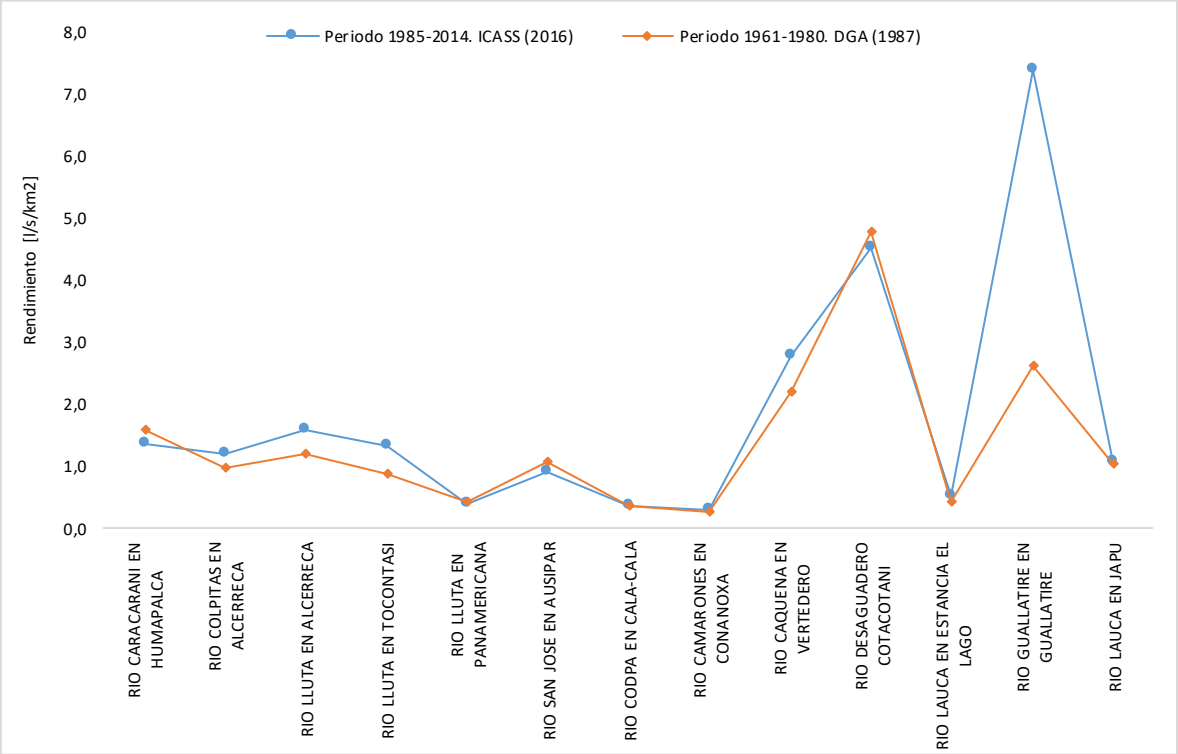


Figura 7.25 Comparación de los rendimientos de las cuencas aportantes a las estaciones fluviométricas obtenidos para el periodos actual evaluado y en el Balance hidrológico de Chile, DGA (1987). Fuente: elaboración propia.

Otro análisis del factor de rendimiento obtenido de las subcuencas está relacionado al área de drenaje y a la ubicación de la estación fluviométrica. Los factores de rendimiento más altos se registran en cuencas menor a 50 km^2 y con altitud mayor a los 3.000 msnm.

Cabe mencionar que analizar caudales a nivel anual es muy general y podría no representar adecuadamente la temporalidad de los escurrimientos en la región, dado que los cauces responden a crecidas puntuales, tanto por influencia del invierno altiplánico, como por el deshielo y por eventos extremos que ocurren cada cierto periodo en años.

Tabla 7.18 Síntesis de las series de caudales anuales para el año hidrológico en las estaciones seleccionadas. Fuente: elaboración propia.

CUENCA	Estación Fluviométrica	Altura [msnm]	Periodo		CAUDAL ANUAL [m^3/s]				Rendimiento [$l/s/km^2$]
			1985-2014	otro [años]	Min	Max	Prom.	Desv. Est.	
Río Lluta	Río Caracarani en Humapalca	3.908	x		0,22	0,67	0,35	0,09	1,14
	Río Colpitas en Alcérreca	3.251	x		0,35	0,69	0,52	0,10	1,20
	Río Lluta en Alcérreca	3.550		25	1,18	3,12	1,97	0,54	1,45
	Río Lluta En Tocontasi	1.850		5	2,08	5,01	3,24	1,25	1,31
	Río Lluta En Panamericana	10		25	0,34	2,80	1,27	0,69	0,40
Río San José	Río Laco En Cosapilla	3.000		19	0,47	0,73	0,58	0,08	15,2
	Río Tignamar En Tignamar	3.800		8	0,01	0,11	0,05	0,03	0,15
	Río San José En Ausipar	1.300		22	0,45	5,23	1,12	0,96	0,90
	Acueducto Azapa En Bocatoma	960	x		0,36	0,79	0,59	0,12	-
Quebrada Chaca Vítor	Río Codpa En Cala-Cala	1.745		23	0,01	0,27	0,13	0,07	0,33
Río Camarones	Río Camarones En Chilpe	1.565		5	0,51	1,63	1,12	0,46	1,01
	Río Camarones En Conanoxa	710		24	0,09	1,57	0,56	0,36	0,28
Ríos Uchusuma y Caquena	Río Caquena En Vertedero	4.400	x		0,72	2,07	1,22	0,32	2,70
	Río Colpacagua En Desembocadura	4.400		21	0,07	0,55	0,23	0,13	0,96
	Río Caquena En Nacimiento	4.385		17	0,37	0,51	0,45	0,04	9,23
Río Lauca	Río Desaguadero Cotacotani	4.500	x		0,22	0,83	0,41	0,16	4,52
	Río Lauca En Estancia El Lago	4.370	x		0,01	0,89	0,15	0,18	0,52
	Canal Lauca En Sifón N.1 (Km3.3)	4.384	x		0,50	1,20	0,77	0,18	-
	Río Guallatire En Guallatire	4.280	x		0,29	0,41	0,36	0,04	7,39
	Río Lauca En Japu	3.907		26	1,52	4,17	2,54	0,64	1,05

CAUDAL MEDIO MENSUAL

De acuerdo al análisis de las series de caudales, en la región se presenta una variación temporal mensual de los escurrimientos muy marcada. Durante los meses de enero, febrero y marzo se registran los caudales medios más altos del año hidrológico o en otras palabras, los caudales que superan la media anual. Presentándose caudales del orden de los 5,5 m^3/s a 10,3 m^3/s en las estaciones río Lauca en Japu y río Lluta en Tocontasi, respectivamente. En la Tabla 7.19 se presenta con mayor detalle los valores de los caudales medios mensuales de cada estación.

Tabla 7.19 Caudal medio mensual en las estaciones fluviométricas de la Región. Fuente: elaboración propia.

ESTACIÓN	ID	CAUDAL MEDIO MENSUAL [m^3/s]												
		OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	PROM
Río Caracarani en Humapalca	1	0,20	0,20	0,25	0,49	0,68	0,47	0,31	0,30	0,32	0,41	0,33	0,24	0,35
Río Colpitas en Alcérreca	2	0,39	0,40	0,42	0,70	0,92	0,74	0,47	0,44	0,46	0,46	0,44	0,41	0,52
Río Lluta en Alcérreca	3	1,08	1,04	1,26	3,47	4,89	3,22	1,76	1,40	1,46	1,46	1,38	1,21	1,97
Río Lluta en Tocontasi	4	1,78	1,35	1,70	3,75	10,3	8,88	1,87	1,73	1,86	1,87	1,84	2,00	3,24
Río Lluta en Panamericana	5	0,17	0,14	0,38	2,79	4,23	3,18	1,15	0,72	0,81	0,84	0,56	0,23	1,27
Río Laco en Cosapilla	6	0,54	0,58	0,62	0,68	0,68	0,61	0,55	0,55	0,55	0,53	0,52	0,53	0,58
Río Tignamar en Tignamar	7	0,04	0,03	0,03	0,07	0,07	0,06	0,05	0,05	0,05	0,10	0,07	0,05	0,05
Río San José en Ausipar	8	0,77	0,77	0,78	1,10	2,25	2,08	1,00	0,98	1,15	0,95	0,88	0,79	1,12
Acueducto Azapa en Bocatoma	9	0,58	0,61	0,59	0,56	0,48	0,56	0,60	0,66	0,64	0,63	0,61	0,59	0,59
Río Codpa en Cala-Cala	10	0,02	0,02	0,04	0,31	0,38	0,32	0,10	0,07	0,07	0,09	0,04	0,03	0,13
Río Camarones en Chilpe	11	1,02	1,10	1,06	1,94	1,92	1,58	0,92	0,84	0,74	0,84	0,76	0,74	1,12
Río Camarones en Conanoxa	12	0,25	0,24	0,33	0,91	1,12	1,30	0,47	0,49	0,52	0,47	0,36	0,27	0,56
Río Caquena En Vertedero	13	0,58	0,58	1,02	2,00	2,23	1,93	1,13	0,96	1,10	1,17	1,09	0,85	1,22
Río Colpacagua En Desembocadura	14	0,07	0,08	0,12	0,32	0,64	0,55	0,25	0,16	0,18	0,18	0,13	0,09	0,23
Río Caquena en Nacimiento	15	0,41	0,42	0,44	0,54	0,52	0,50	0,44	0,42	0,43	0,45	0,45	0,42	0,45
Río Desaguadero Cotacotani	16	0,57	0,65	0,59	0,36	0,30	0,27	0,36	0,38	0,33	0,28	0,32	0,47	0,41
Río Lauca en Estancia El Lago	17	0,07	0,02	0,07	0,23	0,50	0,43	0,15	0,04	0,07	0,10	0,07	0,08	0,15
Canal Lauca en Sifón N.1 (Km 3.3)	18	0,73	0,77	0,80	0,90	0,87	0,85	0,76	0,72	0,72	0,71	0,68	0,71	0,77
Río Guallatire en Guallatire	19	0,35	0,35	0,34	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,38	0,39	0,38	0,36	0,36
Río Lauca en Japu	20	1,55	1,55	1,69	3,50	5,55	4,68	2,61	1,90	1,88	1,98	1,87	1,68	2,54

Las estaciones fluviométricas ubicadas sobre las cuencas del río Lauca y del río Lluta son las que reportan los caudales medios mensuales de mayor magnitud. En la Figura 7.26 se muestra la variación de los caudales medios mensuales por cuenca. En la estación río Codpa en Cala-Cala, el caudal medio mensual no varía significativamente, mantiene cierta regularidad durante los meses del año.

En los meses de junio y julio se observa un pequeño incremento del caudal medio, en especial en las estaciones de control fluviométrico ubicadas en las cuencas del río Lluta, del río San José, del río Caquena y del río Lauca.

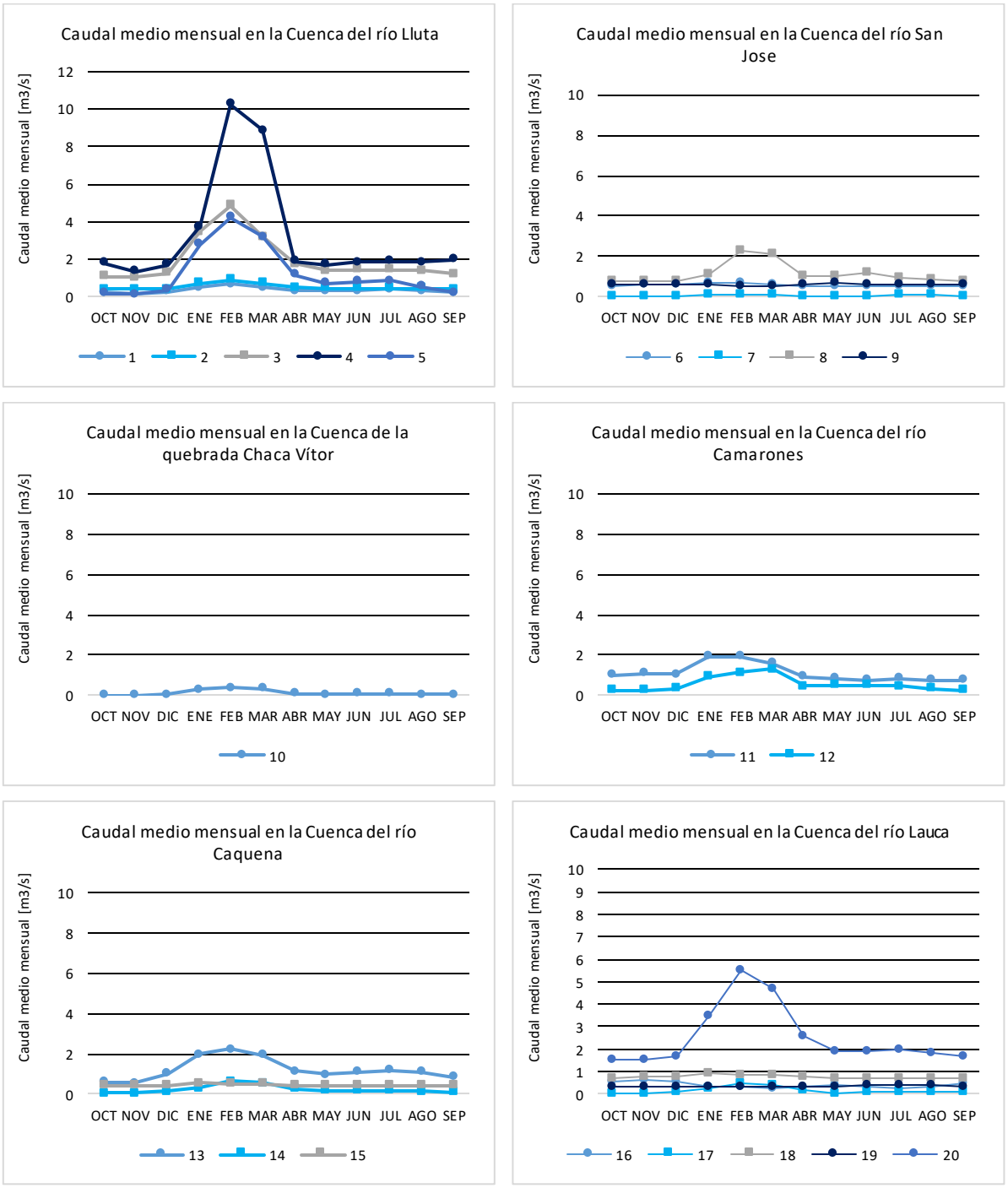


Figura 7.26 Caudal medio mensual reportado en las estaciones fluviométricas ubicadas en las cuencas de la Región: a) Cuenca del río Lluta, b) Cuenca del río San José, c) Cuenca de la quebrada Chaca Vítor, d) Cuenca del río Camarones, e) Cuenca de los ríos Uchusuma y Caquena, y f) Cuenca del río Lauca. Fuente: elaboración propia.

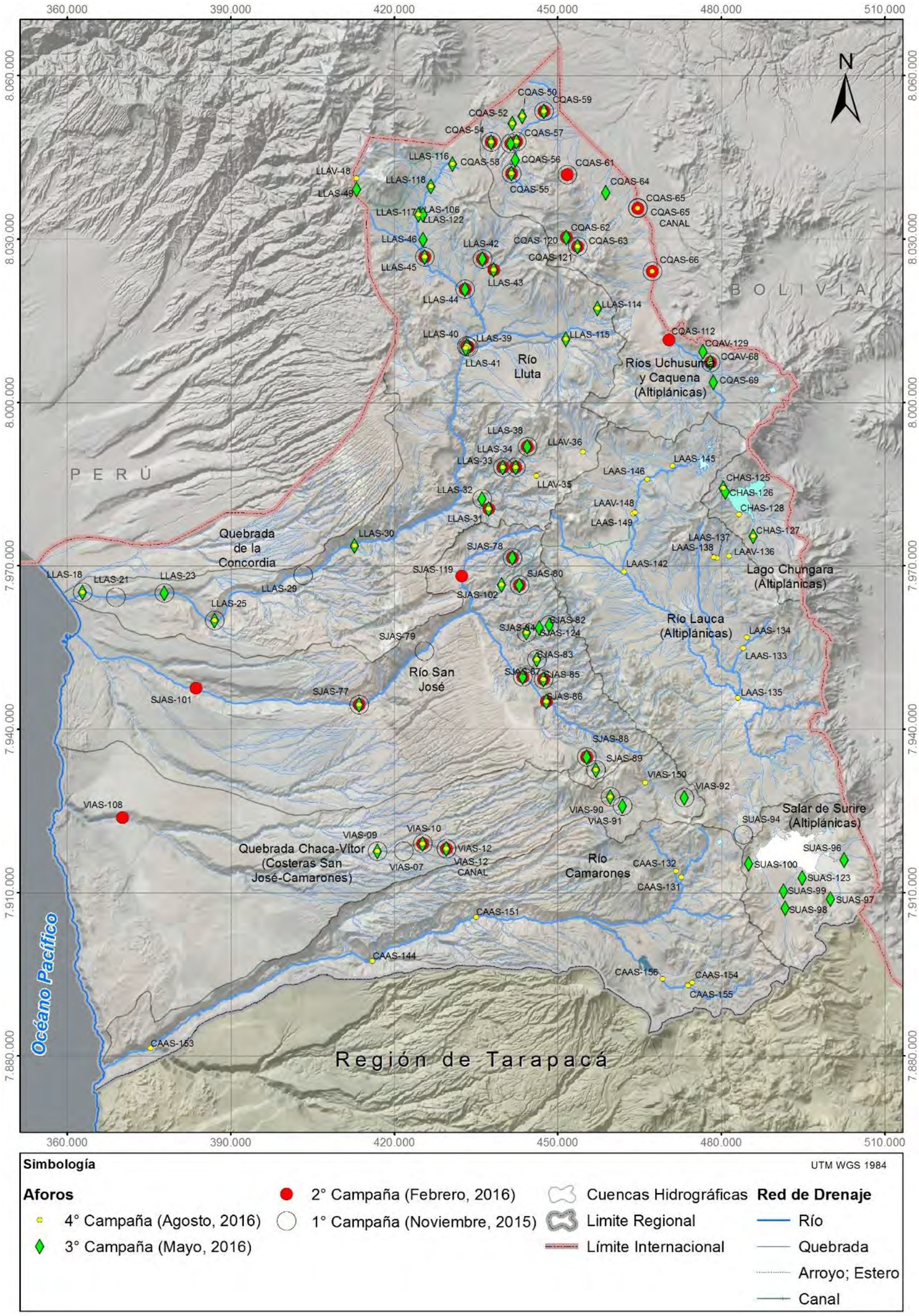


Figura 7.27 Ubicación de los aforos realizados en las diferentes campañas en el presente estudio.
Fuente: elaboración propia.

7.1.5 Hidroquímica

En este estudio se desarrolla la caracterización de los parámetros fisicoquímicos, de la constitución hidroquímica así como del fraccionamiento isotópico de oxígeno y deuterio de las aguas superficiales y subterráneas de la región de Arica y Parinacota por cuencas. Para esto se revisó y analizó los antecedentes hidroquímicos e isotópicos realizados hasta la actualidad y se efectuaron 4 campañas de muestreo hidroquímico e isotópico. En la Figura 7.28 se muestra la ubicación de las muestras tomadas para el análisis hidroquímico y en la Figura 7.29 los puntos de muestreo para el análisis isotópico.

Cada campaña de muestreo consistió en la toma de 100 muestras para el análisis hidroquímico y 75 muestras para el análisis isotópico. Las campañas se efectuaron aproximadamente cada 3 meses a lo largo de un año y generalmente se muestrearon siempre los mismos puntos, con el objetivo de analizar si existe una variación espacial y/o estacional hidroquímica y/o isotópica en las diferentes cuencas. Los resultados de los laboratorios de los análisis hidroquímicos (conductividad eléctrica, pH, calcio, magnesio, potasio, sodio, sólidos totales disueltos, cianuro, nitratos, nitritos, sulfatos, alcalinidad, bromuros, cloruros, fluoruros, fosfatos, amoniaco, aluminio, arsénico, cadmio, cobre, cromo, litio, magnesio, mercurio, plomo, selenio, zinc, hierro, sílice y boro) e isotópicos ($\delta^{18}O$ y δD) se muestran en el Anexo VIII.

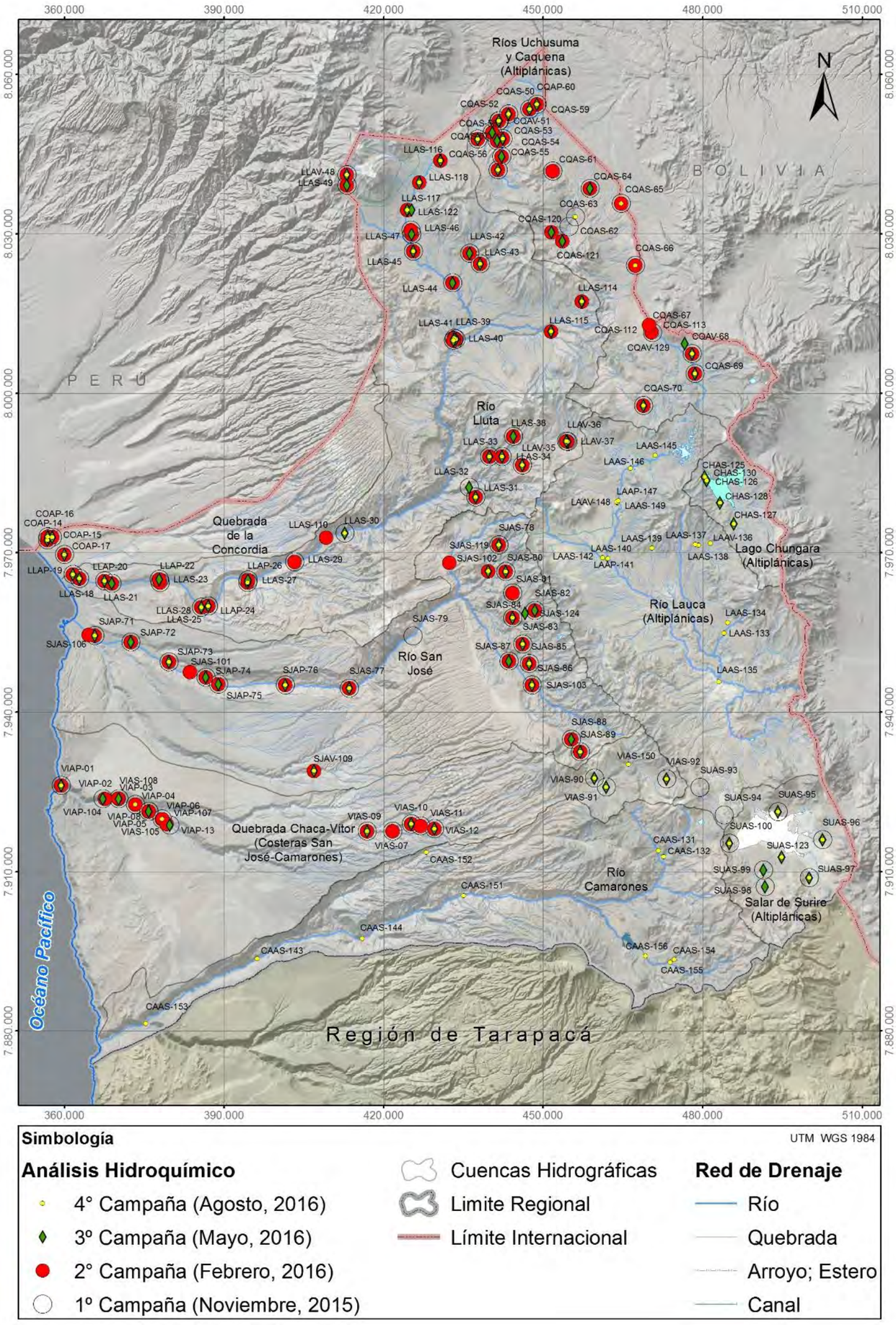


Figura 7.28 Ubicación de las muestras tomadas para el análisis hidroquímico en las diferentes campañas en el presente estudio. Fuente: elaboración propia.

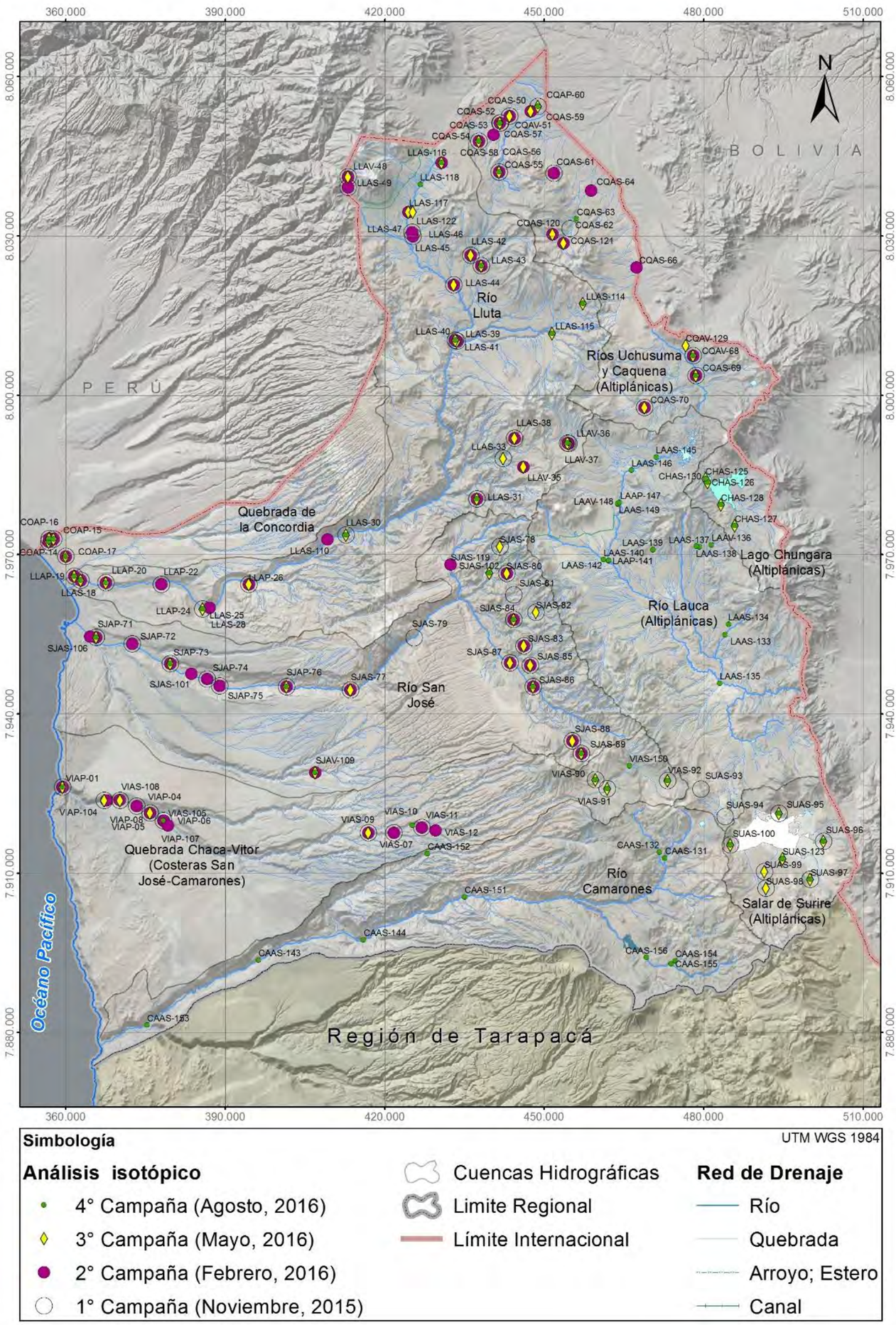


Figura 7.29 Ubicación de las muestras tomadas para el análisis isotópico en las diferentes campañas en el presente estudio. Fuente: elaboración propia.

PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS IN SITU

Se desarrolló la caracterización hidroquímica e isotópica de cada una de las cuencas que constituye la región de Arica y Parinacota. En primer lugar se analizó la variación espacial y temporal de los parámetros fisicoquímicos medidos *in situ* con la sonda multiparamétrica. En particular, se describe la temperatura, el pH, la conductividad eléctrica y los sólidos disueltos totales. Los sólidos disueltos totales (TDS) y la conductividad eléctrica están estrechamente relacionadas. Cuanto mayor sea la cantidad de sales disueltas en el agua, mayor será el valor de la conductividad eléctrica. Por lo tanto, los valores máximos y mínimos corresponden a las mismas muestras que tienen alto valor de conductividad eléctrica.

CONTROL DE CALIDAD

Los resultados de los análisis químicos del laboratorio fueron validados por el método del balance iónico, el cual se basa en el principio de electroneutralidad del agua. El balance iónico considera el contenido de aniones (HCO_3^-, CO_3^{-2}, SO_4^{-2}, Cl^-) y de cationes (Ca^{+2}, Mg^{+2}, Na^+, K^+). De este modo, se verificó que la suma de miliequivalentes de los aniones fuese igual a la suma de miliequivalentes de cationes considerando un error aceptable del 10% mediante la siguiente ecuación, Anexo VIII:

$$Error\ (\%) = 100 \cdot \frac{\Sigma\ Cationes - \Sigma\ Aniones}{\Sigma\ Cationes + \Sigma\ Aniones}$$

ANÁLISIS DE FACIES QUÍMICAS

A continuación se interpreta la composición hidroquímica de las muestras tomadas en terreno mediante los diagramas de Piper, los diagramas de Stiff y los diagramas de Schoeller- Barkalof. En el diagrama de Piper las aguas geoquímicamente similares quedan agrupadas en áreas bien definidas. Este diagrama está formado por dos triángulos equiláteros, donde se representan los cationes y aniones mayoritarios. Los datos de los diagramas triangulares se proyectan en un rombo central en el que se representa la composición del agua deducida a partir de aniones y cationes. Las concentraciones de los iones dadas en meq/l se expresan como porcentaje con respecto a la suma de aniones y cationes respectivamente.

Por otro lado, el diagrama de Stiff permite visualizar claramente diferentes tipos de agua y dar idea del grado de mineralización (ancho de la gráfica). Además permite apreciar los valores de las relaciones iónicas con respecto a la unidad y la variación de las relaciones entre cationes y entre aniones de una muestra. Al representarse en un mapa, se visualiza la variación espacial de la mineralización del agua en el acuífero. Esta gráfica está compuesta por tres ejes horizontales, cada uno de ellos uniendo un catión y un anión. Todos los cationes se disponen al costado izquierdo del diagrama, y los aniones al derecho. Siempre el Na^{+} se confronta con el Cl^{-}, el Ca^{+2} con el HCO_3^{-} y el Mg^{+2} con el SO_4^{-2}. Todos los ejes horizontales están a la misma escala (lineal) y las concentraciones están dadas en meq/l.

En el diagrama de Schoeller- Barkalof se disponen varias semirrectas o columnas verticales paralelas, igualmente espaciadas y divididas en escala logarítmica y con el mismo módulo. A cada semirrecta se le asocia un anión o un catión, excepto la primera columna que no tiene asociada ningún ion y su unidad de medida es en meq/l, las demás tienen como unidad de medida mg/l. En este tipo de diagramas se puede representar tanto aguas diluidas como concentradas en un mismo diagrama, permite clasificar los diferentes tipos de agua, por otro lado en una misma línea de flujo permite establecer la evolución del agua en el acuífero, así como determinar los procesos modificatorios, como intercambio iónico, procesos de óxido reducción y mezcla de diferentes tipos de agua. También es muy útil para estudiar la evolución temporal de aguas subterráneas en un mismo punto.

CALIDAD DE LAS AGUAS

Por otro lado, en la Tabla 7.20 se presentan los valores establecidos como contenidos máximos que establece la norma chilena de agua potable, NCh409/1.Of2005. Estos valores se han comparado con los resultados obtenidos de la composición hidroquímica en cada campaña de muestreo.

Tabla 7.20 Límite máximo de contenido de cada elemento para agua potable según la norma NCh409/1.Of2005. Fuente: modificado de NCh409/1.Of2005.

Elemento	Límite máximo mg/l
Cobre	2
Cromo total	0,05
Fluoruros	1,5
Hierro	0,3
Manganeso	0,1
Magnesio	125
Selenio	0,01
Zinc	3
Arsénico	0,01
Cadmio	0,01
Cianuro	0,05
Mercurio	0,001
Nitratos	50
Nitrito	3
Razón nitratos + nitrito	1
Plomo	0,05
Amoniaco	1,5
Cloruro	400
pH	6,5 < pH < 8,5
Sulfatos	500
Sólidos disueltos totales	1.500

ISOTOPÍA DE LAS AGUAS

Por último, se analizaron los **isótopos estables de Oxígeno 18 (δ18O) y** Deuterio **(δD)** para determinar el posible origen y comportamiento de las aguas subterráneas desde que recarga al acuífero hasta que se tomó la muestra de agua. La aplicación de $\delta^{18}O$ y δD se basa en el comportamiento de estos isótopos en el agua dentro del ciclo hidrológico. En la Figura 7.30 se muestran los principales procesos capaces de modificar el contenido isotópico y la composición química del agua dulce son: (1) mezcla con agua marina; (2) mezcla con otras masas acuosas de distintos contenidos químicos e isotópicos; (3) evaporación; (4) disolución de sales y lixiviado de minerales en las rocas; y (5) intercambio químico e isotópico con la matriz del acuífero. La relación entre el δ18O y δD en la composición del agua de la RMM se ajusta a la siguiente ecuación empírica (Craig, H., 1961):

$$\delta D = 8 \cdot \delta 18O + 10$$

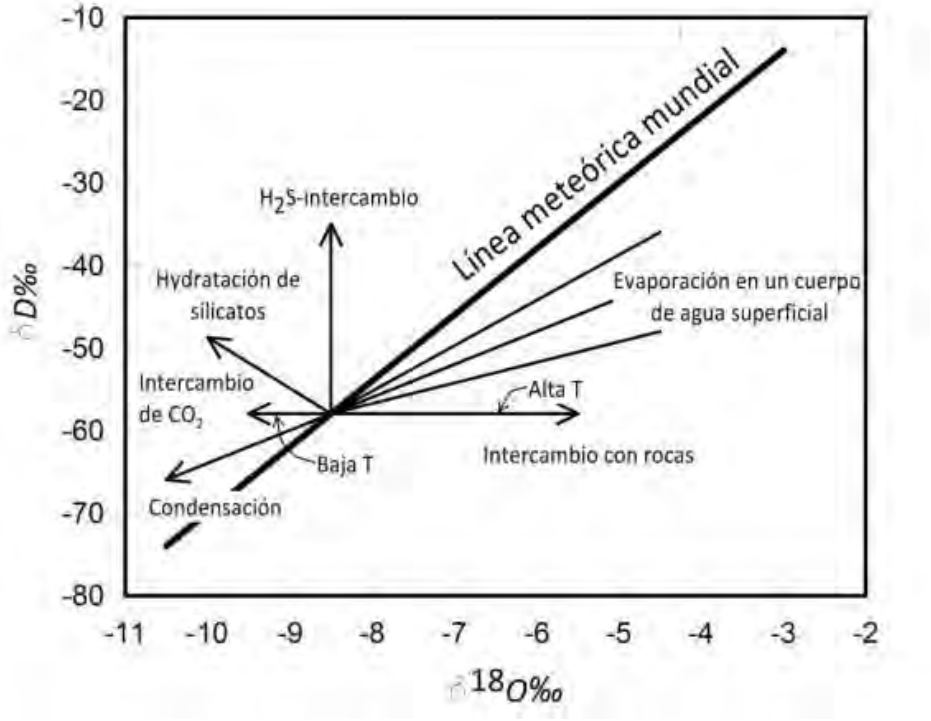


Figura 7.30 Recta Meteórica Mundial (RMM) y tipos de desviaciones. Fuente: modificado de Domenico y Schwartz (1998).

La composición isotópica del agua subterránea es un reflejo de la composición isotópica de la precipitación que contribuye a la recarga de los acuíferos. La composición isotópica de la precipitación está relacionada con la historia de las masas de aire que producen la precipitación. Dentro de una latitud parecida, en las zonas costeras se produce un vapor de agua de una δ ligeramente negativa (la radiación solar es suficiente como para que se evaporen moléculas con ^{2}H y ^{18}O). A medida que aumenta la lejanía a la costa δ se hace más negativa. Esto implica que la lluvia es tanto más ligera cuanto más lejos del mar se origina el vapor que la produce. En la Figura 7.31 se aprecia que la mayoría se sitúan próximas a la RMM, y a partir de estas los valores isotópicos se alinean a las rectas con pendiente de evaporación (pendiente 4 y 5). Por otro lado, se observa que las muestras tomadas en el altiplano, en la cuenca del río Caquena, del salar de Surire y las aguas trasvasadas al río San José desde el río Lauca, se ajustan a la RMM son más livianas (más negativas), mientras que las aguas que se ubicaron a menor altitud, son más pesadas (menos negativas).

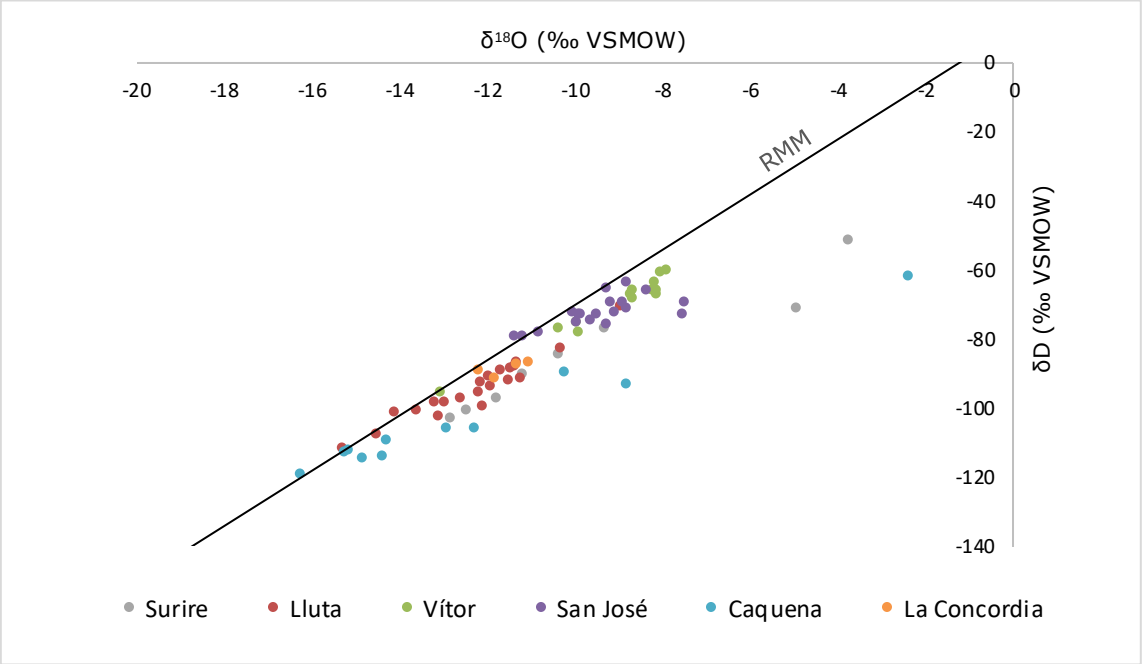


Figura 7.31 Relación isotópica **del $\delta^{18}O$ y δD en las muestras tomadas en la** primera campaña de terreno, noviembre 2015. Fuente: elaboración propia.

A continuación, se describe la caracterización de la oferta de cada cuenca que compone la región de Arica y Parinacota.

7.2 Cuenca de la Quebrada de La Concordia

La cuenca de la quebrada de La Concordia se encuentra ubicada al norte de la región, limita al norte con las cuencas del río Caplina y de la quebrada Hospicio ambas en territorio del Perú, al sur y al este con la cuenca del río Lluta y al oeste con el Océano Pacífico. La cuenca tiene una superficie de 720,4 km^2 que se desarrolla en territorio chileno y representa el 20% de la cuenca en su totalidad, el restante 80% se desarrolla en territorio peruano.

La quebrada de La Concordia nace entre los Cerros Lampallares y Alto de Puquios, a una altitud de 4.250 msnm y 3.750 msnm, respectivamente. Por el norte recibe un afluente que también nace en territorio chileno y desarrolla su cauce en territorio peruano paralelo al de la Concordia, para finalmente juntarse en el curso inferior a 15 km del mar. Por el sur llega la quebrada de Caunire o Gallinazos de Concordia, la cual nace cerca de Puquios en Pampa Colorada y desarrolla su curso casi paralelo al cauce principal hasta su junta a 22 km del mar. En la Figura 7.32 se presenta la ubicación de la cuenca de la Quebrada de La Concordia y su red de drenaje.

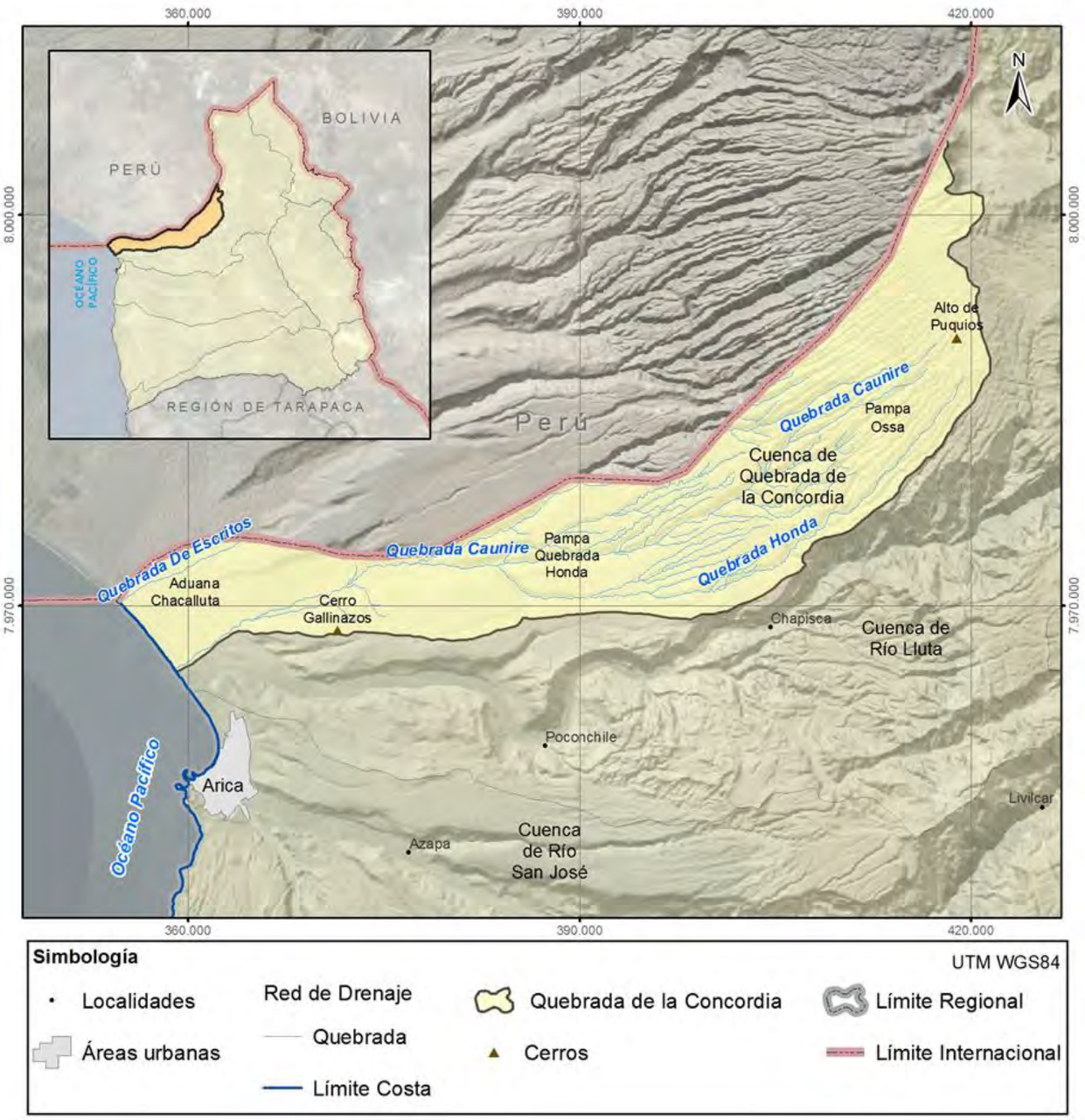


Figura 7.32 Ubicación de la cuenca de la quebrada La Concordia. Fuente: elaboración propia.

7.2.1 Caracterización Hidrológica

7.2.1.1 Definición y caracterización de la cuenca

Los principales afluentes en la cuenca son las quebradas Escritos y La Concordia. La quebrada Escritos nace en la parte occidental de la Sierra de la Huaylillas, en la falda occidental del Cerro Lampallares (4.258 msnm), y desarrolla su curso en dirección al suroeste por 71 km hasta descargar al Océano Pacífico. La quebrada Escritos tiene por principal afluente la quebrada Olivar que corre paralelamente al curso principal por 22 km hasta la parte media. Cabe mencionar que por los afluentes y subafluentes de la cuenca escurre en casi todo el año muy poca agua a nula, ya que son cauces prácticamente secos.

De acuerdo al documento "Plan de acción estratégico para el desarrollo hídrico de la región de Arica y Parinacota" liderado por la DGA (2010), en el territorio nacional de la cuenca no se observa vegetación de ningún tipo y desde el punto de vista hidrológico se indica que la quebrada no se encuentra en régimen natural, ya que las aguas superficiales son utilizadas en la zona alta, dentro del Perú, para el riego agrícola. En cualquier caso, dentro del territorio nacional la quebrada no presenta flujos superficiales, y en los últimos 25 años sólo se habría producido un evento de escorrentía superficial, pero que no correspondería a una crecida natural, sino más bien, al desvío de aguas a través de la quebrada durante un período de intensas lluvias en la zona sur del Perú.

DELIMITACIÓN DE LA CUENCA

En la Figura 7.32 se muestra la delimitación y red de drenaje de la cuenca de la quebrada La Concordia. El criterio utilizado para la delimitación se explicó en el apartado "Definición y Caracterización de las Cuencas de la Región" en el capítulo de "Análisis Regional". Sin embargo, de manera resumida el criterio es básicamente topográfico en territorio chileno.

CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS DE LA CUENCA

La morfología de la cuenca de la quebrada La Concordia es un referente para establecer la dinámica esperada de la escorrentía superficial y se caracteriza por el

análisis de tres parámetros, los relativos a la forma, al relieve y a la red de drenaje. Éstos se calcularon con el uso de SIG, además de utilizar expresiones matemáticas para este fin. La metodología se presenta en detalle en el Anexo VI.

En relación a la forma, la cuenca tiene un coeficiente de compacidad (KG) de 1,92, por tanto su forma es rectangular. La densidad del drenaje de la quebrada La Concordia definida como la longitud total de los cauces sobre el área de la cuenca, es en este caso de 0,24 km/km^2 que corresponde a una densidad de drenaje pobre. Es necesario destacar que este parámetro representa la densidad de drenaje promedio en la cuenca, lo cual no excluye que existan cauces o quebradas al interior de la cuenca total que dispongan de un drenaje muy desarrollado y por tanto, ocurra una respuesta rápida de transformación precipitación-escorrentía.

Para construir la curva hipsométrica de la cuenca fue necesario reclasificar las bandas del DEM y calcular las áreas acumuladas intermedias. Según la curva hipsométrica (Figura 7.33), la cuenca tiene una topografía variable iniciando desde la cota mínima de 5 msnm hasta la máxima de 4.304 msnm. Sin embargo, el 50% de la cuenca tiene una altura sobre los 1.618 msnm.

De acuerdo a la metodología presentada en el Anexo VI, esta curva hipsométrica se clasifica de tipo A y corresponde a una cuenca con gran potencial erosivo que está en la fase de juventud.

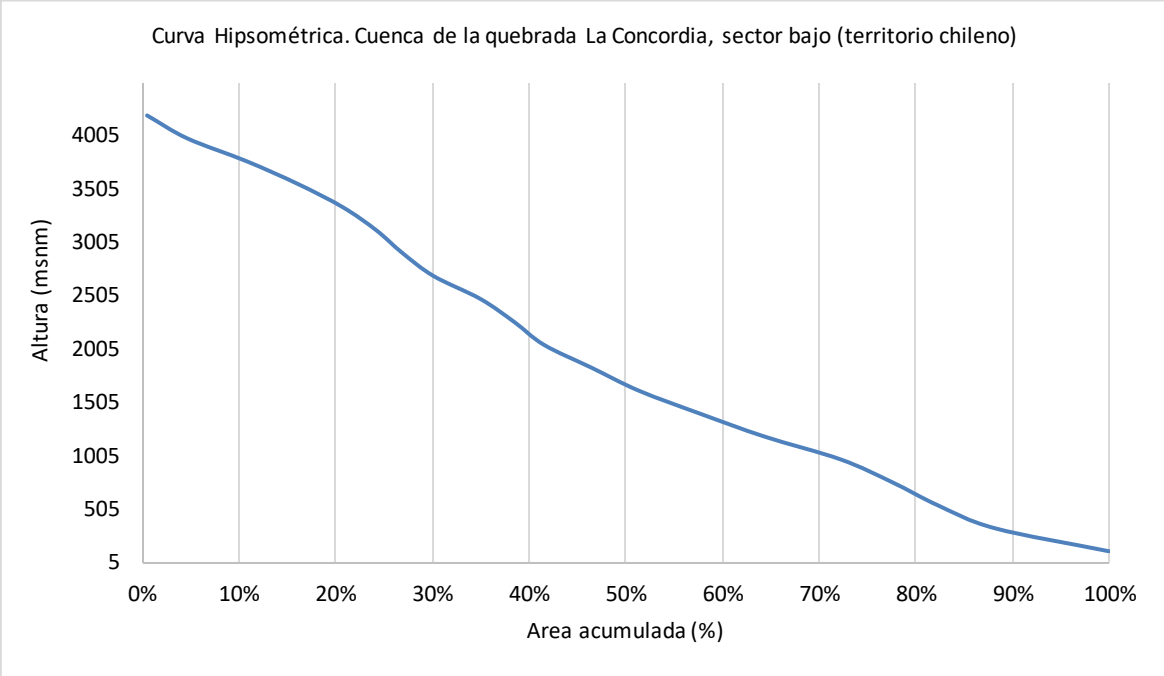


Figura 7.33 Curva hipsométrica de la cuenca de la quebrada La Concordia. Fuente: elaboración propia.

7.2.1.2 Caracterización de la red de drenaje

El diagrama Unifilar de la quebrada La Concordia se indica en la Figura 7.34. En este se incluyen las quebradas aportantes más relevantes. Dado que en la cuenca no existen estaciones fluviométricas ni se encontraron registros de aforos, no fue posible indicar el caudal medio anual. Sin embargo, de acuerdo a los antecedentes, la mayor parte del año las quebradas permanecen secas.

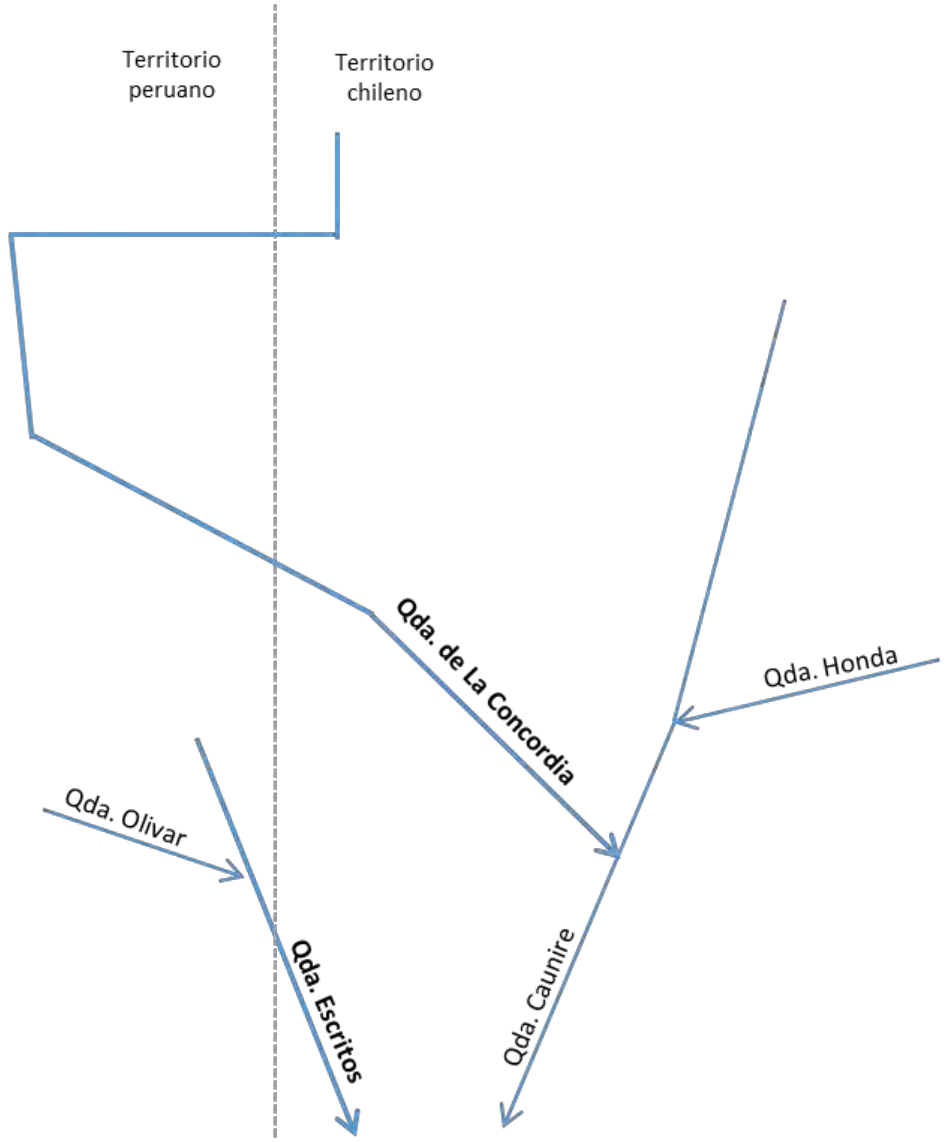


Figura 7.34 Diagrama unifilar de la quebrada La Concordia sector bajo (territorio chileno). Fuente: elaboración propia.

7.2.1.3 Hidrometeorología

En la cuenca de la quebrada La Concordia (territorio de Chile) no existen estaciones meteorológicas vigentes, únicamente existe la estación Puquios según se muestra en la Figura 7.35. No se cuenta por tanto con registros históricos suficientes de la componente hidrometeorológica, por lo que se analizará desde un marco regional.

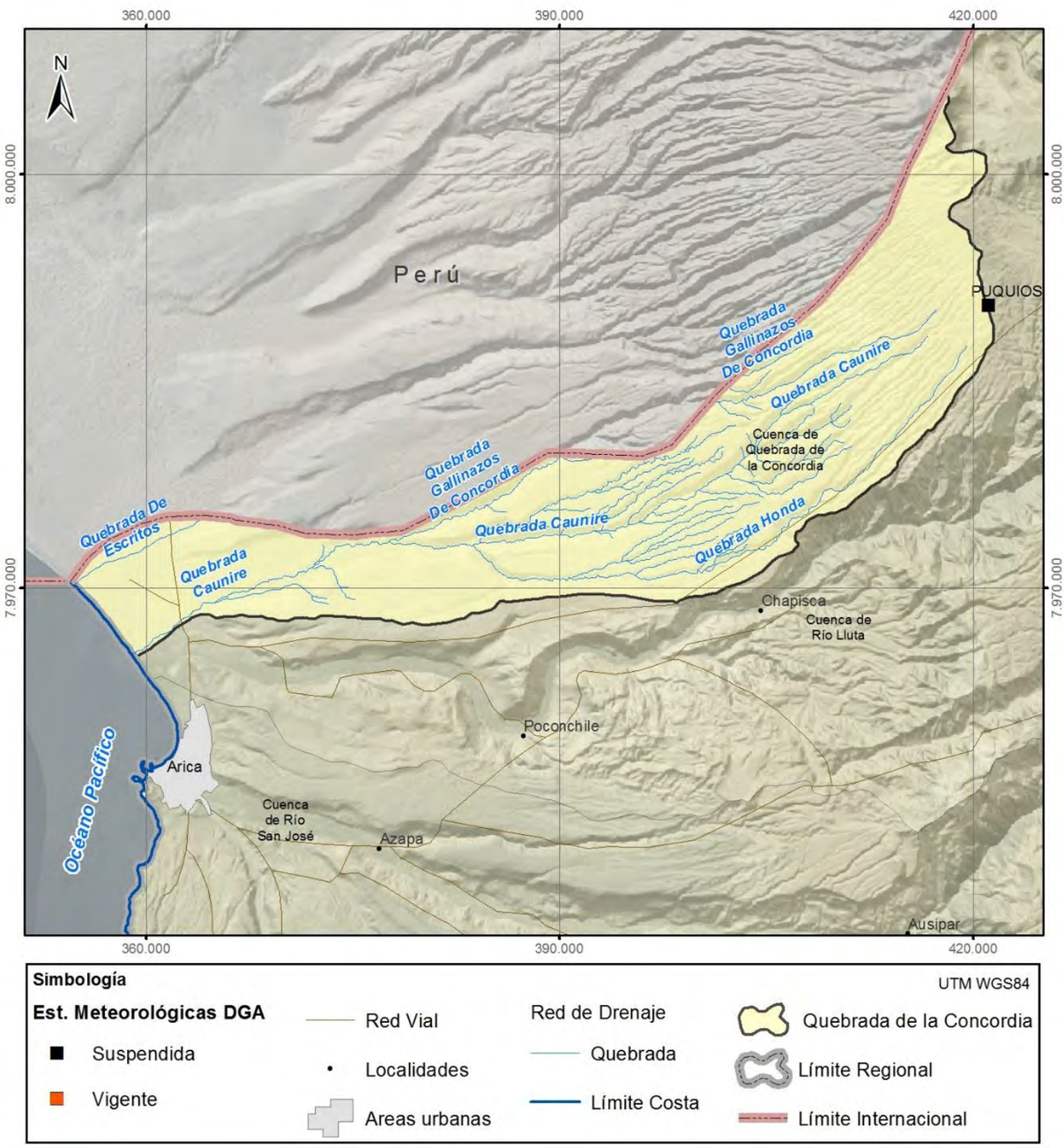


Figura 7.35 Ubicación estaciones meteorológicas en la cuenca de la Quebrada de la Concordia. Fuente: elaboración propia.

PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL Y MEDIA MENSUAL

A nivel regional se trazó la distribución de la precipitación media anual mediante las isoyetas de precipitación, construidas a partir de los datos registrados en las 28 estaciones meteorológicas, 24 de ellas ubicadas en la XV Región de Arica y Parinacota y las 4 restantes en la I Región de Tarapacá. La información de las estaciones utilizada fue previamente rellenada y analizada, tal como se explicó en el subcapítulo "Análisis de las variables espacial y temporal" del capítulo "Análisis Regional".

Para el trazado de las isoyetas inicialmente se realizó una interpolación espacial utilizando el programa ArcMap™ 10.2 (método Kriging Ordinary), seguidamente éstas fueron corregidas en base a la topografía y a los gradientes de precipitación con la altura. Las isoyetas regionales que cruzan por la cuenca de la quebrada La Concordia se presentan en la Figura 7.36.

La precipitación media anual en el área de la cuenca se distribuye desde la isoyeta 0 mm/año hasta la isoyeta 150 mm/año. A partir de la cota 1.635 msnm se registran precipitaciones del orden de los 10 mm/año, después de la cota 3.132 msnm hasta aproximadamente los 3.989 msnm la precipitación media anual varía entre los 50 mm/año y los 150 mm/año. En la Tabla 7.21 se especifica la precipitación ponderada de acuerdo al área de influencia entre isoyetas, obteniendo que la precipitación media anual en la cuenca es del orden de los 26,2 mm.

Tabla 7.21 Ponderación de la precipitación según área de influencia entre isoyetas en la cuenca de la quebrada La Concordia sector bajo (Territorio de Chile). Fuente: elaboración propia.

Isoyetas de Precipitación (mm)		Área entre isoyetas (km^2)	Precipitación media multianual 1985-2014 (mm)
0		198,4	0
0	10	279,3	1.396
10	20	38,9	583
20	50	69,6	2.436
50	100	59,2	4.437
100	150	50,7	6.339
> 150		24,4	3.660
			26,2 Precipitación media anual en la cuenca

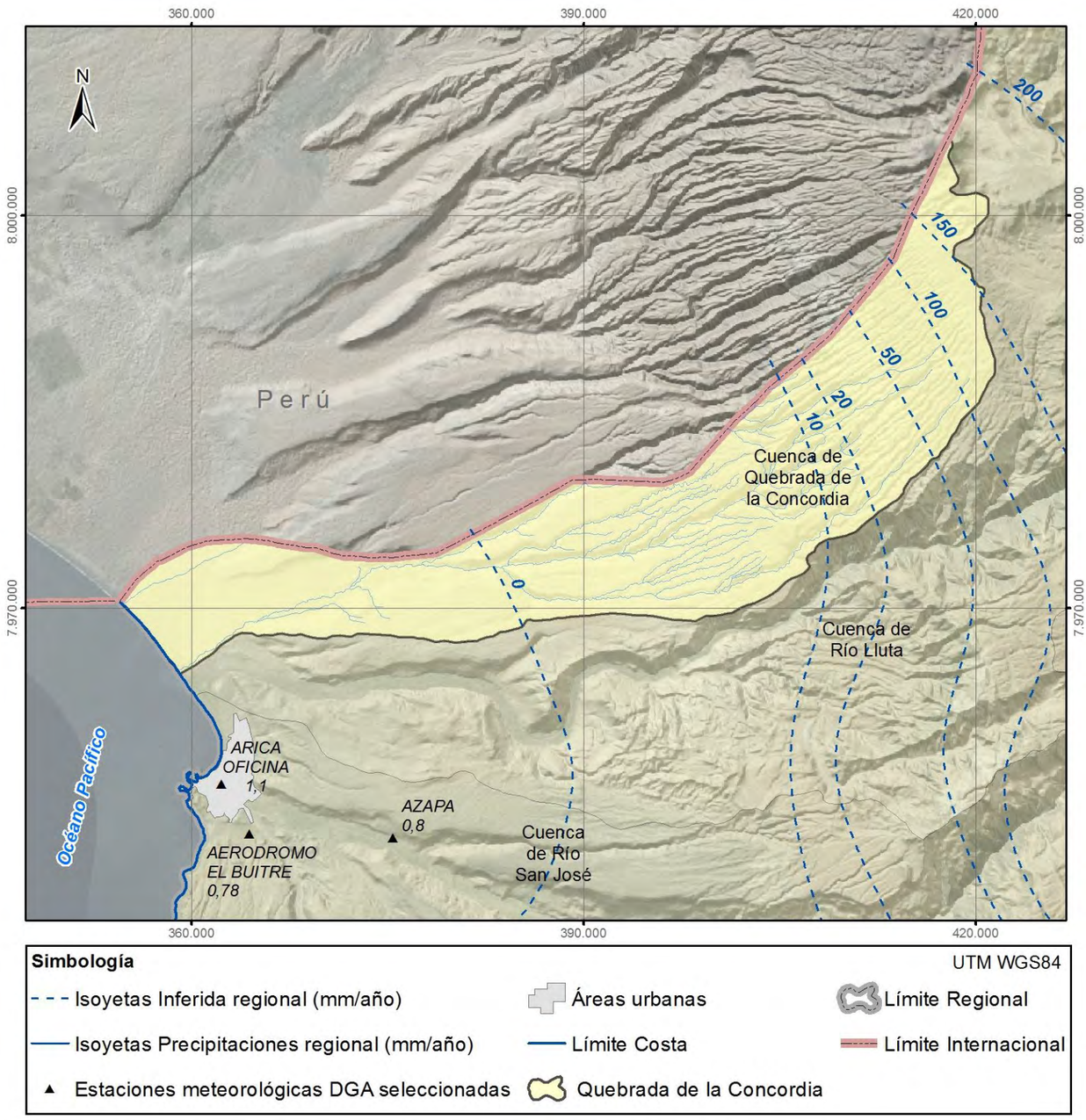


Figura 7.36 Isoyetas de precipitación media anual regional en la cuenca de la quebrada La Concordia. Fuente: elaboración propia.

Mediante el análisis de las precipitaciones medias mensuales se determinó la estacionalidad existente en la región y por consiguiente su influencia en la cuenca de la quebrada La Concordia. En la Tabla 7.22 se muestran las precipitaciones medias mensuales de las 11 estaciones pluviométricas seleccionadas como influyentes en la cuenca.

Los meses más húmedos del año corresponden a diciembre, enero, febrero y marzo, en los demás meses del año las precipitaciones son esporádicas o nulas. Sin embargo, en altitud menor a los 1.500 msnm, las precipitaciones medias mensuales son mínimas (0,1 a 0,3 mm/mes) y se presentan en dos épocas: durante los meses de enero, febrero y marzo, y en los meses de julio y agosto.

De esta manera, se corrobora que la cuenca de la quebrada La Concordia tiene fuerte influencia tropical, por lo tanto las lluvias que se originan son de tipo orográficas provenientes de la región del Amazonas en el altiplano de la cordillera de los Andes, comúnmente denominado Invierno Altiplánico.

Tabla 7.22 Precipitaciones medias mensuales en estaciones meteorológicas de la Región. Fuente: elaboración propia.

Estación pluviométrica DGA	Altitud [msnm]	Precipitación media mensual [mm] periodo 1985-2014												
		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Pp ACUM
Alcérreca	3.990	79,2	60,1	40,9	4,7	0,9	2,5	3,4	3,0	0,4	0,5	2,0	20,8	218,3
Putre	3.560	62,7	64,2	29,2	4,0	1,5	0,7	1,6	1,8	1,6	0,4	1,7	20,8	190,2
Central Chapiquiña	3.350	52,1	53,3	25,0	1,6	0,1	0,6	1,2	1,8	0,6	0,2	0,5	15,5	152,6
Belén -Dcp	3.240	57,0	54,8	29,7	0,9	0,6	0,7	1,4	2,9	0,4	0,5	0,8	15,7	165,4
Tignamar	3.230	52,1	42,8	20,9	1,4	0,7	0,5	1,3	1,8	1,5	0,2	0,5	16,1	139,8
Azapa	365	0,2	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8
Aeródromo El Buitre	110	0,1	0,1	0,2	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8
Arica Oficina	20	0,3	0,2	0,2	0,0	0,0	0,0	0,3	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	1,1
Codpa	1.870	3,6	3,7	1,2	0,0	0,0	0,0	0,2	0,4	0,0	0,0	0,0	0,3	9,4
Esquiña	2.170	12,1	20,0	9,0	0,7	0,0	0,0	0,7	1,1	0,3	0,0	0,0	2,0	45,9
Río Camarones En Chilpe	1.565	2,8	4,3	0,6	0,1	0,0	0,0	0,4	0,3	0,2	0,0	0,0	0,4	9,1

EVAPORACION MEDIA ANUAL Y MEDIA MENSUAL

La evaporación media anual y media mensual en la cuenca de la quebrada La Concordia, se analizó a escala regional, dada la poca información existente y la nula presencia de estaciones meteorológicas. Para ello se contó con registros de evaporación del tanque tipo A de 3 estaciones ubicadas en cuencas cercanas, consideradas de influencia. En la Tabla 7.23 se muestran coordenadas y periodos de información.

Tabla 7.23 Coordenadas y periodo de información de las estaciones con medición de evaporación tanque tipo A. Fuente: elaboración propia.

Estación Meteorológica DGA	Código BNA	DATUM WGS84 H19S		Altitud	Periodo	Años	Estado del Tanque
		UTM Este	UTM Norte				
PUTRE	01202010-4	440.754	7.987.689	3.545	1982-2009	27	V
AZAPA	01310019-5	375.384	7.952.366	365	1980-2014	34	V
AERODROMO EL BUITRE	01310022-5	364.443	7.952.691	110	1986-2012	26	V

V: Vigente

En promedio la cuenca podría presentar una evaporación potencial anual acumulada entre los 1964 mm y 2572 mm, que se distribuye en distinta proporción durante los meses del año. A escala regional se estima una tasa de evaporación potencial media anual de 6,4 mm/d, con un rango entre 5,5 mm/d y 7,1 mm/d.

Los registros de la evaporación potencial media mensual se presentan en la Tabla 7.24. Se observa que la mayor evaporación ocurre en los meses de octubre, noviembre, diciembre y enero. Los valores más bajos de evaporación se registran en los meses de junio y julio.

Tabla 7.24 Evaporación media mensual del tanque tipo A en estaciones de la Región. Fuente: elaboración propia.

Estación	Altitud [msnm]	EVAPORACIÓN MEDIA MENSUAL [mm]												
		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Total
Putre	3.545	145	129	151	169	157	150	153	170	179	201	190	170	1.964
Azapa	365	293	257	255	202	181	154	153	166	186	224	238	263	2.572
Aeródromo El Buitre	110	264	243	243	196	167	130	129	139	158	192	213	248	2.323

EVAPOTRANSPIRACIÓN MEDIA ANUAL

Para el análisis de la evapotranspiración (ETP) en la cuenca de la quebrada La Concordia, se utilizó información de 10 estaciones meteorológicas que pertenecen a la DGA ubicadas en cuencas cercanas, consideradas como estaciones de influencia sobre la cuenca de estudio. Esto corroborado con las isotermas regionales trazadas en el estudio de referencia del DICTUC (2008).

Cada estación con una serie temporal diferente de las variables climáticas de precipitación, evaporación y temperatura, desde un mínimo de 2 años hasta un máximo de 35 años, además de presentar registros con datos mensuales faltantes.

En la estimación de la evapotranspiración a nivel regional se aplicó el método de Turc, usualmente utilizado con buena aproximación en territorio Chileno. El procedimiento se explicó con mayor detalle en el subcapítulo "Evapotranspiración" del capítulo "Hidrometeorología" de la componente regional.

En la Tabla 7.25 se presentan las estaciones utilizadas en este análisis y su respectiva estimación de evapotranspiración. Tal como se puede apreciar, el rango de evapotranspiración media anual estimada en la cuenca es amplio, desde un mínimo 0,8 mm/año en la parte baja, hasta 190,2 mm/año en la parte alta.

De acuerdo a los valores obtenidos, la ETP media anual supera la precipitación media anual en la cuenca. Situación que encierra un alto grado de incertidumbre por no contar con registros propios, por lo tanto se recomienda la instalación de estaciones meteorológicas que permitan caracterizar de manera más apropiada la zona.

Tabla 7.25 Estaciones consideradas y valor estimado de la evapotranspiración en la Región. Fuente: elaboración propia.

Est. Meteorológica DGA	Altitud [msnm]	Pp	T	Precipitación media anual [mm/año]	Temperatura media anual [°C]	ETP [mm/año] estimación mét. Turc
Putre	3.545	X	X	190,2	8,9	188,7
Central Chapiquiña	3.350	X		152,6	9,5 *	155,0
Belén -dcp	3.240	X		165,4	10,1 *	167,5
Tignamar	3.230	X		139,8	10,2 *	143,3
Azapa	365	X	X	0,8	18,8	0,9
Aeródromo el Buitre	110	X	X	0,8	19,5	0,8
Arica oficina	20	X		1,1	19,6 *	1,2
Codpa	1.870	X	X	9,4	15,9	9,9
Esquiña	2.170	X		45,9	15,3 *	48,3
Río camarones en chilpe	1.565	X		9,1	16,5 *	9,9

* Valor estimado a partir de la relación obtenida de la temperatura y la altitud en la Región.

Adicionalmente, a partir de la información disponible en el producto satelital MODIS 16, y siguiendo la metodología detallada en el Anexo VI, se estimó la evapotranspiración de la cuenca. MODIS 16 incluye información de evapotranspiración y flujo de calor latente real, estimado a partir de información satelital remota y utilizando como método de cálculo, para el caso de la evapotranspiración, la ecuación de Penman-Monteith. El valor medio anual estimado para la cuenca, considerando datos entre 2000 y 2014 es de 50,7 [mm/año].

7.2.1.4 Fluviometría

En la cuenca de la quebrada La Concordia (territorio de Chile) no existen estaciones de control fluviométrico, por lo tanto no se cuenta con registros de series de caudales históricos.

De acuerdo a los antecedentes hidrológicos de AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (1998b), la cuenca de la quebrada La Concordia no se encuentra en régimen natural, ya que en el sector alto (territorio de Perú) existen captaciones de agua sobre el cauce destinadas para el riego, provocando así que en la mayor parte del año la quebrada no presente escurrimientos o flujos superficiales en el sector bajo (territorio de Chile).

Sin embargo, según la DGA (2011) se han presentado algunos eventos extremos en el sector alto que producen escurrimientos que fluyen por la quebrada de La Concordia hasta el sector bajo.

7.2.1.5 Levantamiento Hidrológico

Para el presente estudio se realizaron dos visitas de terreno a la cuenca en el sector bajo (territorio chileno). La primera campaña en noviembre de 2015 y la segunda en febrero de 2016. La finalidad de los terrenos fue recorrer las principales quebradas y encontrar puntos de medición, considerando que durante esos meses, anualmente se registran las mayores precipitaciones en la región producto del denominado "Invierno Altiplánico".

Sin embargo, en las dos campañas de terreno se constató que no existe escurrimiento superficial por ninguno de los afluentes. En una zona cercana a la localidad de Puquios (3.705 msnm), se evidenció rastro de humedad sobre el cauce, pero sin presencia de agua que pudiera ser cuantificada.

Por lo tanto, dadas las condiciones que presenta la cuenca, no fue posible aforar. Como único registro de agua en la cuenca, lo constituye el acuífero regional costero. La información referida a este acuífero se presenta en el capítulo "Caracterización Hidrogeológica".

7.2.1.6 Modelación hidrológica

Como se comentó anteriormente, la cuenca de la quebrada La Concordia sector bajo no cuenta con estaciones meteorológicas ni fluviométricas. Sin embargo, en apartados anteriores se han analizado las variables hidrometeorológicas en la cuenca nivel regional.

Por otro lado, en el apartado de fluviometría y levantamiento hidrológico se mencionó que no existe evidencia de escurrimientos superficiales en la mayor parte del año. Esta es por lo tanto una cuenca con afluentes secos por donde eventualmente podría escurrir agua en eventos extremos, a pesar de que no se cuenta con registros históricos que lo comprueben.

Se considera que para realizar una modelación hidrológica de la cuenca de la quebrada La Concordia, es necesario contar con la información de toda la cuenca, tanto del sector alto (territorio peruano) como sector bajo (territorio chileno), pues no sería correcto sólo considerar lo que ocurre con la hidrografía del sector de Chile que sólo representa el 20% de la cuenca en su totalidad.

De esta manera, el análisis necesario es mucho más complejo y se escapa del alcance del presente estudio, razón por la cual no se realiza una modelación hidrológica en esta cuenca. Se propone debiera desarrollarse un estudio específico de los recursos hídricos en la cuenca completa.

7.2.1.7 Estimación de la recarga de aguas subterráneas

De acuerdo al informe técnico de INGESA (2006), la recarga natural estimada para la cuenca vertiente Pacífico compartida con Perú, equivaldría a la diferencia entre la precipitación efectiva y la evapotranspiración potencial. Los valores considerados para la escorrentía de 0 mm/año, se estimó una precipitación de 13 mm/año y una evapotranspiración potencial del mismo orden. Obteniéndose finalmente, que la recarga natural en la cuenca es de 0 mm/año, no habría recarga natural hacia el acuífero. Sin embargo, los resultados generan incertidumbre, pues se conoce de la existencia de un acuífero regional por estudios más recientes.

En el estudio "Evaluación de los recursos hídricos subterráneos en el sector acuífero de La Concordia" DGA (2011), se menciona que en la zona de La Concordia concurren dos corrientes de agua subterránea. Una proveniente de la cuenca del río Caplina por el noreste y otra de la cuenca del río Lluta por el sureste. Esta afirmación fue respaldada con el trazado de las curvas freáticas y mediante resultados de los análisis químicos obtenidos de las muestras de agua en pozos, de las campañas de terreno realizadas entre los años 1959 y 1996. El agua de los pozos situados al norte, proporcionaron agua de buena calidad y los situados al sur asemejaron en su calidad a la del río Lluta, caracterizado por su alto contenido salino. Además, se constató que los niveles freáticos del sector se han mantenido aproximadamente estables durante los últimos 40 años.

Para estimar el flujo subterráneo pasante en una sección de la zona de estudio, los autores aplicaron los principios de la ley de Darcy (flujo en medios porosos),

considerando una transmisividad promedio de 400 m^2/d, un gradiente hidráulico de 0,0024 y un ancho de 9000 m, obteniendo finalmente un flujo subterráneo de 100 l/s.

Una vez revisados los antecedentes de la cuenca de la quebrada La Concordia sector bajo, relacionados con la estimación de recarga y de analizar las componentes naturales que predominan en la cuenca, fue adoptado el valor de la recarga a nivel anual presentado en la Tabla 7.26.

Tabla 7.26 Resumen de las principales fuentes de recarga al acuífero en La Concordia. Fuente: elaboración propia.

Principales fuentes de recarga al acuífero	Método	Valor estimado anual [l/s]
FLUJO SUBTERRÁNEO de cuencas adyacentes, de la cuenca del río Caplina (sentido noreste) y de la cuenca del río Lluta (sentido sureste)	Se adoptó la estimación del estudio SDT N° 214 -DGA (2011)	100

7.2.2 Marco geológico

La cuenca de la quebrada La Concordia es la más septentrional de la región de Arica y Parinacota y se extiende por parte de la Depresión Central y de la Precordillera en su zona oriental.

GEOLOGÍA

En esta cuenca las rocas más antiguas que afloran son del Oligoceno-Holoceno, las cuales corresponden a un pequeño afloramiento de la Formación Azapa (Oa), a la Formación El Diablo (Mimd) y a unos afloramientos discontinuos de la Ignimbrita Lauca (Pll), en la Depresión Central. En el límite noreste de la cuenca, alcanzan a aflorar remanentes de volcanes del Mioceno inferior (Miv) de la Precordillera.

Los depósitos no consolidados o semiconsolidados de la cuenca La Concordia son los depósitos eólicos (Qe), de remoción en masa (PlQr), coluviales (Qc) y aluviales (Pa, Ha) que se localizan en la Depresión Central, y; los depósitos litorales (Ql) y depósitos fluviales del Plioceno (Plf), que se localizan a lo largo de la zona costera.

TECTÓNICA Y ESTRUCTURAS

No existen mayores evidencias de las primeras dos etapas tectónicas en la cuenca de la quebrada La Concordia. Sin embargo, durante la tercera etapa (Oligoceno-Holoceno)

se producen los mayores cambios en el relieve. Esta deformación se observa como pliegues suaves y fallas menores, además de fallas mayores inversas y de rumbo en la parte oriental de la depresión central. En esta cuenca, en particular, afloran la flexura Poconchile y el anticlinal Huaylillas. La flexura presenta un largo de 25 km, rumbo suavemente curvo (N10-30W), vergencia este, y desplazamiento vertical de hasta 100 m. El anticlinal se extiende aproximadamente 60 km, sobrepasando el límite norte del país, hacia territorio peruano y tiene un rumbo N10-50W. Presenta un flanco occidental (2-6°W) afectado por pliegues cortos menores y un flanco oriental inclinado muy suavemente (1°E). El alzamiento promedio de la Precordillera, o amplitud del anticlinal, es de unos 1.000 m.

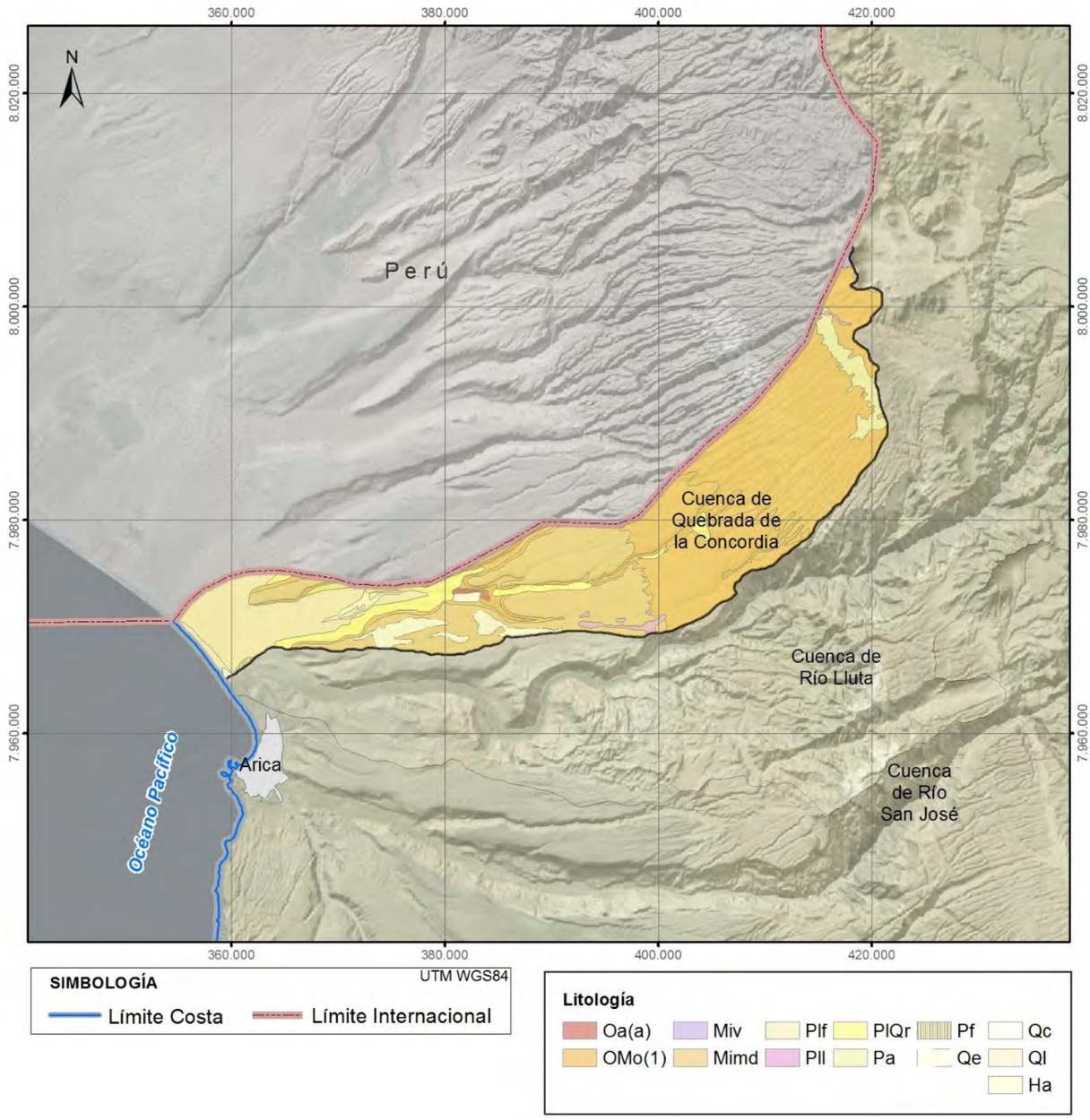


Figura 7.37 .Mapa geológico de la cuenca de la quebrada La Concordia. Fuente: modificado de García et al (2004).

7.2.3 Caracterización Hidrogeológica

7.2.3.1 Estudios existentes

En relación a los antecedentes recopilados en la cuenca de la quebrada La Concordia, se encontraron los estudios realizados por Henríquez *et al.* (1976), AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (1998), INGESA (2006) y DGA (2011), en los cuales se presentaron las unidades hidrogeológicas, las formaciones acuíferas y estimaciones de parámetros hidráulicos. Dado que los últimos dos fueron realizados en parte en base al estudio de AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (1998), no presentan nueva información relevante.

En el estudio de Henríquez *et al.* (1976) se han caracterizado sedimentos miocénicos en la parte central de la quebrada y se ha presentado un análisis de la química de las aguas subterráneas. Además se incluyeron algunos acuíferos dentro de la cuenca del rio Lluta.

En AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (1998) se definieron las unidades hidrogeológicas de la cuenca a partir de las columnas estratigráficas de 6 sondajes y de la interpretación de las pruebas de bombeo efectuadas en la Unidad Hidrogeológica I.

En INGESA (2006) se describen y muestran los perfiles estratigráficos de los pozos ZOFRI Hidrosan (ND-0101-144), ZOFRI Captagua (ND-0101-249) y D.O.S, así mismo se interpretaron las pruebas de bombeo realizadas en la Unidad Hidrogeológica I.

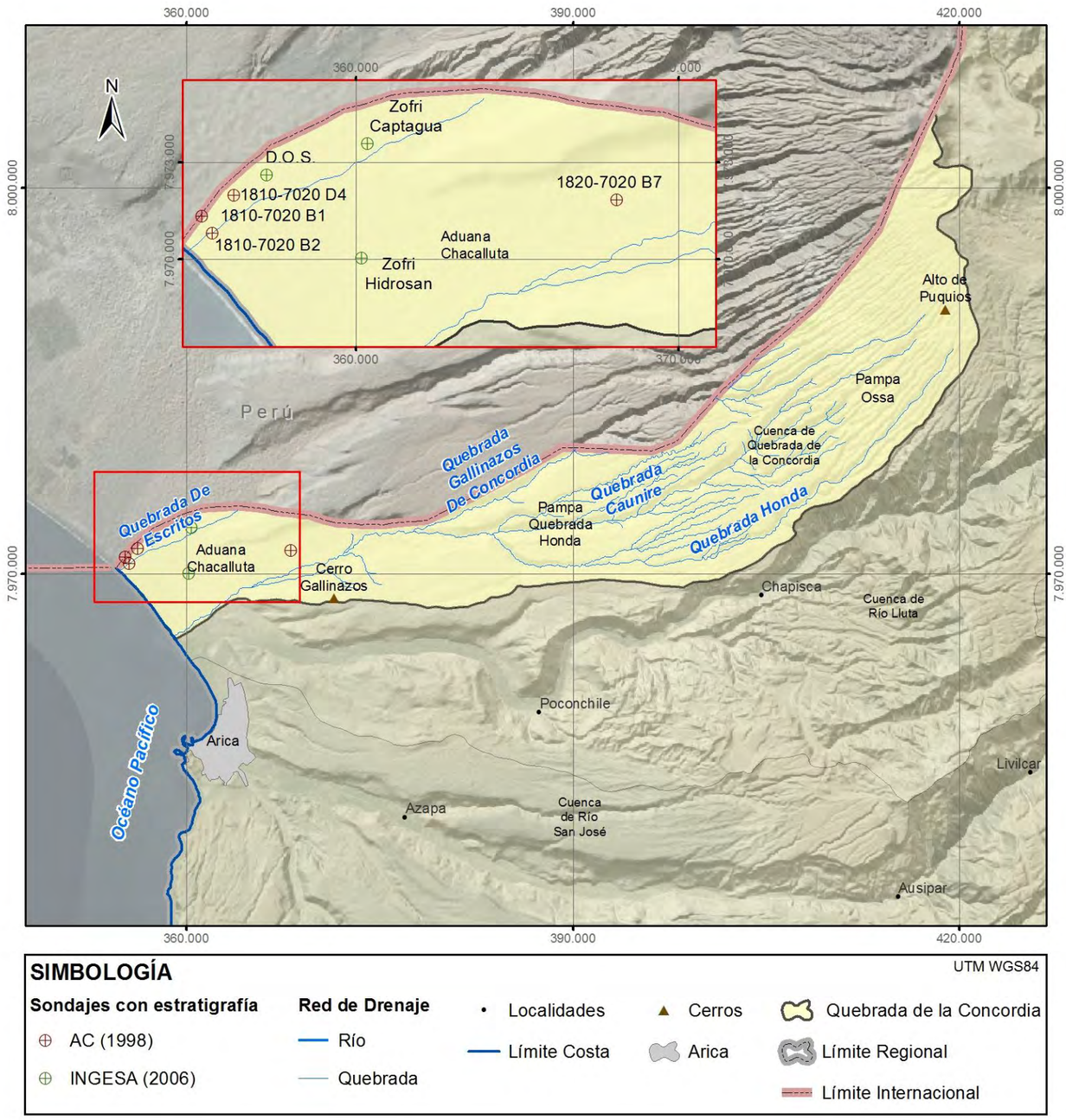


Figura 7.38 Ubicación de los sondajes con información estratigráfica en la cuenca de la quebrada La Concordia. Fuente: elaboración propia.

Para comprender el comportamiento hidrogeológico del acuífero en el sector peruano, se analizó el informe realizado por Peña *et al.* (2009). Dado que no presentaba datos duros que permitieran un mayor análisis de la cuenca, no se generó nueva información, pero de todas maneras permitió entender la existencia de aportes de flujos subterráneos desde la cuenca del río Caplina hacia la cuenca de la quebrada La Concordia en el sector bajo o costero, como se muestra en la Figura 7.39.

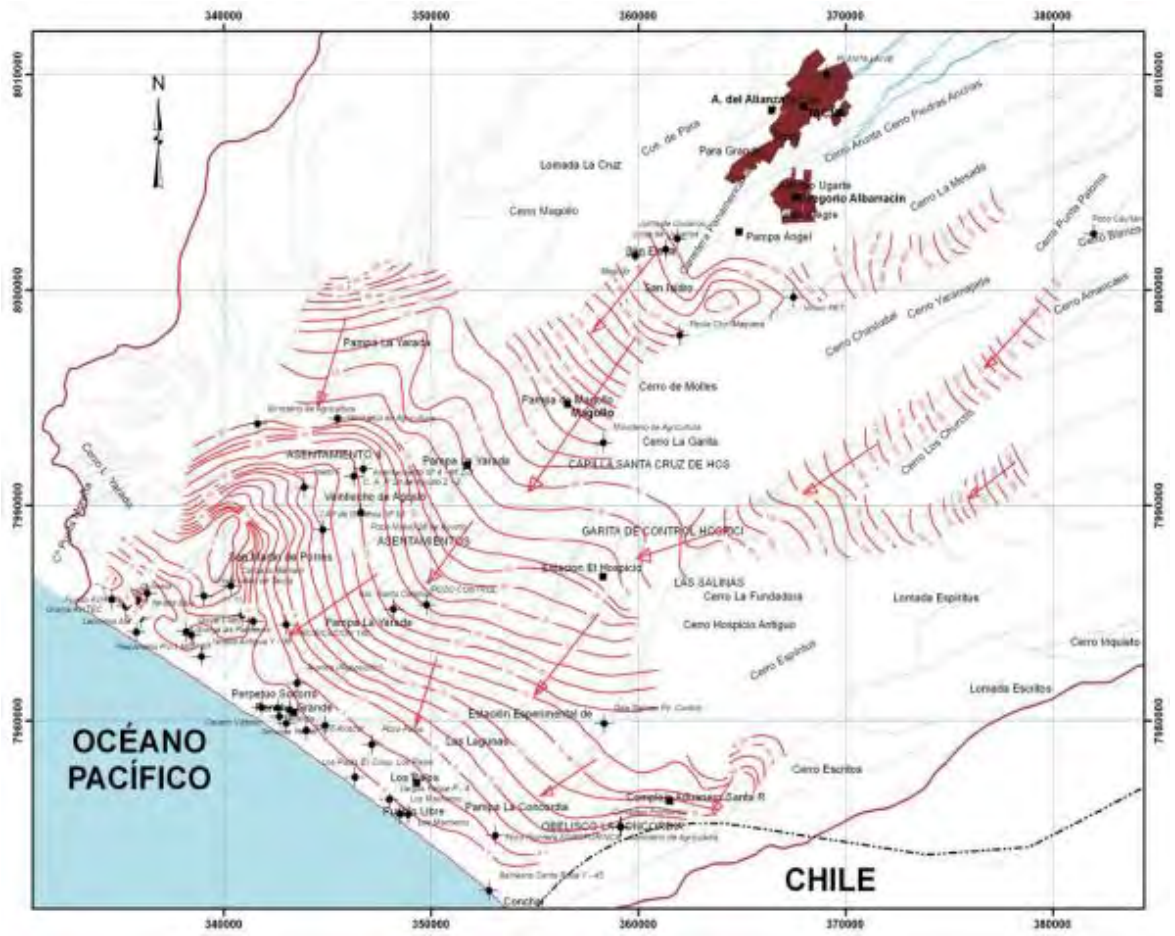


Figura 7.39 Mapa piezométrico de la cuenca del río Caplina. Fuente: Peña *et al.* (2009).

7.2.3.2 Definición y caracterización de las unidades hidrogeológicas

En esta sección se identificaron las unidades hidrogeológicas existentes en la cuenca de la quebrada La Concordia a partir de los antecedentes existentes, el mapa geológico 1:250.000 de García *et al.* (2004) y del Mapa Hidrogeológico de Chile 1:1.000.000 (DGA, 1987):

- Unidad hidrogeológica I (importancia alta): está constituida por depósitos aluviales y fluviales del Holoceno, Pleistoceno, Plioceno, depósitos litorales eólicos. El relleno del valle corresponde a sedimentos marinos, mayormente conglomerados, areniscas y limolitas con intercalaciones de conchas que engranan hacia la desembocadura con gravas, arenas, limos y cenizas volcánicas. En esta zona costera, el relleno del valle presenta un espesor mayor a los 400 m, compuesto predominantemente por arenas de granulometrías finas a medias. Esta unidad hidrogeológica presenta un carácter libre, y localmente presenta una capa de tobas que divide esta unidad acuífera en un acuífero confinado y acuífero libre (AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS, 1998; INGESA, 2006).
- Unidad hidrogeológica II (importancia media-baja): corresponden a materiales detríticos semiconsolidados y consolidados. Compuesta por depósitos coluviales y eólicos del cuaternario, de remoción en masa del Plioceno-Cuaternario, a la Formación El Diablo y Azapa. Esta unidad se caracteriza por presentar una porosidad intergranular y de carácter libre.
- Unidad hidrogeológica III (importancia media-baja): considera a la parte inferior-media de la Formación Oxaya (OMo1). Este miembro corresponde a una ignimbrita con intercalaciones sedimentarias, con una serie de fracturas y fallas con continuidad preferentemente noroeste, según García *et al.* (2004). Por lo tanto, esta unidad es un medio con una porosidad primaria baja, pero que cuenta con una permeabilidad por fracturas (secundaria).
- Unidad hidrogeológica IV (baja importancia): corresponde a la Formación Oxaya, ignimbrita Lauca, volcanes y remanentes de volcanes del Mioceno. Este miembro corresponde a la Ignimbrita Oxaya, la cual se encuentra en gran parte de la región de Arica y Parinacota. Este miembro en el sector de la cuenca no presenta grandes fracturas, ni se observan fallas importantes, por lo que su permeabilidad y potencial hidrogeológico es relativamente bajo.
- Basamento: la roca basal no ha sido identificada, dado que ningún sondaje construido en la zona ha llegado a alcanzar profundidades mayores a los 430 m, en donde se sigue observando material de relleno.

En la Tabla 7.27 se presenta un resumen de las unidades hidrogeológicas y en la Figura 7.40 se muestra un mapa de las unidades hidrogeológicas presentes en la cuenca de la quebrada La Concordia según la importancia hidrogeológica.

Tabla 7.27 Resumen de las unidades hidrogeológicas de la cuenca de la quebrada La Concordia. Fuente: elaboración propia.

Cuenca	Unidad Hidrogeológica	Descripción	Tipo de permeabilidad	Importancia hidrogeológica	Tipo de Unidad
Quebrada La Concordia	I	Depósitos aluviales y fluviales Depósitos litorales	Primaria	Alta	Acuífero
	II	Depósitos eólicos Depósitos coluviales Depósitos de remoción en masa Depósitos de avalancha de detríticos Formación Huaylas Formación El Diablo Formación Azapa	Primaria	Media-Baja	Supuestamente Acuitardo
	III	Fm Oxaya, parte inferior-media	Secundaria	Media-Baja	Supuestamente Acuitardo
	IV	Formación Oxaya (Ignimbrita) Ignimbrita Lauca Volcanes y remanentes de volcanes Mioceno	Secundaria	Baja	Supuestamente Acuícludo

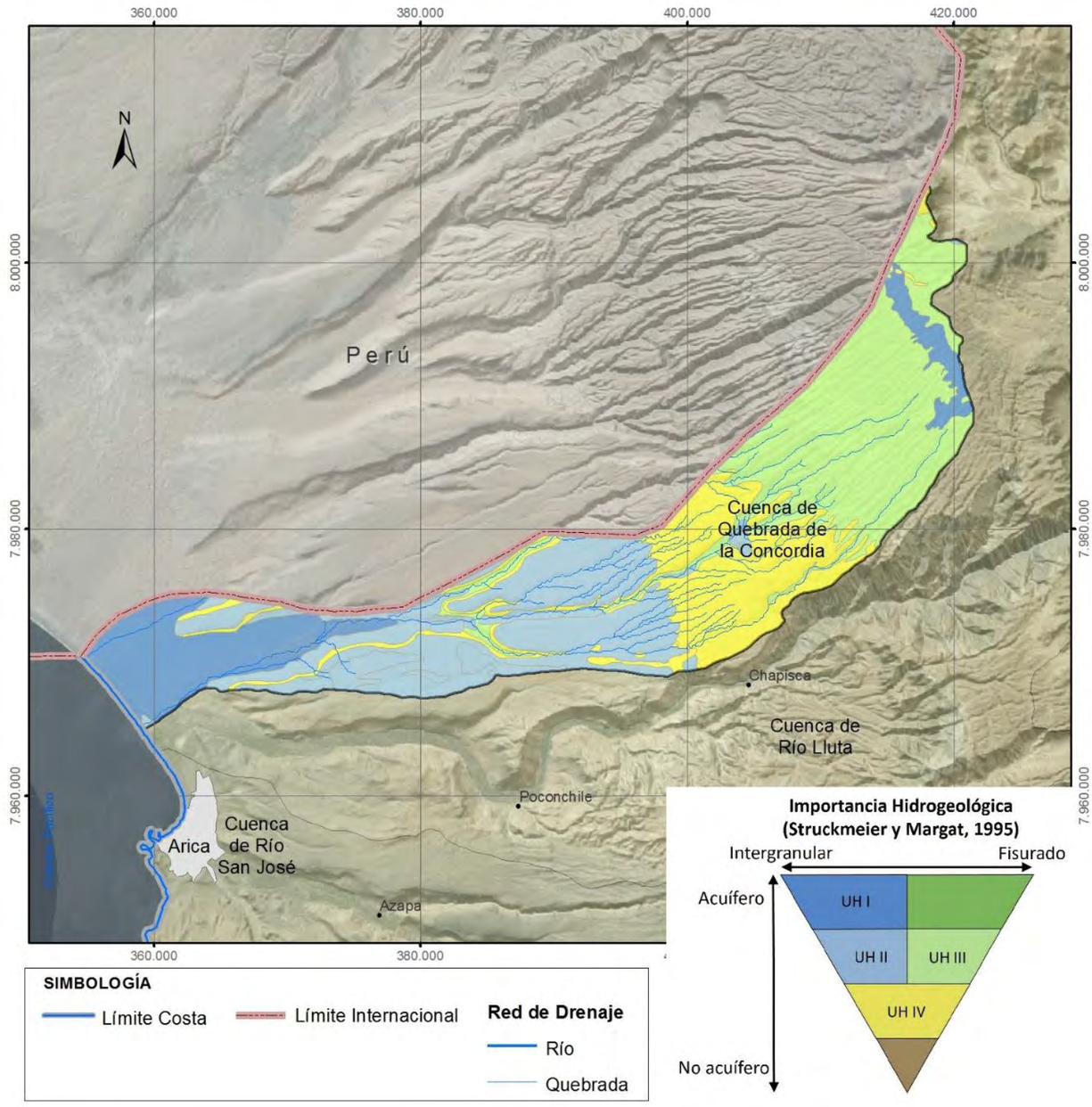


Figura 7.40 Mapa de las unidades según la importancia hidrogeológica presentes en la cuenca de la quebrada La Concordia. Fuente: elaboración propia.

7.2.3.3 Parámetros hidráulicos

Los parámetros hidráulicos de cada una de las unidades hidrogeológicas se estimaron a partir de los antecedentes y de los resultados de las pruebas de bombeo recopiladas. En las unidades que no cuentan con antecedentes se consideraron valores de parámetros hidráulicos de literatura de materiales geológicos similares.

Los parámetros hidráulicos estimados corresponden a la conductividad hidráulica (K), transmisividad (T), porosidad drenable (Sy) y coeficiente de almacenamiento (Ss).

En INGESA (2006) se interpretaron las pruebas de gasto variable y constante, en el que se obtuvieron transmisividades en un rango entre 12-46 m^2/d, una conductividad hidráulica de 2 m/día y un coeficiente de almacenamiento que varía entre 0,01 y 0,35.

En los informes de AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (1998) e INGESA (2006) se estimó la transmisividad de la Unidad Hidrogeológica I a partir de la interpretación de las pruebas de bombeo efectuadas en los pozos que se muestran en la Figura 7.41. En la Tabla 7.28 se presentan los valores de transmisividad estimados por AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (1998) e INGESA (2006) a partir de las pruebas de bombeo realizadas en los sondajes.

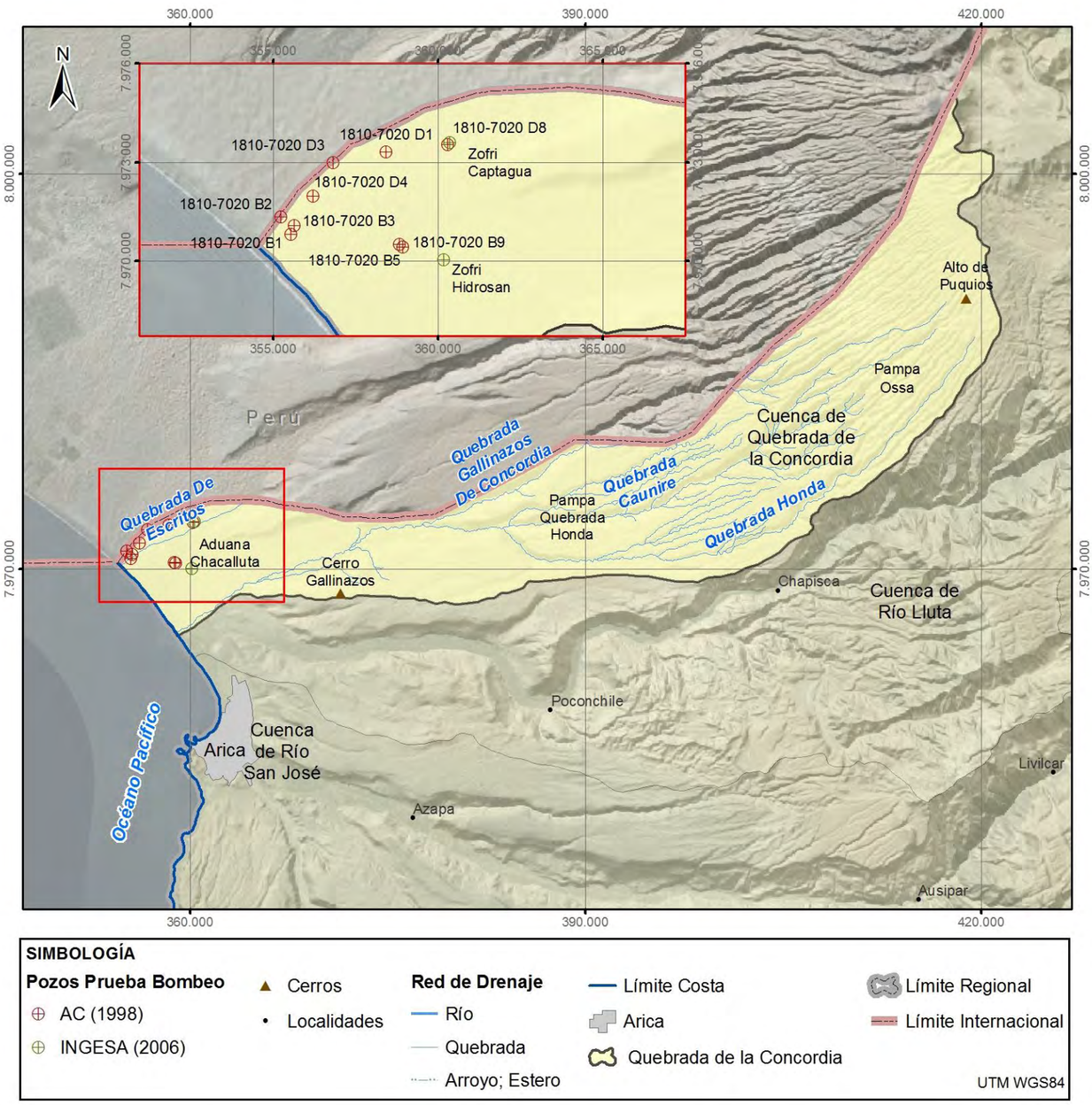


Figura 7.41 Ubicación de los sondajes con pruebas de bombeo en la cuenca de La Concordia. Fuente: elaboración propia.

Tabla 7.28 Parámetros hidráulicos obtenidos de la interpretación de las pruebas de bombeo de los pozos ubicados en la cuenca de la quebrada La Concordia. Fuente: elaboración propia.

Pozo	UTM WGS 84 H19S		Profundidad Total (m)	Profundidad Nivel de Agua (m)	Unidad Hidrogeológica	Tipo de acuífero	T (m^2/d)	K (m/d)	Fuente de dato
	Norte	Este							
1810-7020 D1	7.973.321	358.431	155,5	45,9	I	Libre	330	3	AYALA, CABRERA Y ASOC. (98)
1810-7020 D3	7.973.006	356.819	143	32,1	I	Libre	100	0,9	AYALA, CABRERA Y ASOC. (98)
1810-7020 D4	7.971.990	356.224	300,4	24,15	I	Libre	500	1,8	AYALA, CABRERA Y ASOC. (98)
1810-7020 D8	7.973.552	360.296	100	60,77	I	Libre	110	2,8	AYALA, CABRERA Y ASOC. (98)
1810-7020 B1	7.970.815	355.558	200	13,53	I	Libre	240	1,3	AYALA, CABRERA Y ASOC. (98)
1810-7020 B2	7.971.342	355.235	140	14,92	I	Libre	1.570	12,6	AYALA, CABRERA Y ASOC. (98)
1810-7020 B3	7.971.080	355.642	136	15	I	Libre	420	3,5	AYALA, CABRERA Y ASOC. (98)
1810-7020 B5	7.970.444	358.947	59	42,06	I	Libre	220	13	AYALA, CABRERA Y ASOC. (98)
1810-7020 B9	7.970.510	358.841	81	40,9	I	Libre	90	2,2	AYALA, CABRERA Y ASOC. (98)
Zofri Hidrosan	7.970.050	360.175	100	--	I	Libre	46	--	INGESA (2006)
Zofri Captagua	7.973.597	360.354	100	60,5	I	Libre	12	0,3	INGESA (2006)

En la Tabla 7.29 se resumen los parámetros hidráulicos de cada una de las unidades hidrogeológicas definidas en la cuenca quebrada La Concordia. Los valores estimados desde cada estudio específico al área de análisis incluyen los valores de transmisividad de la Unidad Hidrogeológica I, que se obtuvieron de la interpretación de las pruebas de bombeo realizado por AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (1998). INGESA (2006) estimaron el coeficiente de almacenamiento considerando el radio del propio pozo por lo que es resultado poco representativo. Por otro lado, las unidades hidrogeológicas del sector bajo también se desarrollan en la cuenca del río Lluta, por lo que se han considerado los parámetros hidráulicos estimados en los antecedentes de la cuenca del río Lluta.

Tabla 7.29 Resumen de los parámetros hidráulicos de cada unidad hidrogeológica de la cuenca de la quebrada La Concordia. Fuente: elaboración propia.

Cuenca	Unidad Hidrogeológica	Régimen	T (m^2/día)	K (m/día)	Ss (m^{-1})	Sy (%)	Comentario
Quebrada La Concordia	I	Libre	12-500	0,1-12	--	2-22	T por DGA (2011), INGESA (2006). K por pruebas de bombeo, JICA (1995), INGESA (2006) y AYALA, CABRERA y ASOC: (1998) Sy estimado por Heath (1983)
	II	Libre		$1E^{-6}$ – $5E^{-1}$	--	6-18	K estimado por Domenico y Schwartz (1990) para rocas sedimentarias Sy por materiales no consolidados Morris y Johnson (1967)
	III	Libre		$7E^{-4}$ - 26	--		Rango de K para roca fracturada por Domenico y Schwartz (1990) Rango de Ss para roca fracturada por Domenico y Mifflin (1965)
		Confinado			$3.3E^{-6}$ - $6.9E^{-5}$	--	
	IV	Libre		$8E^{-5}$ - $8E^{-1}$	--		K estimado por Aguaconsult (2010) de la Fm. Lupica Ss por Domenico y Mifflin (1965)
		Confinado			$3.3E^{-6}$ - $6.9E^{-5}$	--	

7.2.3.4 Piezometría

La determinación de los niveles piezométricos en los diversos estudios realizados en la cuenca de la quebrada La Concordia, fueron enfocados en el sector costero del acuífero. Esto se debe a que sólo en este sector se encuentran las distintas captaciones de la zona que cuentan con información. Dada la falta de información de niveles estáticos de pozos en diversos sectores de la cuenca y por la ausencia de vertientes o flujos superficiales en esta, no ha sido factible realizar un análisis piezométrico en una mayor extensión de la que se presentan en los estudios previos.

En AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (1998) se interpretó que la piezometría de la cuenca presenta un desarrollo de las líneas de flujo subterráneo desde el este hacia el oeste con un gradiente de 0,26 %, en el que las isopiezas se desarrollan paralelamente de este a oeste sin mostrar áreas de extracción de agua subterránea. En éste se comparan los niveles de la piezometría confeccionada con los valores medidos entre los años 1965 y 1966 y se comprobó que no se produjo una variación relevante en el nivel freático, debido a que la extracción de los recursos hídricos subterráneos ha sido mínima. Por otro lado, en éste se realizó un monitoreo del nivel freático en los sondajes desde mayo a diciembre de 1997, Figura 7.42 y en el que en la Figura 7.6 se muestra que los niveles se mantuvieron estables durante el tiempo de monitoreo.

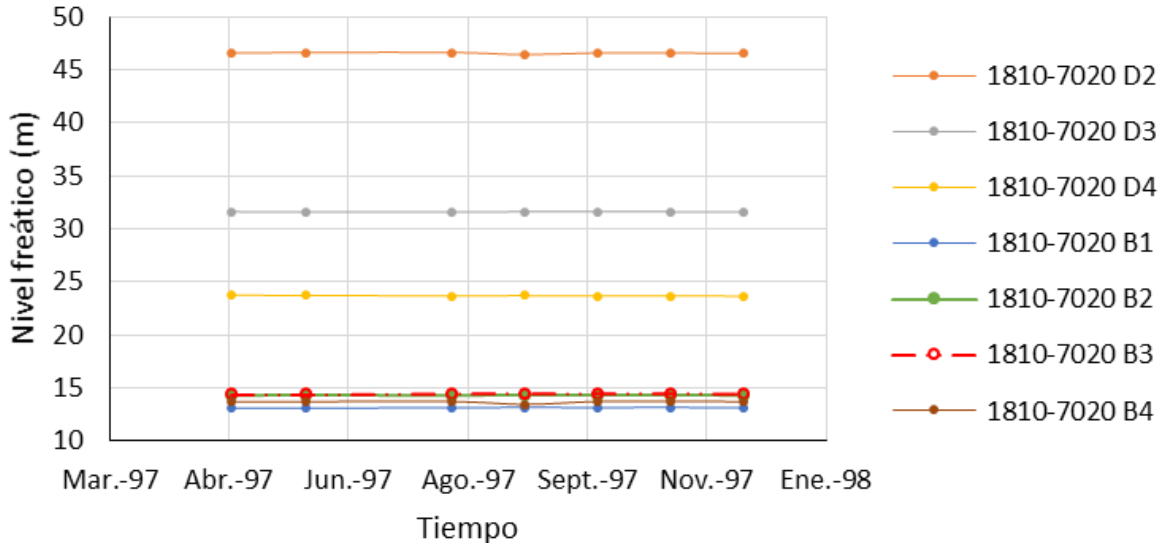


Figura 7.42 Evolución histórica de los niveles estáticos desde mayo a diciembre de 1997 en los sondajes de la cuenca de la quebrada La Concordia. Fuente: elaboración propia.

De este modo, se analizó el registro del monitoreo efectuado por la DGA de la medición del nivel freático en la Unidad Hidrogeológica I de la cuenca de la quebrada La Concordia. En la Figura 7.43 se muestra la ubicación de los pozos monitoreados por la DGA y en la Figura 7.44 se observa que los niveles piezométricos han sufrido pequeñas variaciones, pero en términos generales se han mantenido constante en el tiempo. Sin embargo, a contar de los años 2004-2005 se ha manifestado una tendencia a un descenso progresivo del nivel en todos los pozos. Es probable que el descenso de los niveles freáticos sea producto de una extracción de agua subterránea en este acuífero a contar de esos años.

Además se analizó el registro del nivel freático respecto a las precipitaciones acumuladas mensuales en las estaciones Putre (cuenca del río Lluta) y Arica en Oficina (cuenca del río San José), ya que la estación meteorológica Puquios ubicada en la cuenca de la quebrada La Concordia tiene una vigencia desde 1975 a 1981, lo cual no coincide con el periodo de análisis. De acuerdo a lo observado en la Figura 7.44, no se refleja una correlación entre las precipitaciones y el nivel piezométrico de los pozos, ya que las precipitaciones son prácticamente nulas en la zona costera (según la estación Arica Oficina) y la estación Putre se encuentra alejada y fuera de la cuenca. Para este análisis sería necesario contar con una estación meteorológica ubicada en la misma cuenca de la quebrada La Concordia.

Por otro lado, se evaluó si el nivel de los pozos ubicados en el acuífero está influenciada por cursos superficiales. Sin embargo, en la cuenca de la quebrada de La Concordia no existe escorrentía, por lo que se ha tomado en cuenta la estación fluviométrica Lluta en Panamericana, ubicada en la cuenca del río Lluta para ver alguna correlación. Según se puede observar en la Figura 7.44, el nivel piezométrico no tiene ninguna correlación con el caudal registrado en la estación fluviométrica más cercana.

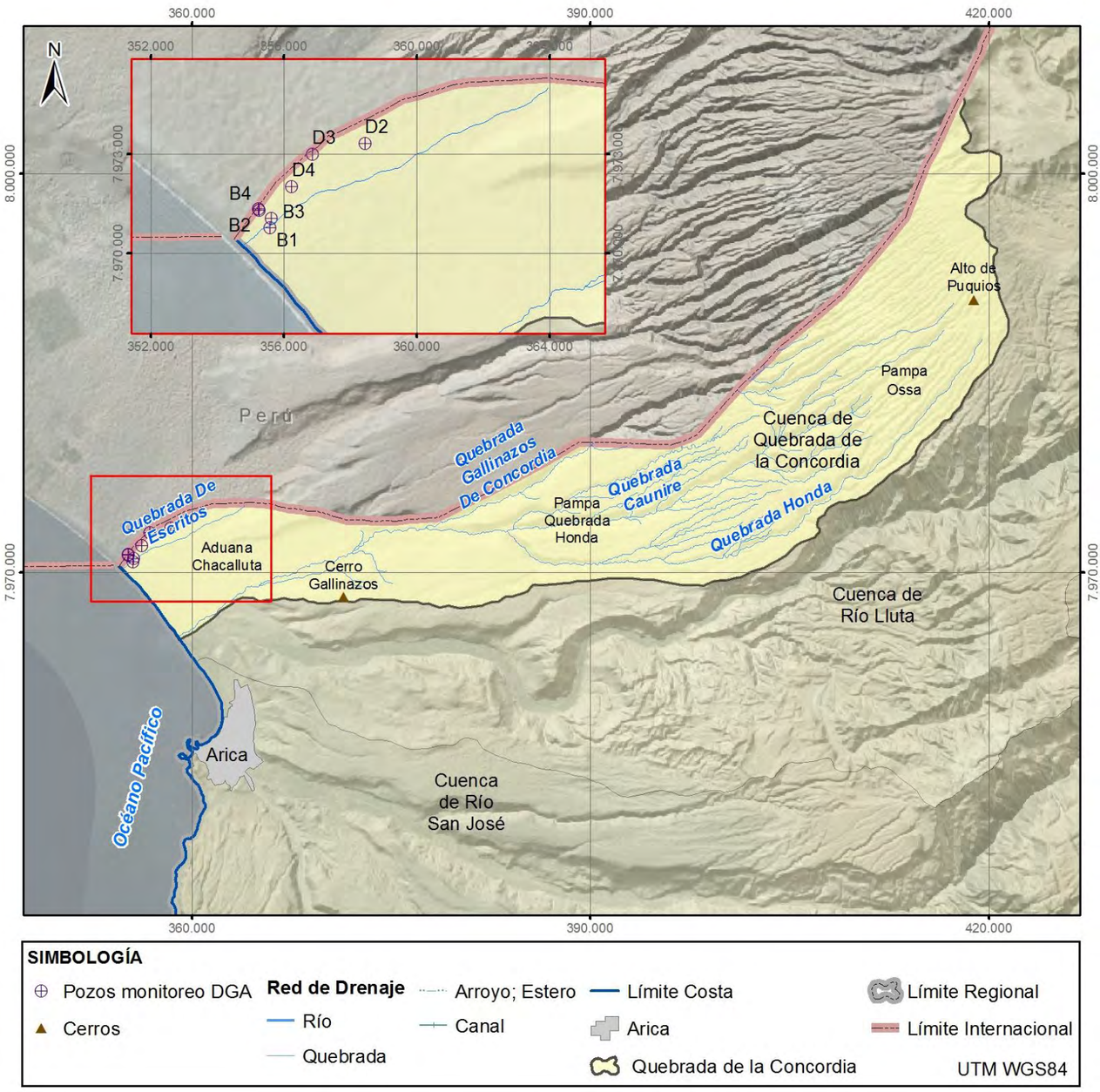


Figura 7.43 Ubicación de los pozos monitoreados históricamente por la DGA. Fuente: elaboración propia.

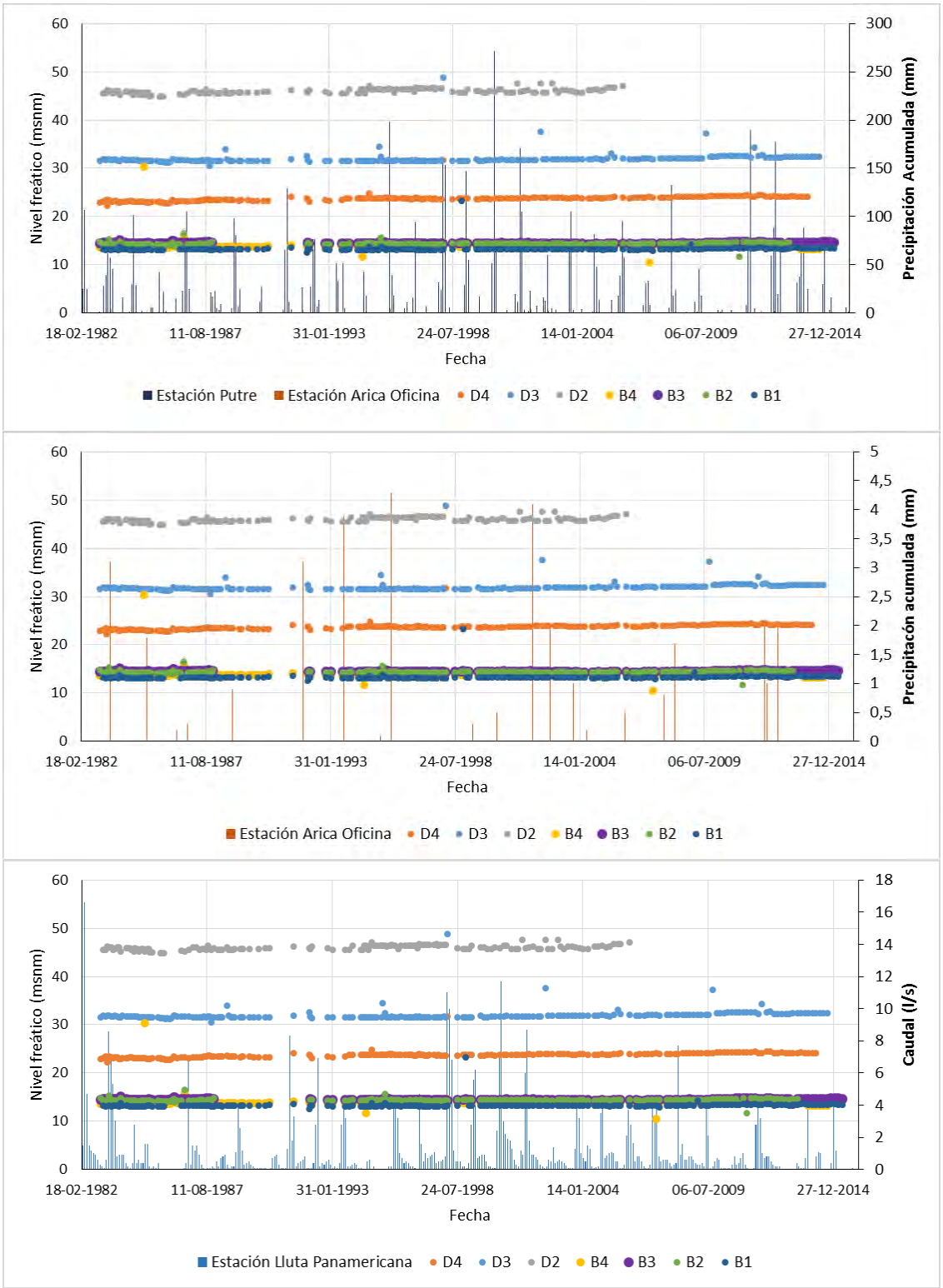


Figura 7.44 Evolución histórica de los niveles de los pozos monitoreados por la DGA en la Unidad Hidrogeológica I durante el periodo 1967-2015 con relación a la precipitación y el caudal. Fuente: elaboración propia.

En la Figura 7.45 se muestra la piezometría actualizada del sector costero del acuífero de la Unidad Hidrogeológica I de la cuenca de la quebrada La Concordia. Para la elaboración de la piezometría se consideraron los niveles existentes de los antecedentes recopilados, así como las mediciones registradas desde enero de 2006 hasta la actualidad de los pozos monitoreados por la DGA. Por lo tanto, se tomó la última medición de nivel en el pozo D-2, realizada en enero de 2006 (el que posteriormente se selló), y en el resto de los sondajes se calculó el promedio de los niveles medidos desde enero de 2006 hasta su último registro.

En esta piezometría de la Unidad I, el flujo principal de la cuenca de la quebrada La Concordia se desarrolla desde las mayores cotas hacia la línea de costa, es decir, de este a oeste con un gradiente hidráulico de 0,21 %. Además existe un flujo subterráneo secundario desde las cuencas vecinas a la cuenca de la quebrada La Concordia, por lo que se supone que existiría una recarga lateral a la Unidad Hidrogeológica I. Esto es posible, ya que la Unidad Hidrogeológica I es similar y continúa hacia la cuenca del río Caplina al norte (territorio peruano) y a la cuenca del río Lluta al sur. El gradiente hidráulico desde el río Lluta sería mayor que desde la cuenca del río Caplina, siendo de 0,4 % y 0,16 % respectivamente.

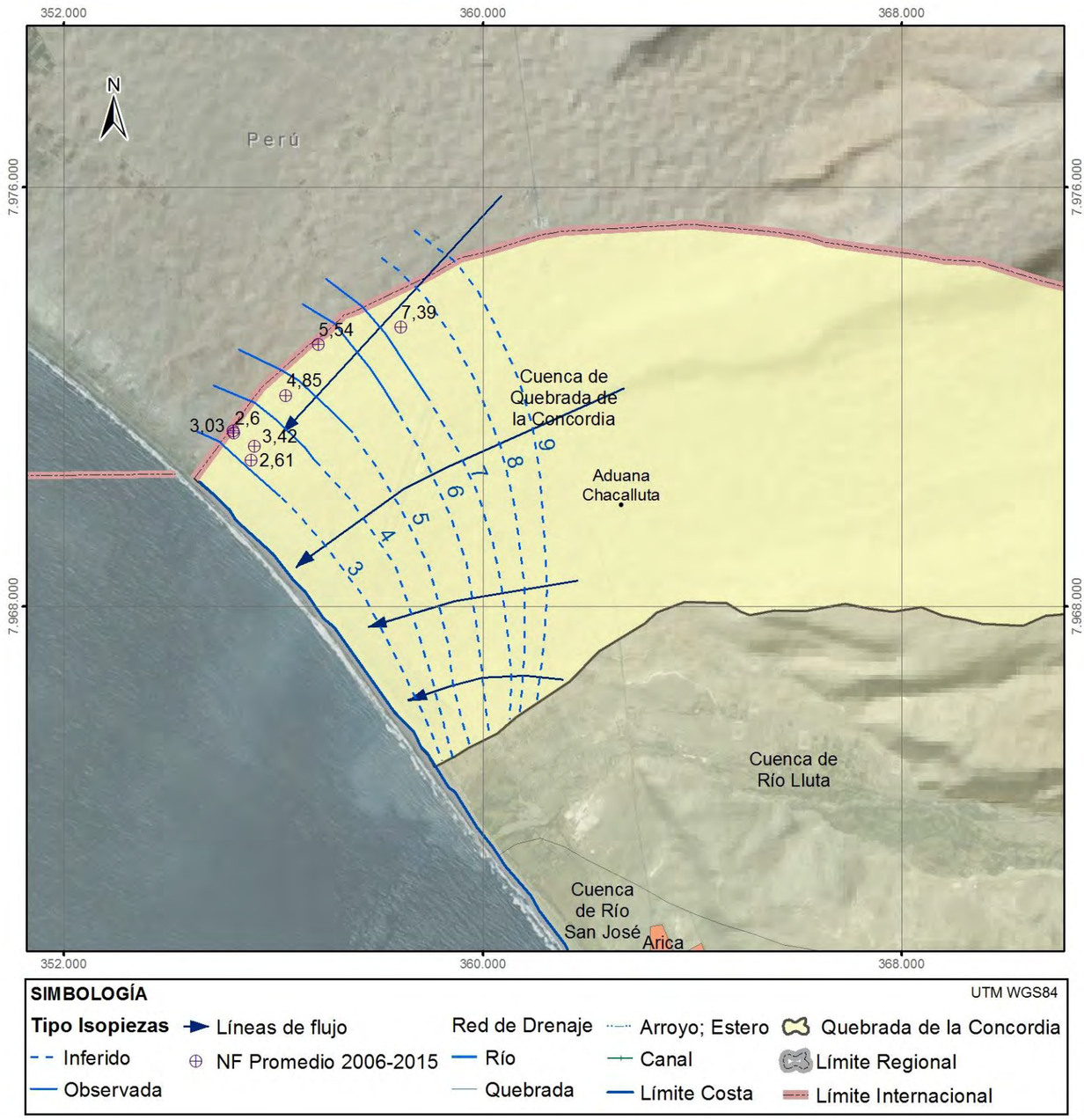


Figura 7.45 Mapa piezométrico de la Unidad Hidrogeológica I en la cuenca de la quebrada La Concordia. Fuente: elaboración propia.

7.2.4 Caracterización Hidroquímica

A continuación se describen las características de la composición hidroquímica y del fraccionamiento isotópico de las aguas subterráneas de la cuenca de la quebrada La Concordia a partir de los datos preexistentes y de las muestras tomadas en las 4 campañas de terreno.

7.2.4.1 Estudios hidroquímicos existentes

En la cuenca de la quebrada La Concordia se han tomado muestras de agua en 11 sondajes entre los años 1959 y 1996 y se analizó la calidad de las aguas subterráneas en el estudio Ayala, Cabrera y Asociados (1998b). Debido a la escasa información existente y a los 4 puntos muestreados en las 4 campañas de terreno, en el presente estudio se reinterpretaron los datos de la composición química existente para comprobar que no ha habido modificación en la hidroquímica de las aguas subterráneas de la cuenca en los últimos 60 años. En la Figura 7.46 se presenta la ubicación de las muestras analizadas hidroquímicamente en los antecedentes y en el presente estudio en la cuenca de la quebrada La Concordia.

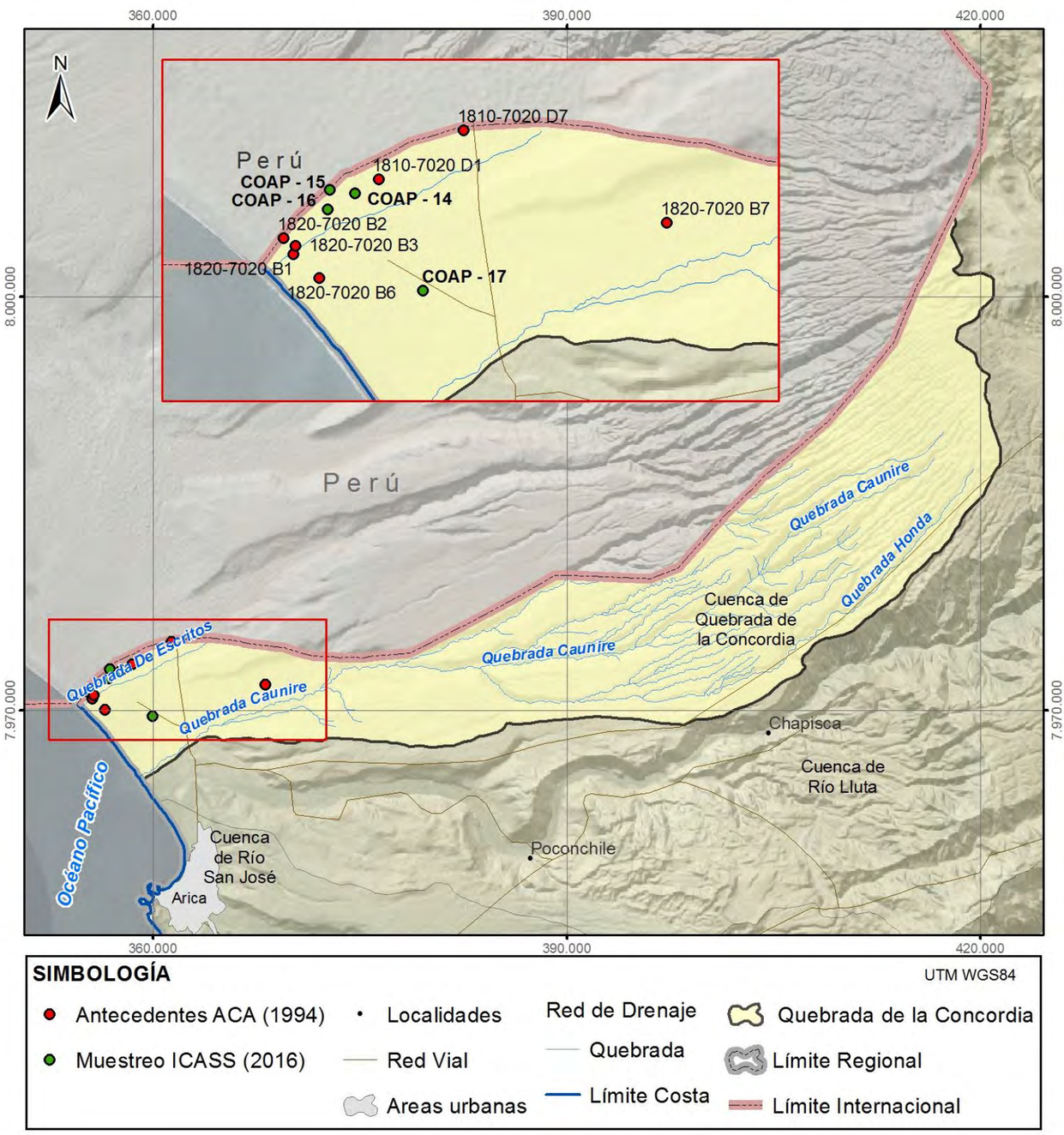


Figura 7.46 Ubicación de los puntos muestreados en los antecedentes y en el presente estudio en la cuenca de la quebrada La Concordia. Fuente elaboración propia.

En el presente estudio se reinterpretaron los resultados del análisis hidroquímico de las muestras tomadas entre 1959 y 1996. En primer lugar, se excluyeron 2 muestras de la reinterpretación, ya que presentaron un error de balance iónico superior al 10%. Por lo tanto, sólo se reinterpretaron 9 muestras de agua subterránea cuyo error de balance iónico varía entre 7,7 y -4,78%, siendo un error aceptable.

Las aguas subterráneas reinterpretadas presentan valores de pH que fluctuaron entre 6,7 y 7,4, obteniendo un valor medio de 7,1, correspondiente a un pH neutro, por lo tanto el pH se encuentra dentro de los límites permitidos (6,5<pH<8,5) en la norma chilena para agua potable NCh 409. Los valores de sólitos disueltos totales oscilan entre 582 y 2.425 mg/L, con un valor medio de 900 mg/L, superando el límite máximo de la NCh 409 (1.500 mg/L) la muestra 1820-7020-B6. En la Figura 7.47 se observó cómo disminuye el contenido de sólidos disueltos totales desde la línea de costa hacia el interior de la región.

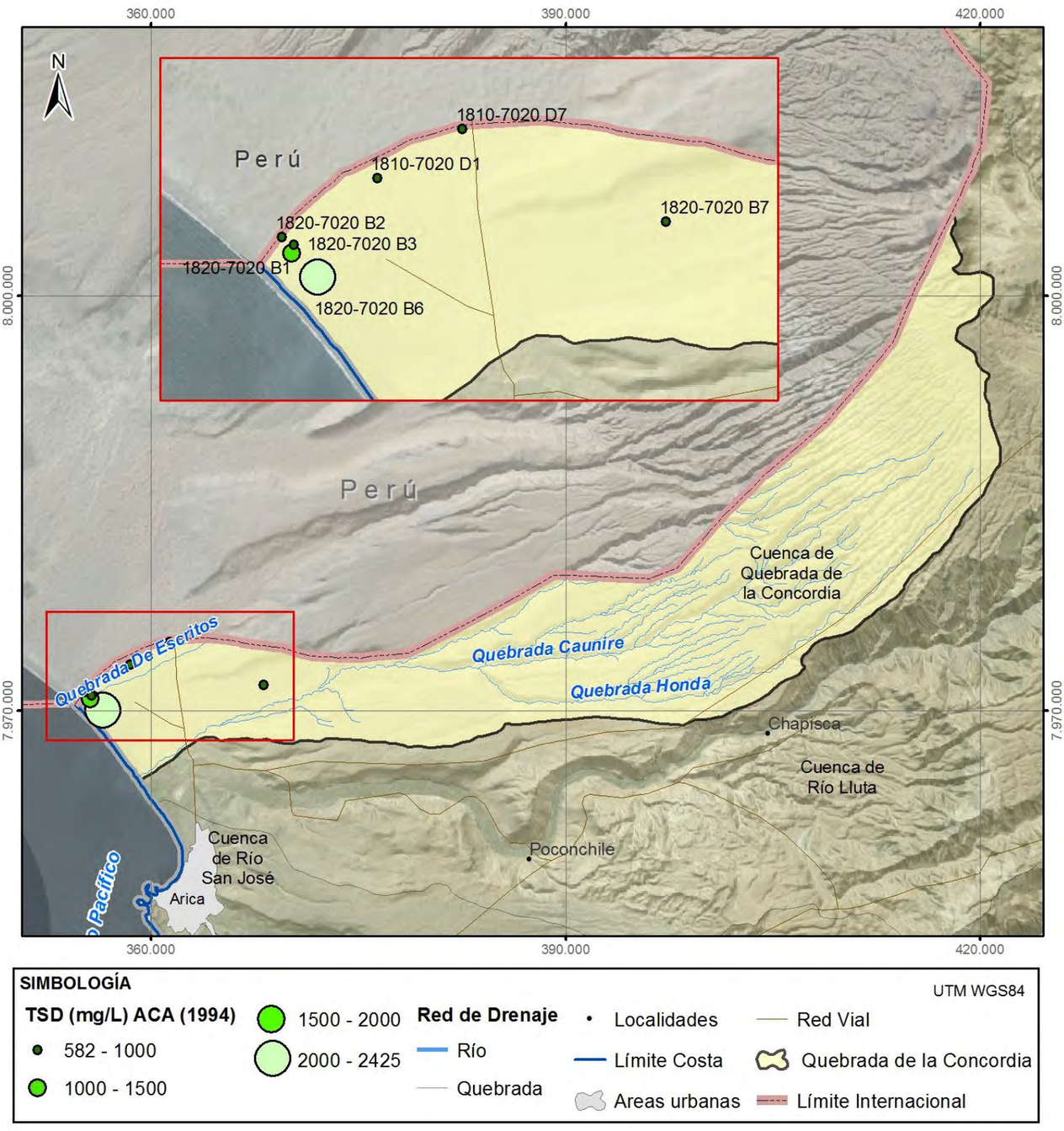


Figura 7.47 Distribución del contenido de sólidos disueltos totales de las muestras analizadas en el informe de Ayala, Cabrera y Asociados (1998b). Fuente: elaboración propia.

En la Figura 7.48 se representa la composición hidroquímica de las 9 muestras reinterpretadas mediante un diagrama de Piper. En éste se observó que 4 muestras (1820-7020 B1, 1820-7020 B2, 1820-7020 B3 y 1820-7020 B6) son aguas cloruradas sódicas aunque el anión dominante varía entre calcio y sodio, la muestra 1810-7020 B3 es cloruro-sulfatada cálcica y la muestra 1810-7020 B2 es cloruro-sulfatada sódica. En cambio, la muestra más lejana de todas (1820-7020 B7) es sulfatos-bicarbonatada sódica.

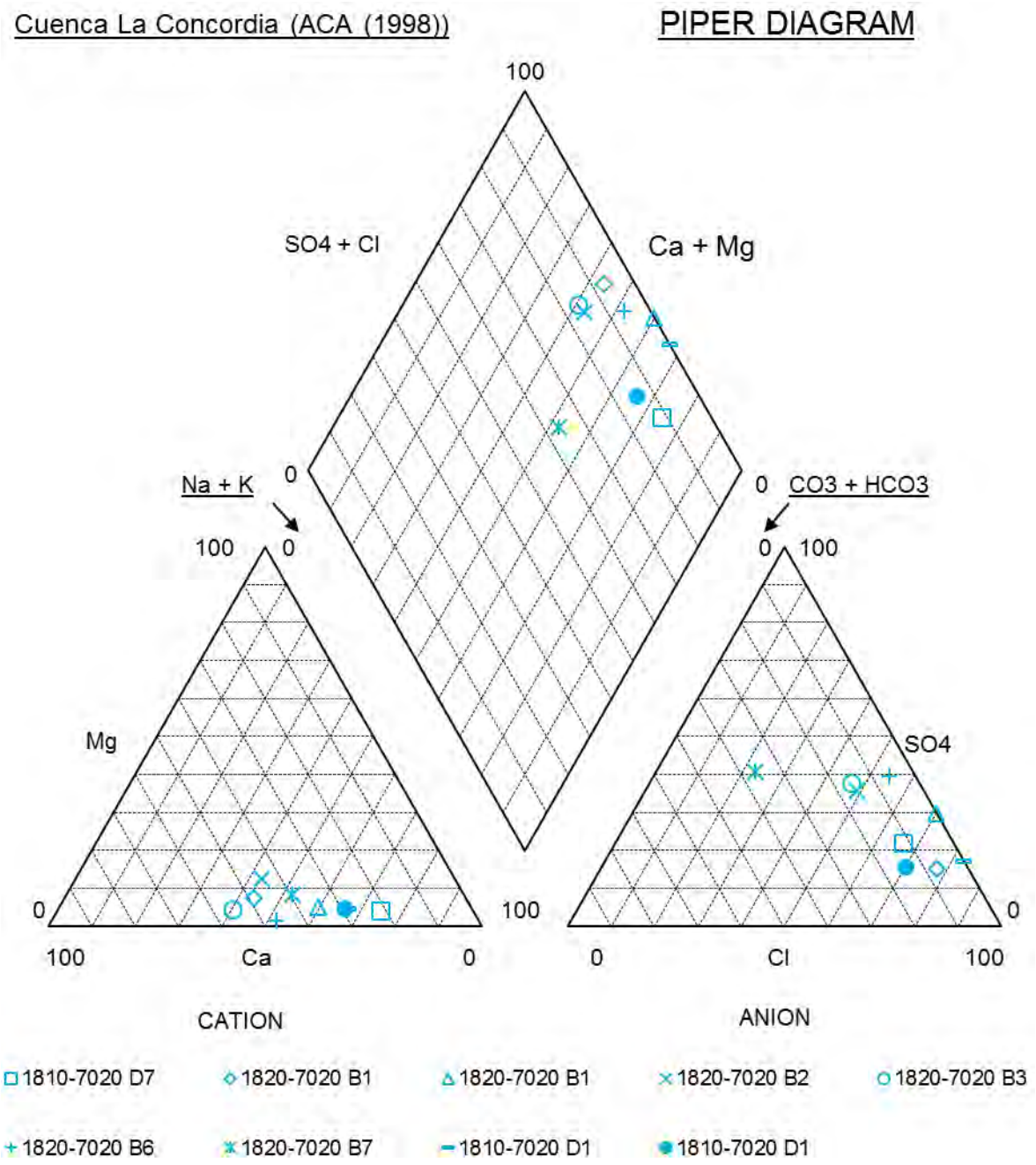


Figura 7.48 Diagrama de Piper con las muestras analizadas en Ayala, Cabrera y Asociados (1998b). Fuente: elaboración propia.

Como se puede observan en los gráficos de la Figura 7.49 existe una relación entre el contenido de sólidos totales disueltos con el contenido de los cloruros y de sulfatos, siendo en ambos casos una relación directamente proporcional, destaca la muestra 1820-7020-B6 por el alto nivel de elementos disueltos.

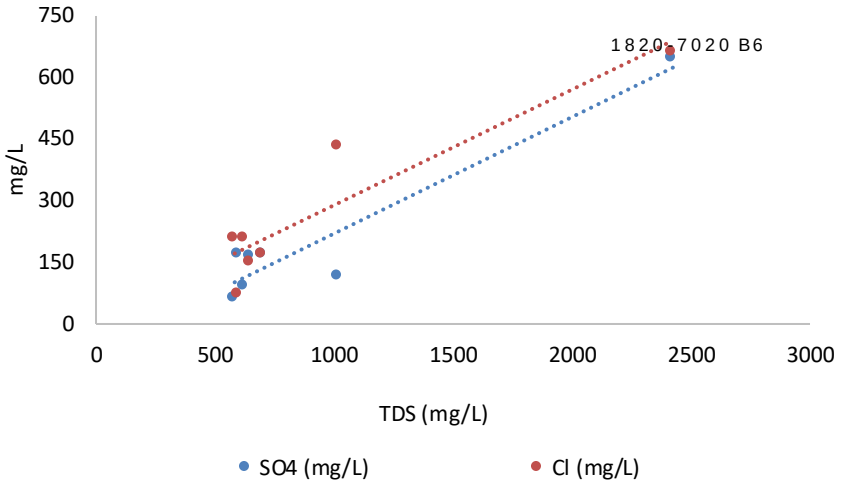


Figura 7.49 Relación entre el contenido de sólidos disueltos totales con los cloruros y con los sulfatos. Fuente: elaboración propia.

Según Ayala, Cabrera y Asociados (1998b) existe un criterio espacial en el contenido de sólidos disueltos totales y cloruros, en el que los valores de estos disminuyen a mayor distancia de la costa y también disminuye hacia el norte de la cuenca. Esto lo justifica por dos razones, por la intrusión marina y, por otro lado, a que los rellenos ubicados al sur de la cuenca están alimentados por flujos de agua subterránea provenientes de la cuenca del río Lluta mientras que la parte norte de la cuenca recibe aportes de agua subterránea de la quebrada Escritos. Sin embargo, es necesario contar con un muestreo de más puntos de agua y distribuidos homogéneamente en la cuenca para verificar el modelo de recarga del acuífero, pero en la cuenca son escasos los pozos, las vertientes y los cauces superficiales para poder analizar las aguas en diferentes puntos de la cuenca.

7.2.4.2 Campañas de muestreo

En el presente estudio se efectuaron 4 campañas de muestreo de aguas para el análisis hidroquímico e isotópico del agua. El programa de muestreo de este estudio se diseñó para complementar de manera efectiva la información disponible. En la Figura 7.50 se muestra la ubicación de las 4 muestras de agua subterránea analizadas hidroquímica e isotópicamente en las cuatro campañas de muestreo, de los cuales 3 son pozos de propiedad del Estado de Chile y un pozo es propiedad de Zofri S.A. La primera toma de muestras se realizó el 12 y 13 de noviembre de 2015, la segunda el 23 de febrero, la tercera el 01 de junio y el cuarto el 05 de agosto de 2016. Los pozos

COAP-15 y COAP-16, registrados en los antecedentes como pozos 18-10-7020 D3 y 18-10-7020 D5 respectivamente, no se conoce su profundidad ni habilitación y están sin uso, mientras que los pozos COAP-14 y COAP-17, 18-10-7020 D6 y 18-10-7020 B10 respectivamente, tienen 143 m y 100 m de profundidad y están en uso.

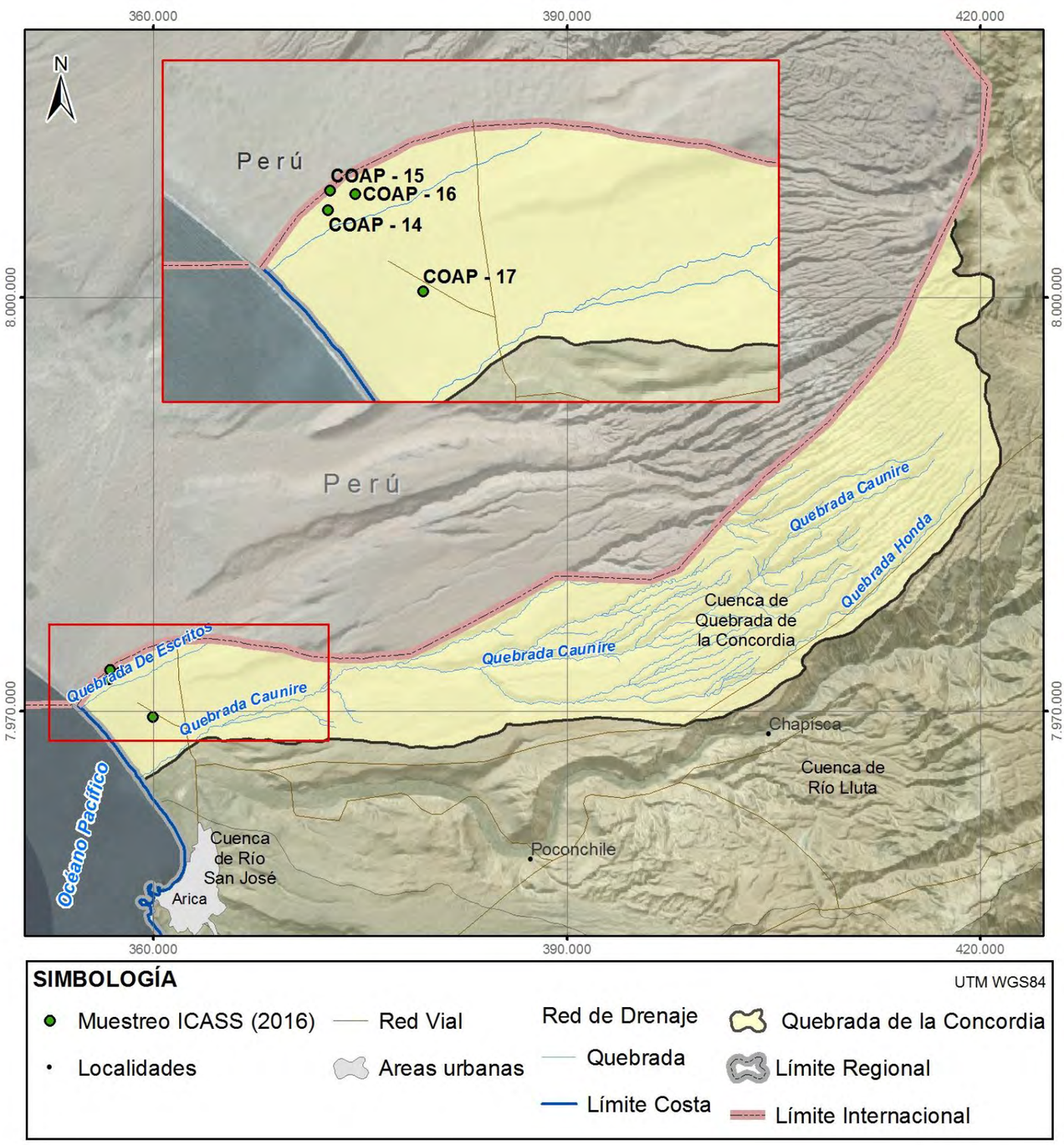


Figura 7.50 Localización de los pozos muestreados en las cuatro campañas de muestreo en la cuenca de la quebrada La Concordia. Fuente: elaboración propia.

7.2.4.3 Parámetros fisicoquímicos *in situ*

En las 4 campañas de terreno se midieron los parámetros fisicoquímicos de las mismas 4 muestras de agua subterránea que se tomaron para el análisis hidroquímico e isotópico. En esta sección se evalúan los valores de temperatura, pH, conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales (TDS) para caracterizar estos parámetros fisicoquímicos e identificar si existe alguna variación espacial y estacional de estos.

TEMPERATURA

En la Figura 7.51 se observa la variación de la temperatura en los 4 pozos en las diferentes campañas de muestreo. Se observa que la temperatura varía del mismo modo en 3 pozos a lo largo del año, siendo el pozo COAP-15 el que presenta el agua con mayor temperatura y con menor temperatura los pozos COAP-17 y COAP-16. La temperatura máxima registrada es el mes de febrero de 2016, esto es debido al aumento de temperatura ambiental durante el verano. En cambio, en el pozo COAP-14 no se registra la misma variación térmica en el tiempo, registrándose la máxima temperatura en octubre de 2015 y luego descendiendo y manteniéndose constante en el tiempo. La variación de la temperatura se debe a la temperatura ambiente y la exposición de la muestra a ésta, ya que el agua subterránea debería permanecer relativamente constante.

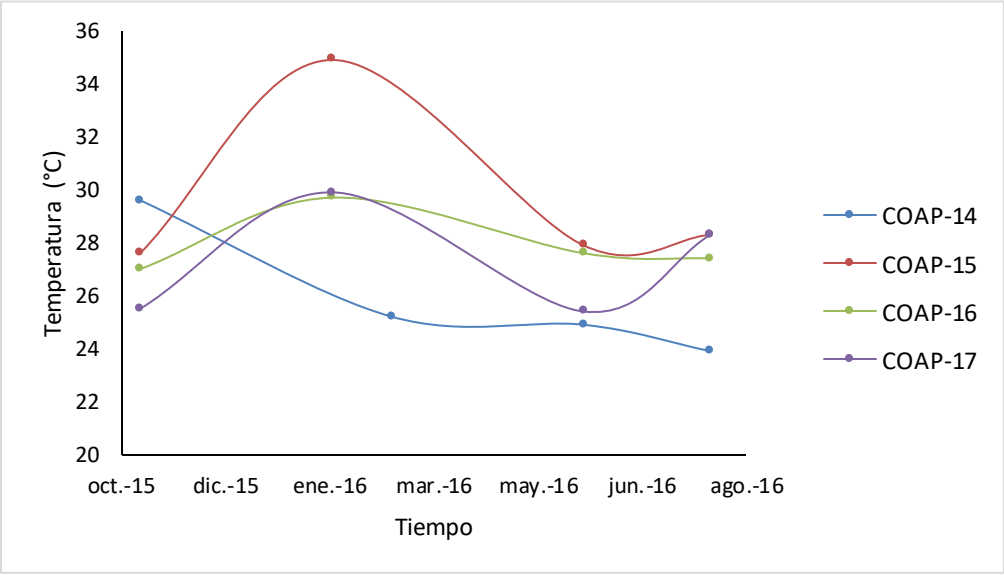


Figura 7.51 Valores de temperatura registrados en las campañas realizadas en la cuenca de la quebrada La Concordia. Fuente: elaboración propia.

La Tabla 7.30 resume los valores máximos, mínimos y promedios de temperatura registrados en las cuatro campañas de terreno realizadas durante el presente estudio en la cuenca de la quebrada La Concordia.

Tabla 7.30 Valores máximos, mínimos y promedio de temperatura registrados en cada campaña de muestreo en la cuenca de la quebrada La Concordia. Fuente: elaboración propia.

Temperatura (°C)	1°Campaña Noviembre 2015	2°Campaña Febrero 2016	3°Campaña Mayo 2016	4°Campaña Agosto 2016
Máxima	29,6	34,9	27,9	28,3
Mínima	25,5	25,2	24,9	23,9
Promedio	27,4	29,9	26,45	27

PH

El pH registrado en las 4 muestras durante el estudio se muestra en la Figura 7.52. Son aguas alcalinas cuyo pH oscila entre 8 y 7,2, sin reflejar una variación temporal.

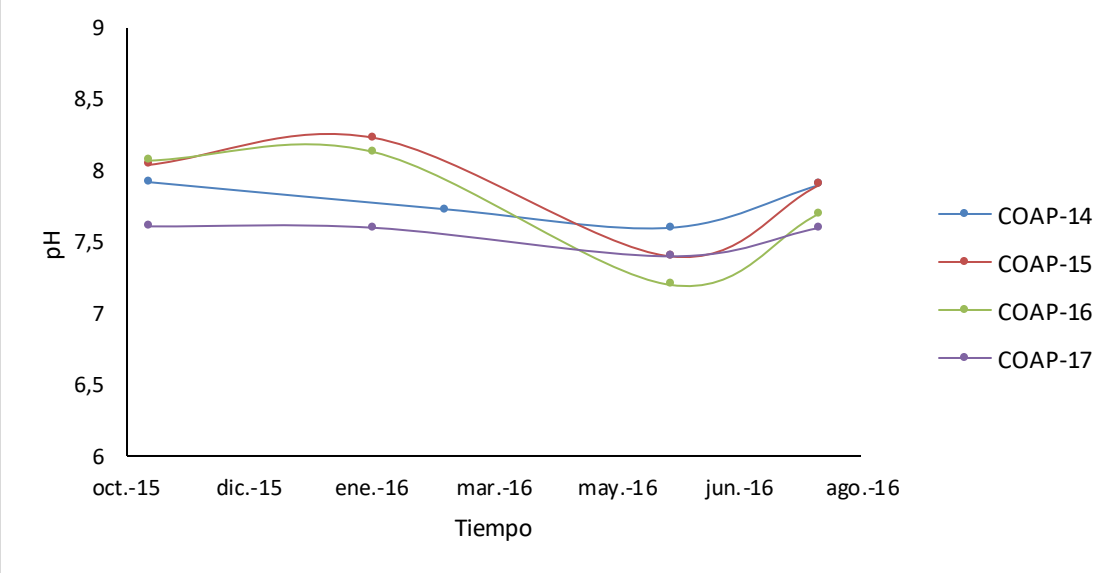


Figura 7.52 Valores de pH registrados en las campañas realizadas en la cuenca de la quebrada La Concordia. Fuente: elaboración propia.

La Tabla 7.31 resume los valores máximos, mínimos y promedios registrados de pH en las cuatro campañas de terreno realizadas en el presente estudio en la cuenca de la quebrada La Concordia. Los valores de la tercera y cuarta campañas se consideraron los obtenidos en el laboratorio, ya que los valores registrados en terreno no eran fiables.

Tabla 7.31 Valores máximos, mínimos y promedio de pH registrados en cada campaña de muestreo en la cuenca de la quebrada La Concordia. Fuente: elaboración propia.

pH	1°Campaña Noviembre 2015	2°Campaña Febrero 2016	3°Campaña Mayo 2016 (laboratorio)	4°Campaña Agosto 2016 (laboratorio)
Máxima	8,0	8,2	7,6	7,9
Mínima	7,6	7,6	7,2	7,6
Promedio	7,6	7,9	7,4	7,8

CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

En la Figura 7.53 se muestra la evolución de los valores de la conductividad eléctrica de las aguas subterráneas de la cuenca de la quebrada La Concordia. Se identifican dos grupos de muestras, por un lado los 3 pozos próximos a la frontera con Perú (COAP-14, COAP-15 y COAP-16) presentan aguas frescas con una conductividad eléctrica que varía entre 710 y 1.120 µS/cm, y por otro lado el pozo COAP-17 con aguas salobres que oscilan entre 2.800 y 3.900 µS/cm. Sin embargo, en los 4 pozos se registra el mayor valor de conductividad en el mes de febrero de 2016.

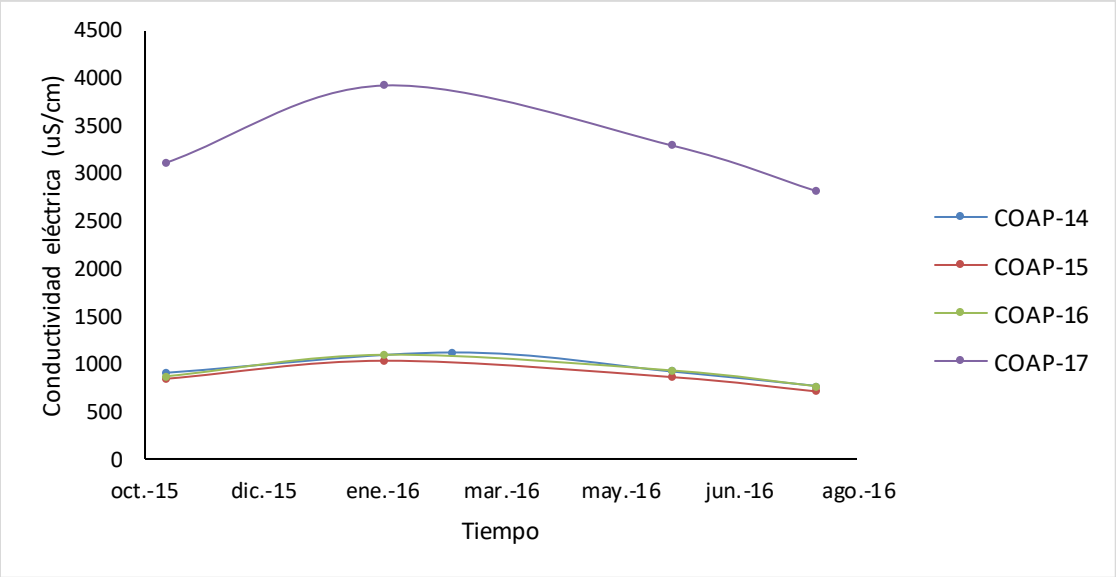


Figura 7.53 Valores de conductividad eléctrica registrados en las campañas realizadas en la cuenca de la quebrada La Concordia. Fuente: elaboración propia.

La Tabla 7.32 resume los valores máximos, mínimos y promedios registrados de conductividad eléctrica en las cuatro campañas de terreno realizadas en el presente estudio.

Tabla 7.32 Valores máximos, mínimos y promedio de conductividad eléctrica registrados en cada campaña de muestreo en la cuenca de la quebrada La Concordia. Fuente: elaboración propia.

CE (µS/cm)	1°Campaña Noviembre 2015	2°Campaña Febrero 2016	3°Campaña Mayo 2016	4°Campaña Agosto 2016
Máxima	5.734	3.920	3.290	2.810
Mínima	845	1.034	862	711
Promedio	1.433	1.793	1.501	1.264

SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES (TDS)

Del mismo modo que sucede con el parámetro de la conductividad eléctrica, en la Figura 7.54 se diferencian dos grupos de muestras. Por un lado, los 3 pozos próximos a la frontera con Perú (COAP-14, COAP-15 y COAP-16) presentan valores de TDS que varían entre 450 y 800 mg/l, y por otro lado en el pozo COAP-17 se registraron valores entre 1.800 y 2.500 mg/l. En cambio, en los 4 pozos se registra el mayor valor de TDS en el mes de febrero de 2016.

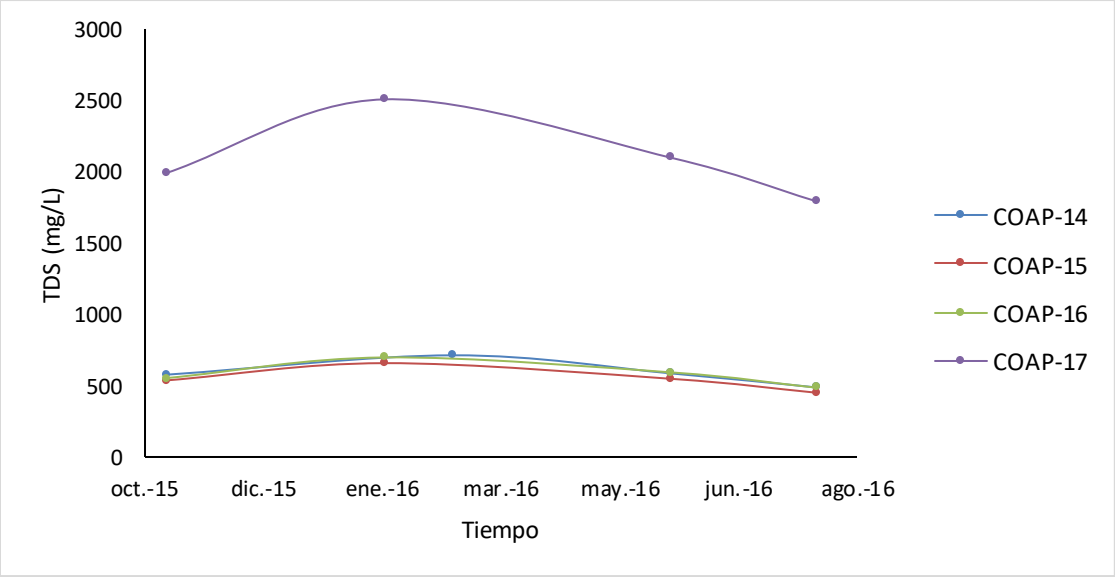


Figura 7.54 Valores de sólidos disueltos totales registrados en las campañas realizadas en la cuenca de la quebrada La Concordia. Fuente: elaboración propia.

La Tabla 7.33 resume los valores máximos, mínimos y promedios registrados de sólidos disueltos totales en las cuatro campañas de terreno realizadas en el presente estudio.

Tabla 7.33 Valores máximos, mínimos y promedio de totales de sólidos disueltos registrados en cada campaña de muestreo en la cuenca de la quebrada La Concordia. Fuente: elaboración propia.

TDS (mg/L)	1°Campaña Noviembre 2015	2°Campaña Febrero 2016	3°Campaña Mayo 2016	4°Campaña Agosto 2016
Máxima	1.993	2.510	2.100	1.796
Mínima	541	662	552	455
Promedio	918	1.148	960	808

7.2.4.4 Modelo hidroquímico de las aguas

A continuación se describen las facies principales de las aguas muestreadas en la cuenca de la quebrada La Concordia, caracterizándose por ser aguas frescas de pH neutro y con facies cloruradas sódicas, destaca el agua del pozo de propiedad de Zofri S.A. por estar más mineralizada que el resto de los pozos muestreados. En el Anexo VIII se presentan los resultados de los análisis hidroquímicos obtenidos en el laboratorio y el valor del error del balance iónico de cada muestra.

CONTROL DE CALIDAD ANÁLISIS QUÍMICOS

Los valores máximos y mínimos del error del balance iónico de la composición química obtenida en el laboratorio se presentan en la Tabla 7.34. Se consideró que el valor del error del balance iónico fue aceptable en todas las campañas efectuadas.

Tabla 7.34 Resumen de los valores máximos y mínimos del error del balance iónico de la composición química de las muestras de las cuatro campañas de muestreo en la cuenca de la quebrada La Concordia. Fuente: elaboración propia.

Error del balance iónico	1°Campaña Noviembre 2015	2°Campaña Febrero 2016	3°Campaña Mayo 2016	4°Campaña Agosto 2016
Máximo	10,36%	4,05%	3,67%	9,97%
Mínimo	0,35%	1,07%	1,77%	0,12%

ANÁLISIS DE FACIES QUÍMICAS

Para el estudio de facies químicas se abordó mediante gráficos de concentraciones de componentes, los cuales representan el quimismo de las muestras a partir de sus compuestos mayoritarios (Cl^-, HCO_3^-, SO_4^{-2}, Na^+, Ca^{+2}, K^+ y Mg^{+2}).

La composición hidroquímica de las 4 muestras analizadas en la cuenca de la quebrada La Concordia en todas las campañas de muestreo corresponde a aguas tipo cloruro sódicas. En la Figura 7.55 se presentan los datos analizados en noviembre de 2015 en color rojo, los datos obtenidos en febrero de 2016 en color azul, las muestras analizadas en mayo en color verde y de color morado las aguas tomadas en agosto de 2016. En el diagrama de Piper no se refleja la influencia del invierno altiplánico en las aguas recolectadas durante febrero de 2016, y las facies químicas de las aguas subterráneas se mantienen constantes temporal y espacialmente.

En el diagrama de Schoeller- Berkaloff se puede observar como la muestra COAP-17 presenta la misma facie hidroquímica, clorurada sódica, pero mayor grado de mineralización que el resto de las muestras en todas las campañas. Del mismo modo, se muestra en los diagramas de Stiff de la Figura 7.56 la composición hidroquímica de las muestras analizadas en la primera campaña, noviembre de 2015. Las figuras de los diagramas Stiff de resto de las campañas realizadas se incluyen en el Anexo VIII.

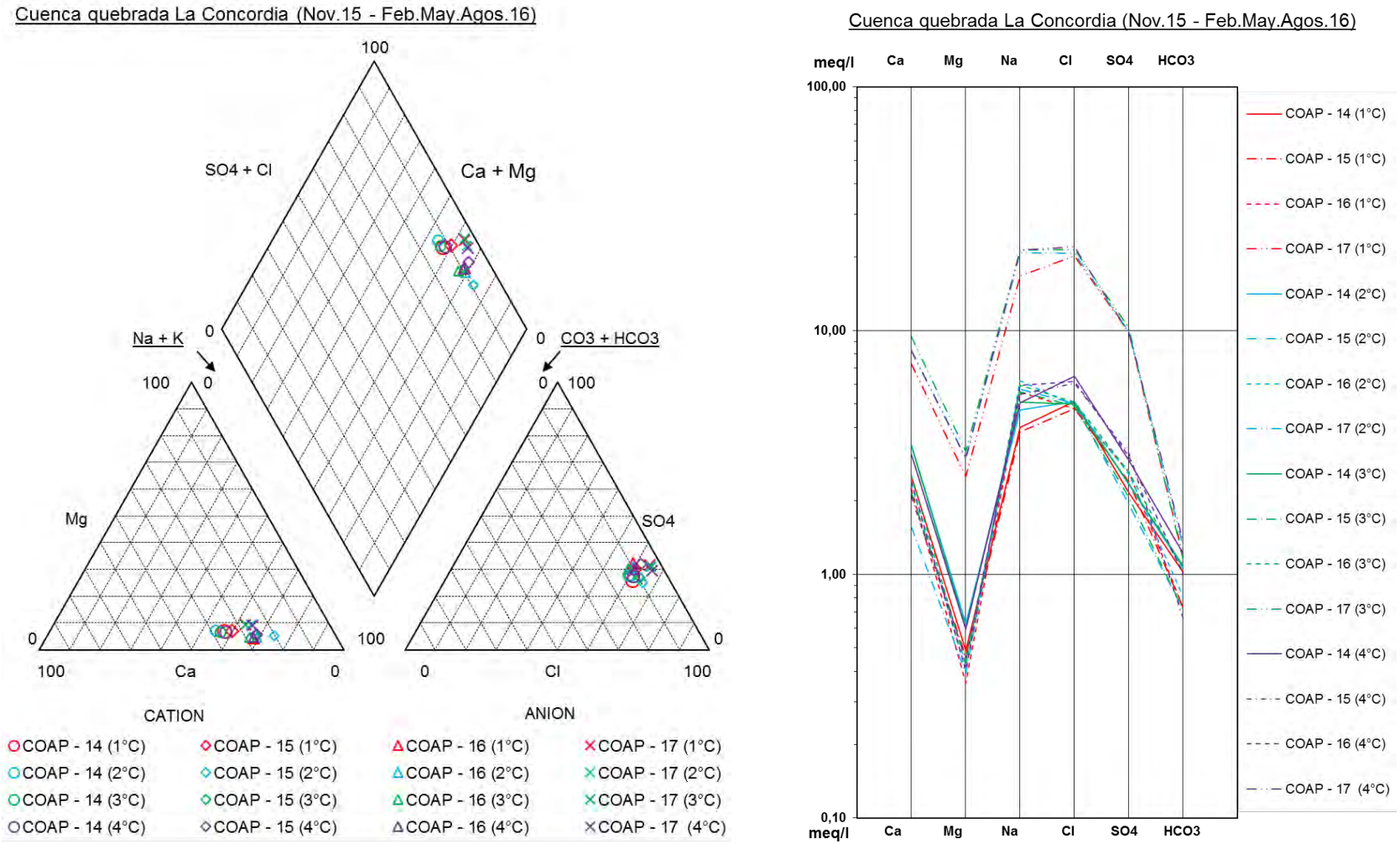


Figura 7.55 Diagramas de Piper y de Schoeller-Berkaloff de las muestras analizadas en la cuenca de la quebrada La Concordia en las diferentes campañas de muestreo. Fuente: elaboración propia.

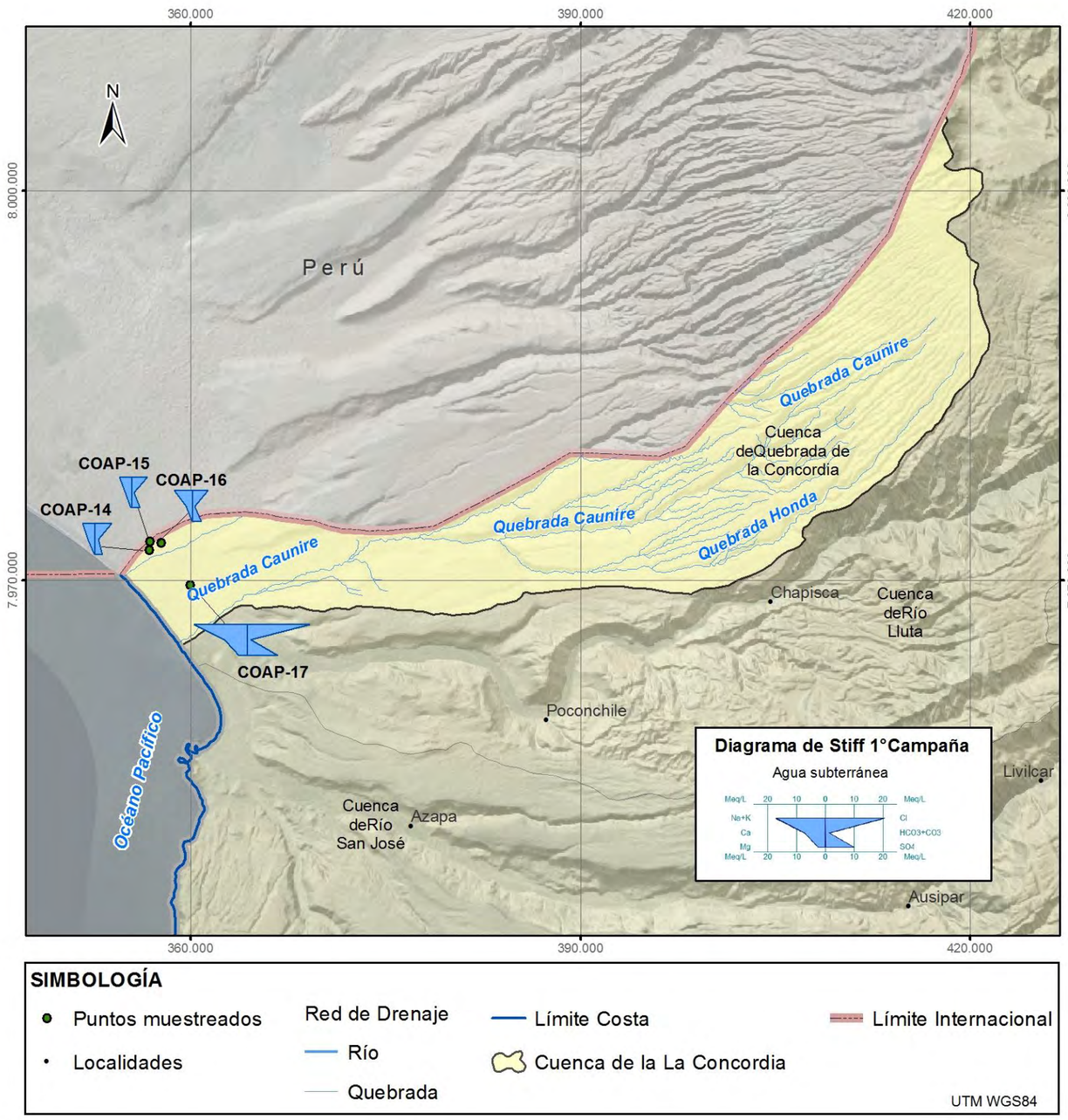


Figura 7.56 Mapa de la cuenca de La Concordia con los diagramas de Stiff de la composición química de las muestras recogidas en noviembre de 2015. Fuente: elaboración propia.

En el Anexo VIII se muestra la evolución temporal de cada elemento analizado en los 4 pozos. La muestra COAP-17 presentar el mayor contenido de bromuros, conductividad eléctrica, fluoruros, cromo, litio, sólidos totales disueltos, sodio, sulfatos, potasio, magnesio, calcio, arsénico, boro y cloruros en las campañas de muestreo. El contenido de litio en las aguas subterráneas es inferior al 0,10 mg Li/L, excepto en el pozo COAP-17 que presentó 0,40 mg Li/L en el análisis de la primera campaña de muestreo. En cambio, en los resultados obtenidos de los contenidos de aluminio total, hierro total, cobre total (durante la segunda campaña de muestreo) fueron mayores en las muestras COAP-15 y COAP-16, que en las muestras COAP-14 y COAP-17. El mayor contenido de manganeso total se presenta en la muestra COAP-15, de 0,12 mg/L y 0,25 mg/l en los análisis efectuados en febrero y agosto de 2016 respectivamente. En la muestra COAP-16 se detectó el mayor contenido de fosfato en la tercera campaña de muestreo y de plomo y zinc en la tercera campaña. En la cuarta campaña realizada en agosto de 2016 se registró un mayor contenido al resto de las campañas en las 4 muestras, variando entre 0,19 y 0,38 mg/l.

El contenido de cadmio, cianuro, mercurio y selenio fue más bajo que el límite de detención de los instrumentos de análisis en todas las muestras.

En la Figura 7.57 se muestra el contenido de nitratos en los 4 pozos durante las 4 campañas de muestreo. El contenido de nitratos registrado en noviembre de 2015 se mantiene bastante constante en los 4 pozos muestreados, mientras que en febrero de 2016 se observa un descenso brusco en la muestra COAP-15, y en mayo de 2016 se identifica un descenso del contenido de nitratos en el pozo COAP-16 y un aumento en el pozo COAP-15. En el análisis realizado en agosto de 2016 se registró el valor más alto de las 4 campañas en los todos los pozos menos en el pozo COAP-15.

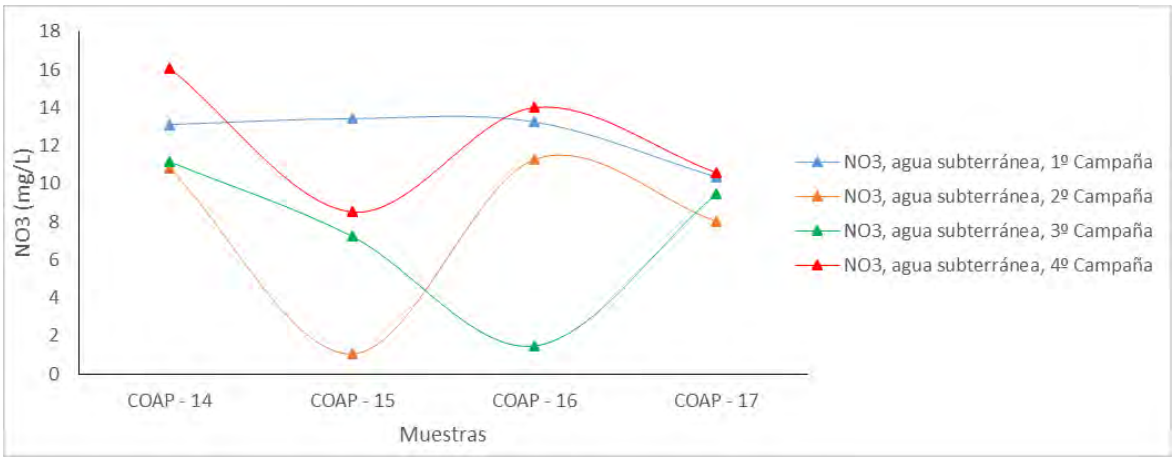


Figura 7.57 Distribución de los valores de nitratos de las muestras recogidas en la cuenca de la quebrada La Concordia. Fuente: elaboración propia.

EVOLUCIÓN DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS AGUAS

La cuenca de la quebrada La Concordia no tiene cursos superficiales de agua permanentes, por lo que sólo se han muestreado aguas subterráneas en 4 pozos existentes en el sector bajo de la cuenca en las 4 campañas efectuadas en el presente estudio. Se puede concluir que son aguas frescas de pH neutro y de facies cloruradas sódicas. Destacan las aguas del pozo propiedad de Zofri S.A. por estar más mineralizadas que el resto de la aguas muestreadas. Es importante mencionar que la composición hidroquímica de las aguas subterráneas permanece constante en el tiempo, según las campañas de terreno desarrolladas en el presente estudio y los antecedentes existentes.

Se trata de aguas frescas y neutro-alcalinas, cuyo pH varía entre 6,5 y 8,5, y la conductividad eléctrica oscila entre 700 y 1.000 µS/cm durante todo el monitoreo, menos la muestra COAP-17 cuya conductividad fluctúa entre 3.100 y 3.900 µS/cm. Estas aguas subterráneas son cloruradas sódicas y de bajo grado de mineralización, excepto la muestra COAP-17, correspondiente a un pozo de propiedad de Zofri, que presenta mayor grado de mineralización que el resto de los pozos en las diferentes campañas.

Los antecedentes proponen que la cuenca de la quebrada La Concordia, en el sector fronterizo con Perú, recibe un aporte de aguas subterráneas desde el acuífero peruano y de la zona alta de la cuenca mientras que el sector sur estaría influenciado por las

aguas subterráneas del valle del río Lluta. En la Figura 7.58 se pueden observar los diagramas de Piper y de Schoeller de las muestras analizadas en la cuenca de la quebrada de La Concordia durante las dos primeras campañas y las aguas subterráneas de los pozos de la parte baja del valle del río Lluta. Se observa que las aguas de ambas cuencas son cloruradas sódicas, siendo las aguas próximas a la frontera con Perú muy poco mineralizadas y las aguas del pozo de Zofri más mineralizadas debido a la mezcla con las aguas procedentes de la cuenca del río Lluta (aguas más mineralizadas que estas). Por lo tanto, se puede concluir que de acuerdo a los antecedentes, la parte baja de la cuenca de la quebrada La Concordia recibe aguas frescas desde el territorio peruano (norte) y de la parte alta de la cuenca, y aguas más mineralizadas desde la cuenca del río Lluta (sur).

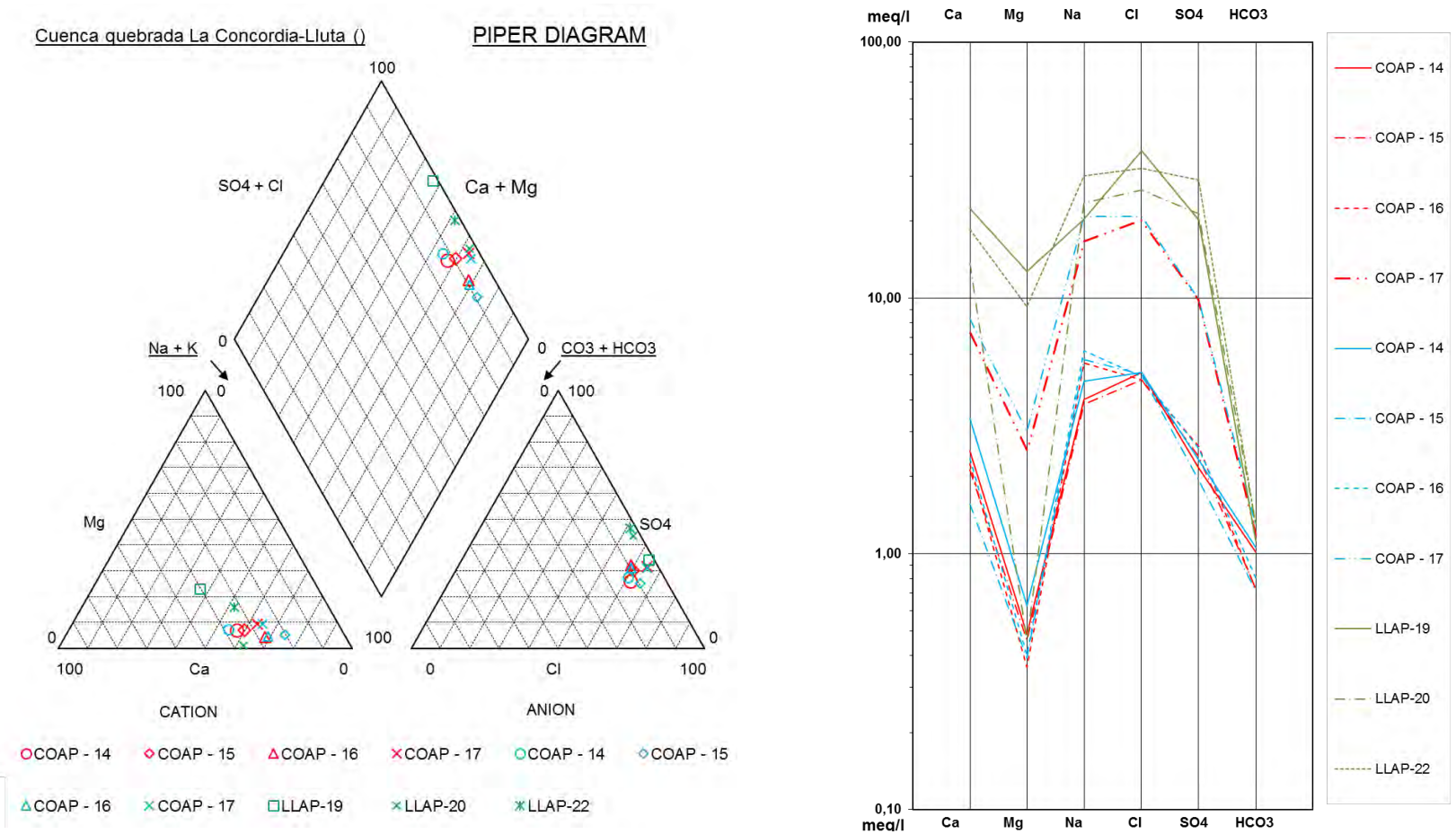


Figura 7.58 Diagramas de Piper y de Schoeller-Berkaloff de las muestras analizadas en la cuenca de la quebrada La Concordia y en los pozos del valle de la cuenca del río Lluta Fuente: elaboración propia.

Por otro lado, se evaluó si existe intrusión marina en la cuenca de la quebrada La Concordia, es decir, una contaminación del acuífero por entrada de agua del mar. Este fenómeno se origina por cambios en el equilibrio dinámico entre el agua dulce que descarga hacia el mar combinado con la diferencia de densidad entre el agua dulce y el agua salada. Para ello, se empleó la fórmula de Ghyben-Herzberg que se basa en el equilibrio de las presiones ejercida por el agua dulce y salada.

$$h_f = \alpha * h_s$$

Donde

$$\alpha = (\rho_s - \rho_f)/\rho_f$$

Como se muestra en la Figura 7.59 el espesor de la zona saturada de agua dulce, por encima del nivel del mar, se representa con h_f mientras que con h_s se representa el espesor del agua dulce por debajo del nivel del mar y ρ_f es la densidad del agua dulce, ρ_s densidad del agua del mar. Si se considera una densidad de 1 g/cm^3 para el agua dulce a 20 C y 1,025 g/cm^3 para el agua salada, la ecuación puede ser simplificada a:

$$h_f = 40 * h_s$$

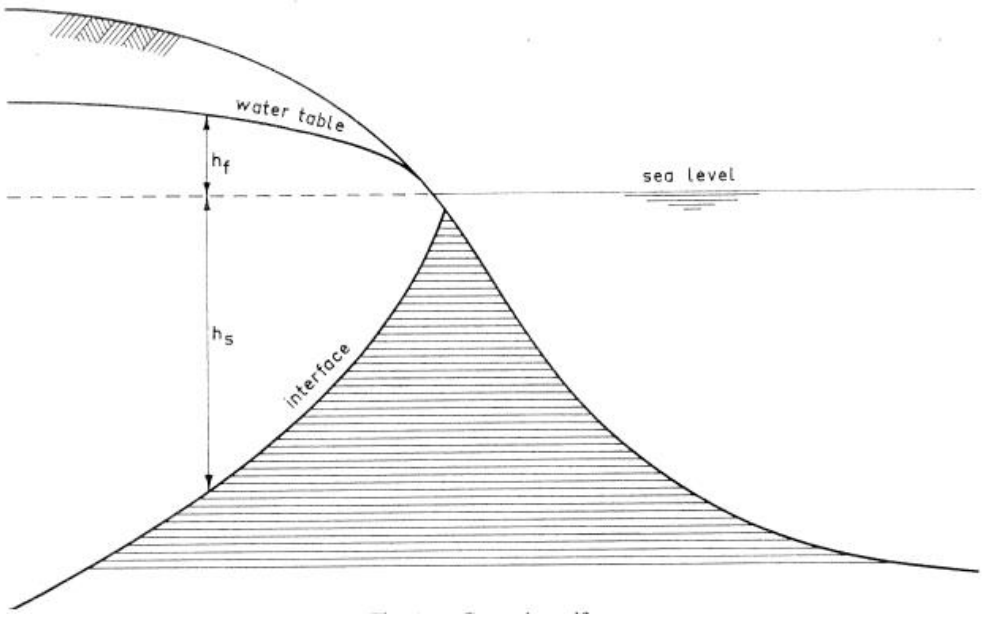


Figura 7.59 Modelo de la posición de la cuña salina en un acuífero costero. Fuente: Verruijt (1968).

A partir de las mediciones de nivel en los pozos COAP-15 y COAP-16 en noviembre de 2015 se estima que el espesor de agua dulce (h_f) es de 11 y 0,38 m respectivamente, por lo tanto el espesor de agua dulce por debajo del nivel del mar (h_s) es de 833, 433 y 15 m respectivamente. Por lo tanto, se puede concluir que en estos pozos no se está produciendo actualmente intrusión marina. En los pozos COAP-16 y COAP-17 no se puede calcular el espesor de agua dulce debido a que es un pozo de bombeo y la estimación del espesor de agua dulce realizad en pozos de observación. En la Figura 7.60 se muestra el pozo sellado propiedad de Zofri S.A, donde se tomó la muestra COAP-17.

Figura 7.60 Pozo propiedad de Zofri S.A. ubicado en la cuenca de la quebrada La Concordia. Fuente: elaboración propia.

7.2.4.5 Calidad de las aguas

La calidad de las aguas analizadas en la cuenca de la quebrada La Concordia se evaluó a partir de los límites máximos definidos por la norma chilena para agua potable, NCh409/1.Of2005. En la primera campaña de terreno, noviembre de 2015, se

analizaron los contenidos de elementos mayoritarios y minoritarios disueltos en las aguas subterráneas para poder comparar con el contenido de elementos mayoritarios y minoritarios totales analizados en el resto de campañas de muestreo. En el Anexo VIII se presentan los resultados de las mediciones de parámetros *in situ* y análisis de laboratorio, y dentro de cada tabla se remarcaron en rojo aquellos valores que sobrepasan la norma chilena para uso de agua potable NCh 409 y en verde los resultados de aluminio y boro que superen los límites establecidos en la norma de riego NCh 1.333.

Los resultados del análisis hidroquímico de los elementos disueltos de las aguas subterráneas tomadas en noviembre de 2015 indican que generalmente se tratan de aguas de buena calidad, exceptuando el contenido de sólidos disueltos totales de la muestra COAP-17 y de arsénico en las muestras COAP-16 y COAP-17. Los valores de pH están entre el rango permitido y el contenido en cobre, cromo, fluoruros, hierro, manganeso, magnesio, selenio, zinc, cadmio, cianuro, mercurio, nitratos, nitrito, razón nitratos-nitrito, plomo, amoniaco y sulfatos están por debajo de los límites establecidos en la norma chilena NCh 409/1.Of2005. La muestra COAP-17 presenta 2.133 mg/L de sólidos disueltos totales mientras que la norma establece que no puede superar los 1.500 mg/L. Esta muestra también contiene 716 mg/L de cloruros cuando la norma limita a 400 mg Cl/L. El límite de arsénico es de 0,01 mg/L, sin embargo las muestras COAP-16 y COAP-17 contienen 0,15 y 0,038 mg/L respectivamente.

Los resultados obtenidos del muestreo desarrollado en febrero de 2016 indicaron que los elementos totales y parámetros respetan los límites establecidos en la norma chilena NCh 409 en todas las aguas, excepto el arsénico total en la muestra COAP-16 y COAP-17, además en la muestra COAP-17 excede el contenido de cloruros y sólidos disueltos, del mismo modo y similar valor que en la primera campaña. En cambio, el hierro se supera en las muestras COAP-14 y COAP-15, además en la muestra COAP-15 se supera el contenido de manganeso. Por lo tanto, ninguna de las muestras es aptas para el consumo humano. Por otro lado, si se comparan los resultados del laboratorio con la norma de riego NCh 1.333 todas las muestras respetan los límites de aluminio y boro establecido menos la muestra COAP-17 que supera el valor de boro, de 8,8 mg/L.

En el análisis hidroquímico realizado en mayo de 2016 se detectaron en el pozo COAP-17 contenidos de arsénico, cloruros, cromo y sólidos disueltos totales superiores a los límites establecidos en la norma chilena NCh 409. En el pozo COAP-16 superaban los

límites el arsénico, hierro y plomo total, mientras que en los pozos COAP-14 y COAP-15 superaban el nivel de hierro total. Por lo tanto, ningún pozo presenta agua subterránea para uso de agua potable. Además, las 4 muestras respetan el límite de aluminio establecido en la norma de riego NCh 1.333, pero las muestras COAP-15 y COAP-17 superan el nivel de boro establecido en dicha norma, 0,77 y 20,7 mg/l respectivamente.

El análisis hidroquímico de las aguas muestreadas en agosto de 2016 indicaron que de las 4 muestras, únicamente la muestra COAP-14 es apta para el consumo humano. La muestra COAP-15 supera el contenido de hierro y magnesio total, la muestra COAP-16 excede el límite de arsénico total y la muestra COAP-17 supera el nivel de arsénico, cloruros y sólidos disueltos totales que establece la norma NCH 409. Por otro lado, si se compara la composición hidroquímica de las aguas analizadas con la norma de riego NCh 1.333, las 4 muestras respetan el límite de aluminio, pero las muestras COAP-14, COAP-15 y COAP-17 superan el nivel de boro establecido en dicha norma.

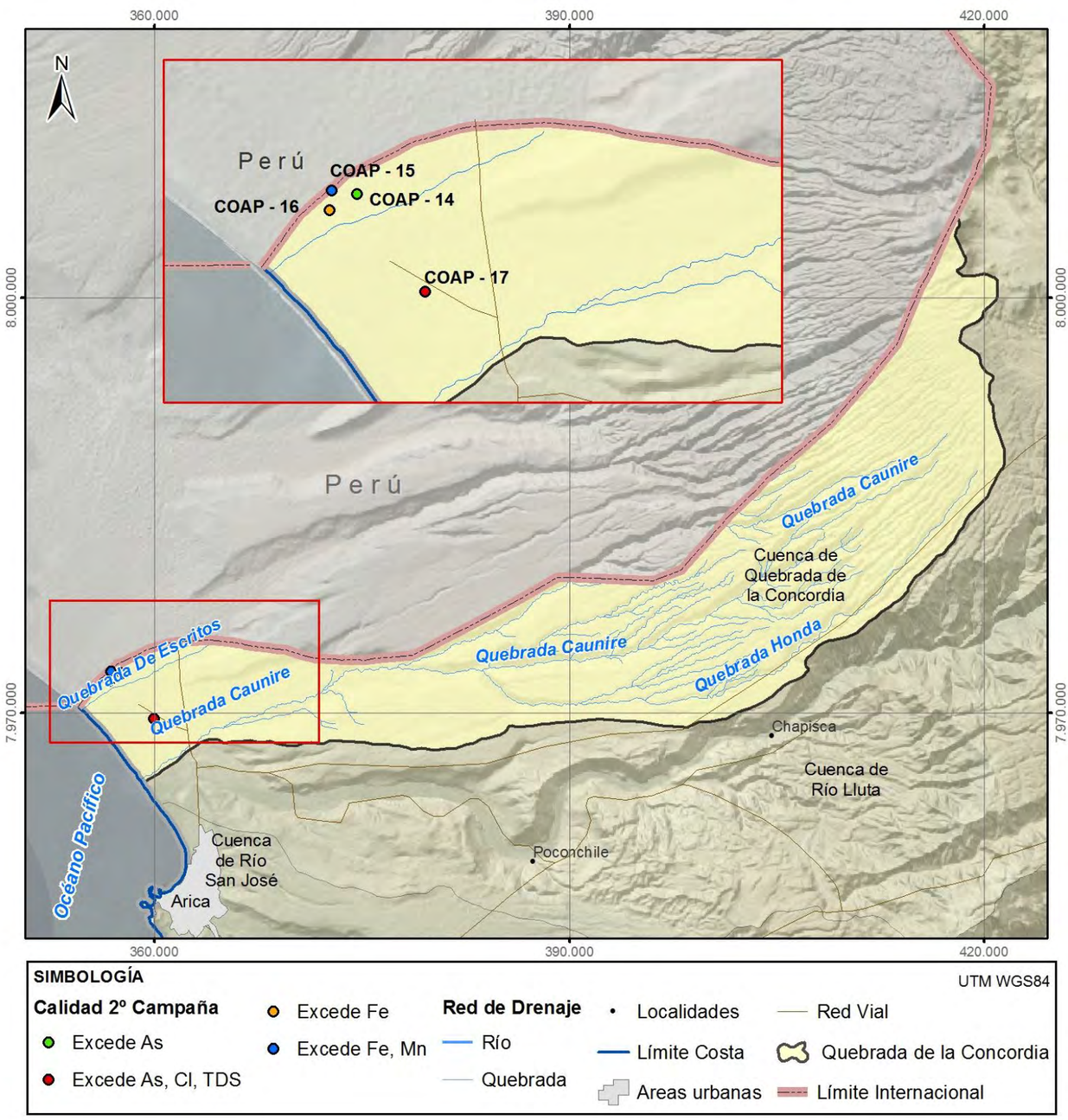


Figura 7.61 Muestras que superan los límites establecidos en NCh 409/1 en diferentes elementos de las muestras tomadas en la cuenca de la quebrada La Concordia en la segunda campaña, febrero de 2016. Fuente: elaboración propia.

7.2.4.6 Isotopía de las aguas

En la cuenca de la quebrada La Concordia no existen antecedentes de datos isotópicos, únicamente se analizaron los isótopos estables de oxígeno ($\delta^{18}O$) y deuterio (δD) en las muestras recolectadas en el presente estudio. A continuación se presenta la interpretación de los valores de la composición isotópica obtenidos en las 4 campañas de muestreo. En la Tabla 7.35 se indican los valores máximos y mínimos de oxígeno 18 y deuterio obtenidos en cada campaña de muestreo.

Tabla 7.35 Resumen de los valores máximos y mínimos de oxígeno y deuterio obtenidos en las cuatro campañas de muestreo en la cuenca de la quebrada La Concordia. Fuente: elaboración propia.

		1°Campaña Noviembre 2015	2°Campaña Febrero 2016	3°Campaña Mayo 2016	4°Campaña Agosto 2016
$\delta^{18}O$‰ SMOW	Máximo	-11,04	-10,88	-10,75	-11,35
	Mínimo	-12,17	-11,82	-11,61	-11,90
δD‰ SMOW	Máximo	-86,5	-85,98	-86,60	-87,12
	Mínimo	-91,17	-89,68	-91,07	-90,38

En la Figura 7.62 se presentan de color verde las muestras analizadas en la primera campaña de terreno de noviembre de 2015, de color azul las muestras tomadas en la segunda campaña de febrero de 2016, de color rojo las muestras recogidas en la tercera campaña de mayo de 2016, y de color naranjo las aguas subterráneas analizadas en agosto de 2016. En el gráfico $\delta^{18}O$-δD se muestra a modo de referencia la Recta Meteórica Mundial (RMM) y la recta de pendiente 4 representativa de la pendiente de fraccionamiento por evaporación probablemente desde el suelo.

Las aguas subterráneas analizadas durante las 4 campaña se ajustaron más o menos a la recta pendiente 4 por lo que sugiere que son aguas que sufrieron evaporación seguramente desde el suelo, sobre todo las muestras de los pozos COAP-15 y COAP-16. Las muestras COAP-14 y COAP-17 son aguas ligeramente más empobrecidas isotópicamente que las muestras COAP-16 y COAP-15. La muestra COAP-14 se acerca más a la recta meteórica mundial en la primera y segunda campaña, mientras que la muestra COAP-17 en la tercera campaña se aleja de la recta con pendiente 4.

No se detecta una evolución temporal en la composición isotópica de la molécula del agua en las muestras analizadas.

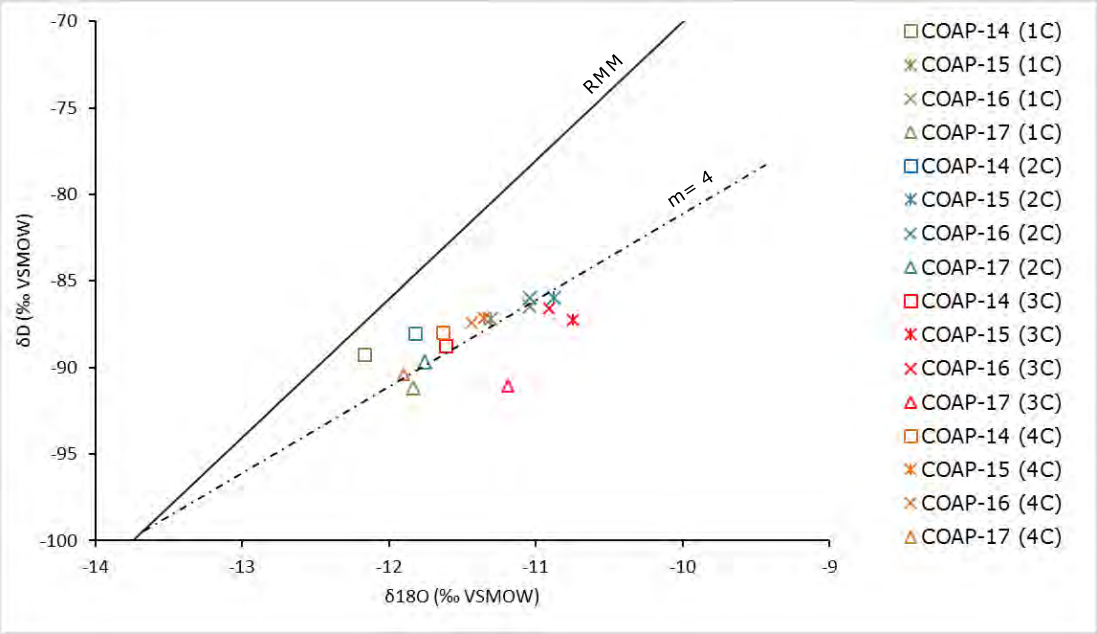


Figura 7.62 **Relación $\delta^{18}O/\delta D$ de las** muestras tomadas en la cuenca de la quebrada La Concordia en las cuatro campañas de muestreo. Fuente: elaboración propia.

7.2.5 Modelo Conceptual

La cuenca de la quebrada La Concordia se encuentra ubicada al extremo norte de la región y tiene una superficie de 720,4 km^2 en el territorio chileno. Limita al norte con las cuencas del río Caplina y de la quebrada Hospicio ambas en territorio del Perú, al sur y al este con la cuenca del río Lluta y al oeste con el Océano Pacífico.

Los principales usos del suelo en la cuenca de la quebrada La Concordia son áreas sin vegetación y praderas matorrales, por lo tanto es válido considerar que la precipitación no es interceptada por la vegetación. Sin embargo, en la cuenca se presenta una alta evapotranspiración desde el suelo, lo que limita que el agua que precipita pueda quedar retenida en las depresiones y posteriormente infiltre hacia el acuífero. Además de ello, se desconoce la capacidad de infiltración de los suelos existentes en la cuenca, que pueden favorecer o limitar el paso del agua hasta alcanzar el nivel freático.

Cabe mencionar que la precipitación media anual en la cuenca, fue estimada a partir del método de las isoyetas, siendo ésta de 26,2 mm/año, considerado un valor bajo en

comparación a las otras cuencas de la región de Arica y Parinacota. En la cuenca no se presentan escorrentías superficiales en ninguna de las quebradas, sin embargo, en el periodo del invierno altiplánico se presentan algunos caudales temporales.

La cuenca de la quebrada de La Concordia presenta su formación acuífera en el sector costero, asociada principalmente a depósitos aluviales y fluviales del Holoceno, Pleistoceno, Plioceno y depósitos litorales eólicos. Esta unidad acuífera presenta un potencial hidrogeológico relativamente medio, debido a la presencia de material granulométrico fino y a su grado de heterogeneidad. El acuífero presenta un espesor mayor a los 400 m y un carácter libre, aunque según los antecedentes existe a nivel local una capa de tobas que divide esta unidad acuífera en un acuífero confinado y otro libre. Los antecedentes estimaron una transmisividad que varía entre 12 y 500 m^2/día, una conductividad hidráulica de 0,1 y 12 m/día y un coeficiente de almacenamiento de 2 y 22%.

El flujo subterráneo principal del acuífero de la cuenca de la quebrada La Concordia se desarrolla desde las cotas altas hacia la línea de costa, es decir, de este a oeste con un gradiente hidráulico de 0,21 %. Además existe un flujo subterráneo secundario desde las cuencas vecinas a la cuenca de la quebrada La Concordia, por lo que se supone que existiría una recarga lateral al acuífero. Esto es posible, ya que el acuífero costero es similar y contínuo hacia la cuenca del río Caplina al norte (territorio peruano) y a la cuenca del río Lluta al sur. El gradiente hidráulico desde el río Lluta sería mayor que al del río Caplina, siendo de 0,4 % y 0,16 % respectivamente. De acuerdo a lo descrito en DGA (2011), el flujo subterráneo que atraviesa la cuenca en 9 km de ancho, sería de 100 l/s.

Los niveles piezométricos han sufrido pequeñas variaciones desde 1967, pero en términos generales se han mantenido constante en el tiempo. Sin embargo, a contar de los años 2004-2005 se ha manifestado una tendencia a un descenso progresivo del nivel en todos los pozos.

Las aguas subterráneas del acuífero de la quebrada La Concordia se caracterizan por ser aguas frescas y alcalinas, cuya conductividad eléctrica oscila entre 700 y 1.000 µS/cm durante todo el monitoreo, menos la muestra tomada en el recinto Zofri S.A. cuya conductividad fluctúa entre 3.100 y 3.900 µS/cm. Estas aguas subterráneas son cloruradas sódicas y de bajo grado de mineralización, excepto la muestra del pozo

propiedad de Zofri y ubicada en el sector sur del acuífero, reflejo del aporte subterráneo desde el valle del río Lluta. Las aguas subterráneas del acuífero de La Concordia no suelen ser aptas para el consumo humano y, en determinados casos, sobrepasan los niveles de aluminio y boro definidos en la norma para riego

En la Figura 7.63 se muestra el esquema del modelo conceptual de la cuenca de la quebrada La Concordia, cuyas entradas estarían dadas por las precipitaciones y recargas al acuífero. La fuente de recarga al acuífero no sólo sería la precipitación difusa de la zona alta, sino que cobrarían importancia los aportes de flujos subterráneos provenientes de las cuencas adyacentes en la zona baja, dados por el noreste de la cuenca del río Caplina y por el sureste de la cuenca del río Lluta. Es destacable mencionar que la recarga por infiltración de precipitaciones se produce principalmente durante el invierno altiplánico.

Las principales salidas del sistema corresponden a las descargas del acuífero debido a las extracciones que se producen en las diferentes captaciones, ya sea para uso agrícola, agua potable o industrial en el recinto de Zofri S.A. Y por otro lado, se considera la salida de flujo subterráneo desde el acuífero hacia el océano Pacífico.

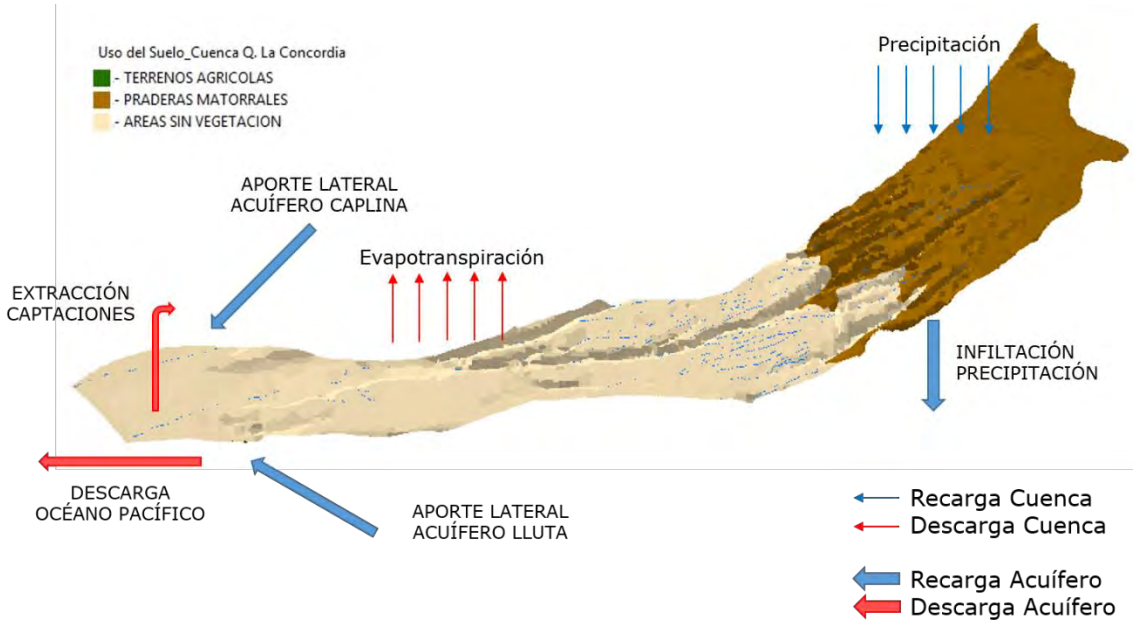


Figura 7.63 Esquema del modelo conceptual hidrogeológico de la cuenca de la quebrada La Concordia. Fuente: modificado de la capa uso del suelo tomada del portal web del SINIA http://ide.mma.gob.cl/

7.3 Cuenca del Río Lluta

La cuenca del río Lluta comprende una superficie de 3.479 km^2 y limita al norte con la cuenca de la quebrada La Concordia y la frontera con Perú, al este con la cuenca del río Caquena, al sur con la cuenca del río San José y al oeste con el océano Pacífico. El río Lluta nace de la confluencia de los ríos Azufre y Caracarani en Humapalca a 3.900 msnm. En la parte alta y media de la cuenca, los afluentes principales son los ríos Colpitas y Putre, respectivamente. Entre Poconchile y la desembocadura al mar, los afluentes de mayor relevancia son las quebradas Cementerio, del Diablo y Mollepampa.

El río Lluta tiene una longitud de 150 km y presenta inicialmente un recorrido en sentido norte-sur hasta llegar a la junta con el río Putre, donde cambia su trazado en dirección hacia el suroeste para llegar al sector de Poconchile donde se encuentra con el cordón montañoso de San Martin. El escurrimiento del río Lluta tiene carácter permanente.

En la Figura 7.64 se presenta la ubicación de la cuenca del río Lluta y su red de drenaje.

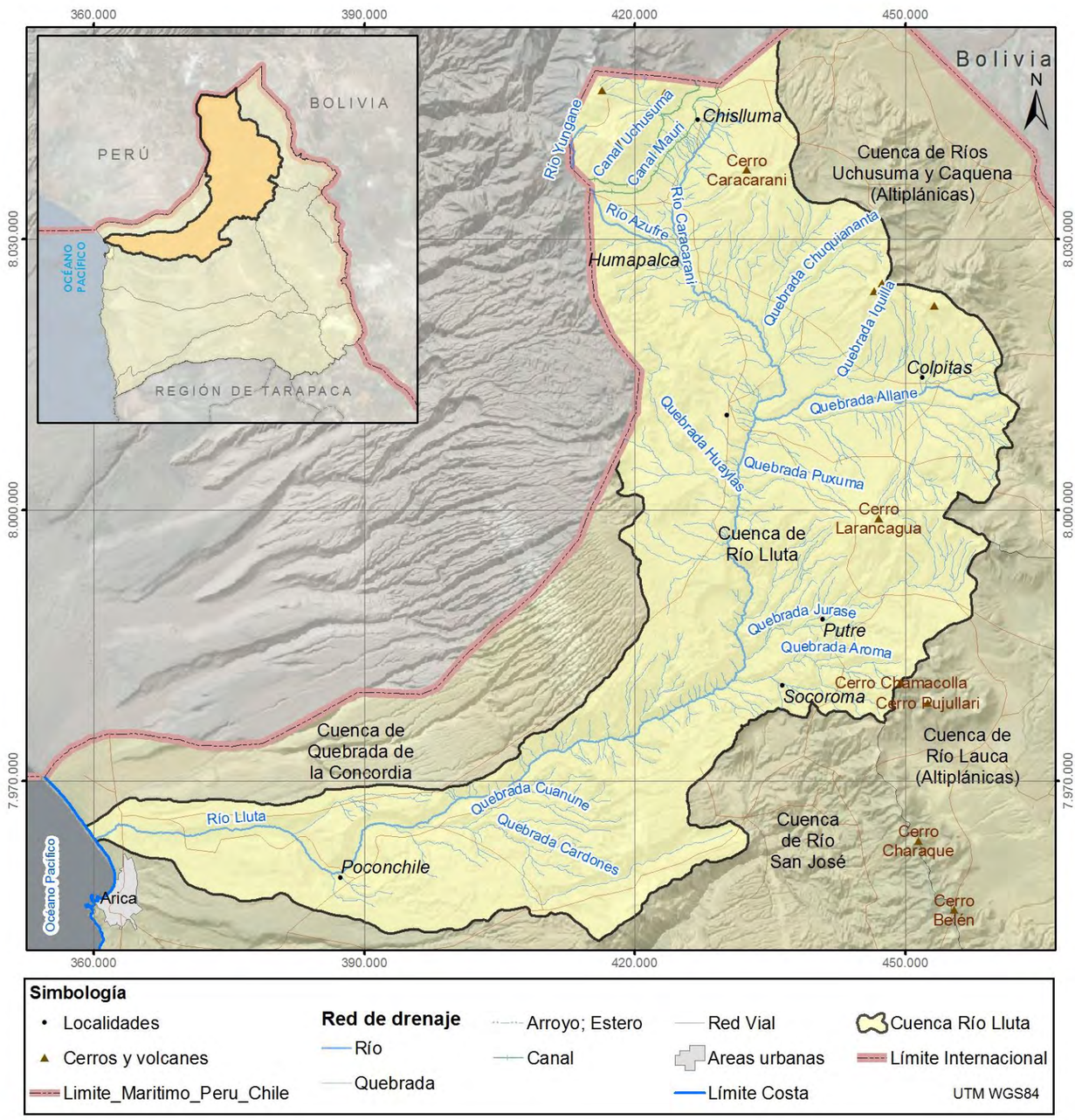


Figura 7.64 Ubicación de la cuenca del río Lluta. Fuente: elaboración propia.

7.3.1 Caracterización Hidrológica

7.3.1.1 Definición y caracterización de la cuenca del río Lluta

En la cuenca se manifiestan tres variantes del clima desértico, las que en sentido oeste-este corresponden a desértico costero, desértico interior o normal y desértico de altura, situación que explica la escasez de precipitaciones y sus suelos desprovistos de vegetación, a excepción del sector bajo del valle donde el uso del suelo es agrícola (Cade-Idepe, 2004) y de cultivo con riego. Las precipitaciones de la cuenca se limitan a las áreas superiores de la cordillera y su promedio anual aumenta gradualmente de cero en el valle del bajo Lluta, a 350 mm en la Cordillera de los Andes (División de Estudios y Planificación, 2010), concentrándose estas en temporada estival.

DELIMITACIÓN DE LA CUENCA

En la Figura 7.64 se muestra la delimitación y red de drenaje de la cuenca del río Lluta. El criterio utilizado para la delimitación se explicó en el apartado "Definición y Caracterización de las Cuencas de la Región" en el capítulo de "Análisis Regional". De manera resumida el criterio es básicamente topográfico.

CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS DE LA CUENCA

La morfología de la cuenca del río Lluta es un referente para establecer la dinámica esperada de la escorrentía superficial y se caracteriza por el análisis de tres parámetros, los relativos a la forma, al relieve y a la red de drenaje. Éstos se calcularon con el uso de SIG, además de utilizar expresiones matemáticas para este fin. La metodología se muestra en detalle en el Anexo VI.

En relación a la forma, la cuenca tiene un coeficiente de compacidad (K_G) de 1,94, por tanto su forma es rectangular. La densidad del drenaje de la cuenca del río Lluta definida como la longitud total de los cauces sobre el área de la cuenca, es en este caso de 0,27 km/km^2 que corresponde a una densidad de drenaje pobre, normalmente asociada a cuencas con materiales del suelo resistentes a la erosión, muy permeables y de baja pendiente.

Es necesario destacar que este parámetro representa la densidad de drenaje promedio en la cuenca, lo cual no excluye que existan cauces o quebradas al interior de la

cuenca que dispongan de un drenaje muy desarrollado y por tanto, ocurra una respuesta rápida de transformación lluvia-escorrentía.

Para construir la curva hipsométrica de la cuenca fue necesario reclasificar las bandas del DEM y calcular las áreas acumuladas intermedias. Según la curva hipsométrica (Figura 7.65), la cuenca tiene una topografía variable iniciando desde la cota mínima de 4 msnm hasta la máxima de 5.960 msnm. Sin embargo, el 50% de la cuenca tiene una altura sobre 4.000 msnm.

De acuerdo a la metodología presentada en el Anexo VI, esta curva hipsométrica se clasifica de tipo B y corresponde a una cuenca en equilibrio que está en la fase de madurez.

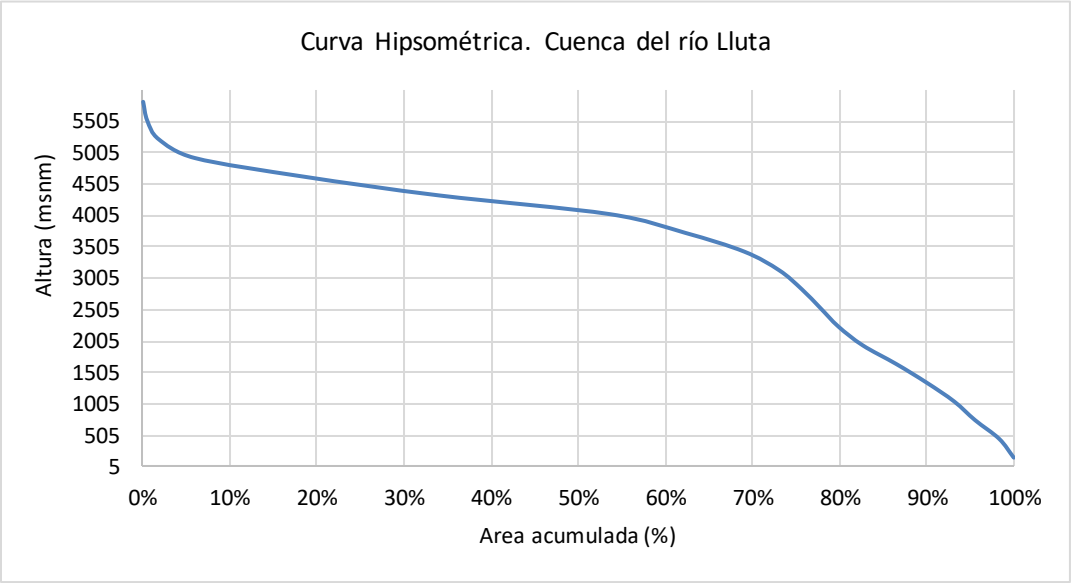


Figura 7.65 Curva hipsométrica de la cuenca del río Lluta. Fuente: elaboración propia.

SUELOS EN EL VALLE DEL LLUTA

Para la descripción de los suelos en la cuenca del río Lluta, la DGA (2004) ha dividido la cuenca en cuatro secciones:

a) *Sección superior de la cuenca (alta cordillera) Zona de altiplano;* suelos con desarrollo orgánico débil (esqueléticos), de material volcánico. Gran capacidad de retención de agua. Existen cuencas cerradas con drenaje restringido y suelos de alto contenido de materia orgánica conocidos como bofedales.

- Textura: gruesa (arenosa franca a muy arenosa)
- Permeabilidad: alta (suelos permeables)
- Escorrentía: lenta
- Riesgo de erosión: bajo

b) *Sección media de la cuenca (precordillera) Planos deposicionales o conos aluviales,* sobre los que se desarrollan suelos estratificados por lluvias torrenciales del invierno altiplánico. El escurrimiento superficial se realiza de dos maneras: como erosión lineal en el curso superior y medio de las quebradas, y como erosión laminar en el curso inferior de dichas depresiones, dejando las laderas verticales.
   - Textura: gruesa y masiva (arenosa franca a muy arenosa)
   - Permeabilidad: alta
   - Escorrentía: lenta
   - Riesgo de erosión: bajo

c) *Sección baja del valle de la cuenca*, suelos con alta salinidad producto de su defectuoso drenaje. Asociado a alta evapotranspiración, lo que permite ascenso por capilaridad de las sales de la napa freática.
   - Textura: moderadamente fina (franco arcillosa a franco arcillo arenosa)
   - Permeabilidad: media
   - Escorrentía: media
   - Riesgo de erosión: moderado, dependiendo de precipitaciones

d) *Sección costera (cordillera de la Costa y plataforma de abrasión) Influencia coluvial*, suelos poco desarrollados. Ocupan terraza marina baja.
   - Textura: franca (franco arcilloso a franco arenosa) y gruesa (arenosa franca a muy arenosa).
   - Permeabilidad: media - alta
   - Escorrentía: media - lenta
   - Riesgo de erosión: moderado – bajo

7.3.1.2 Caracterización de la red de drenaje

La alimentación del río Lluta es mixta, recibe aportes de los deshielos, lluvias de verano y vertientes tanto de afluentes naturales como de canales. El diagrama Unifilar del río Lluta se indica en la Figura 7.66. En este se incluyen los ríos y las quebradas aportantes de mayor interés. Allí se referencia el caudal medio anual medido en las estaciones fluviométricas administradas por la DGA.

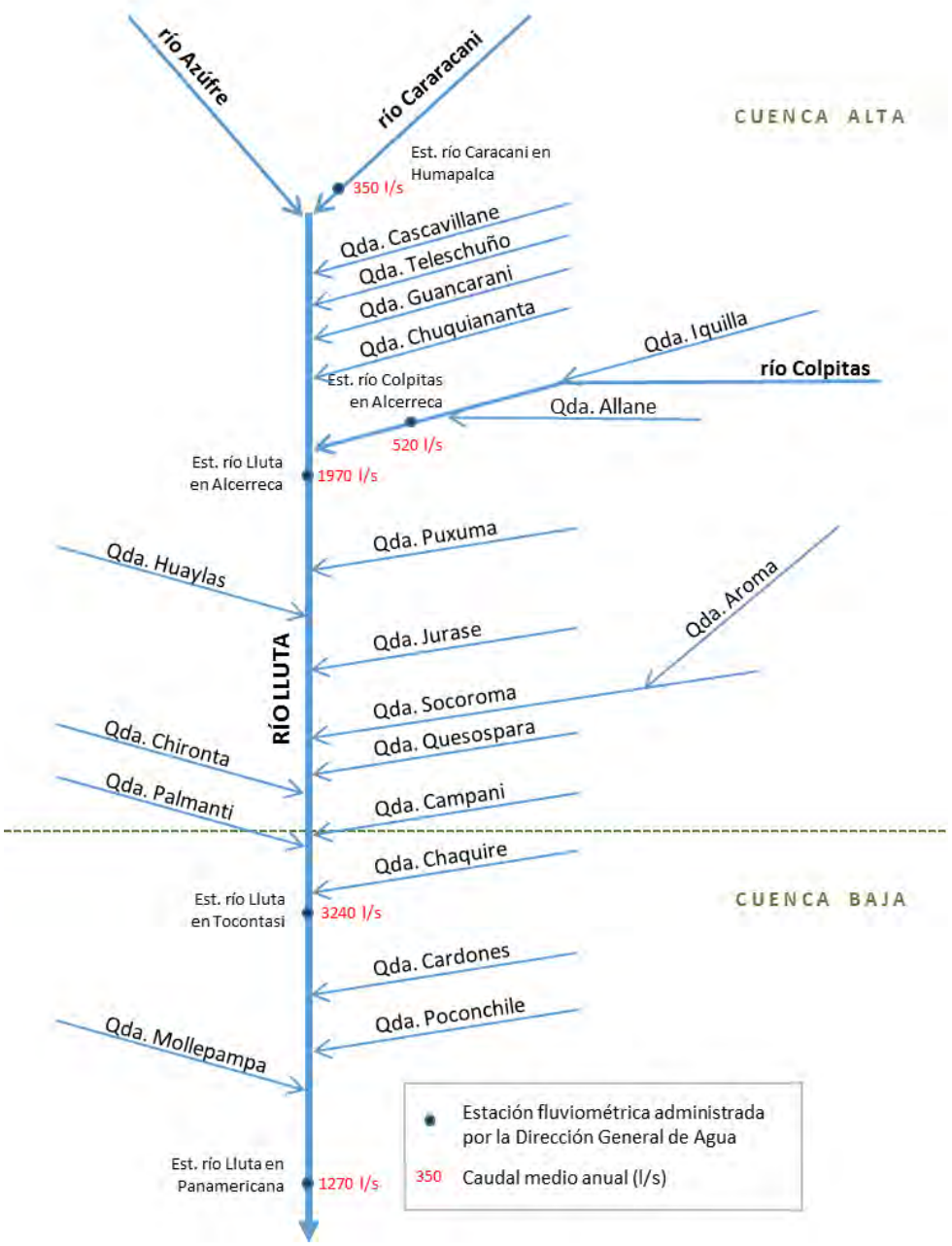


Figura 7.66 Diagrama unifilar del río Lluta. Fuente: elaboración propia.

7.3.1.3 Hidrometeorología

La cuenca del río Lluta cuenta con una red de monitoreo administrada por la DGA de 6 estaciones meteorológicas, dos de ellas, Putre y Putre DCP cuentan con registros históricos diarios y mensuales de las variables climatológicas: temperatura, humedad relativa y evaporación. Las coordenadas y periodos de información disponible de las estaciones se presentan en la Tabla 7.36.

Como particularidad, mencionar que la estación Putre estuvo vigente hasta el año 2009, y contigua a ésta, inicio a operar la estación Putre DCP desde el año 2001, por lo tanto se completó el registro de precipitación de una estación en relación a la otra, existiendo muy buena correlación.

Tabla 7.36 Coordenadas y periodo de información de las estaciones meteorológicas en la cuenca del río Lluta. Fuente: elaboración propia.

Estación Meteorológica DGA	Código BNA	DATUM WGS84 H19S		Altitud	Periodo	Años	Estado
		UTM Este	UTM Norte				
VILLA INDUSTRIAL (TACORA)	01200002-2	423.209	8.034.897	4.080	1975-2014	40	V
HUMAPALCA	01200003-0	425.414	8.027.929	3.980	1971-2014	44	V
RÍO LLUTA EN ALCÉRRECA	01201003-6	433.013	8.009.301	3.592	2001-2014	13	V
ALCÉRRECA	01201010-9	430.185	8.010.459	3.990	1970-2014	45	V
PUTRE	01202010-4	440.754	7.987.689	3.545	1967-2009	43	S
PUTRE-DCP	01202012-0	440.899	7.988.150	3.560	2002-2014	12	V

V: Vigente, S: suspendida.

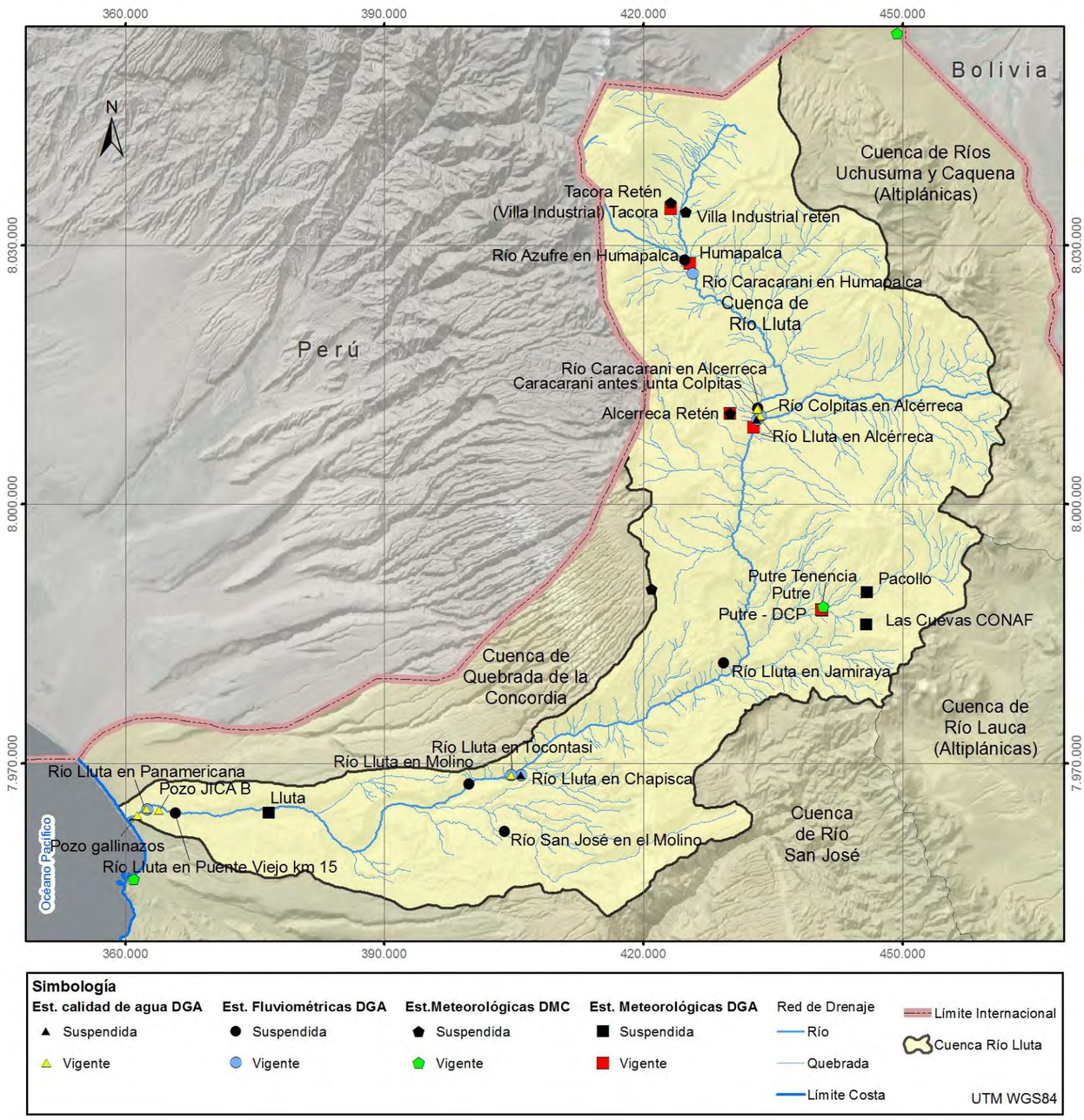


Figura 7.67 Ubicación estaciones meteorológicas de DMC y DGA y fluviométricas y de calidad de la DGA en la cuenca del río Lluta. Fuente: elaboración propia.

PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL Y MEDIA MENSUAL

Para el análisis de la precipitación media anual y media mensual se tomaron los registros de 30 años (periodo 1985 al 2014) de las estaciones pluviométricas existentes, que permiten analizar las variaciones de la precipitación. En la Figura 7.68 se presentan los registros de precipitación media anual de dos estaciones ubicadas en la parte media-alta de la cuenca, Humapalca [3.980 msnm] y Putre [3.545 msnm]. Allí se observa que han existido años húmedos, secos y promedio. Los años más húmedos en el periodo analizado, han sido 1985, 1993, 1997, 1999, 2001, 2006, 2011 y 2012. Por el contrario, el 2010 fue el año más seco en los últimos 30 años.

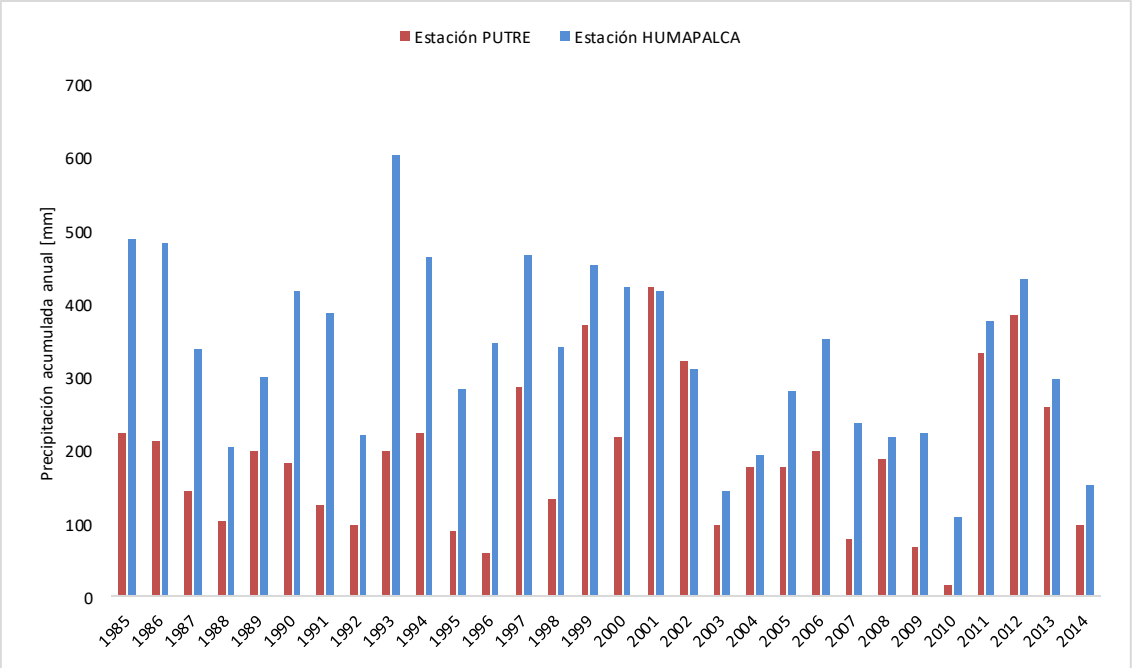


Figura 7.68 Precipitación media anual registrada en estaciones de la cuenca del río Lluta. Fuente: elaboración propia.

A nivel regional se trazaron las isoyetas de precipitación media anual, construidas a partir de los datos registrados en 28 estaciones meteorológicas, 24 de ellas ubicadas en la XV Región de Arica y Parinacota y las 4 restantes en la I Región de Tarapacá. La información utilizada de las estaciones fue previamente completada y analizada, como se explicó en el subcapítulo "Análisis de las variables espacial y temporal" del capítulo "Análisis Regional".

De esta manera, haciendo un zoom en la cuenca del río Lluta, las isoyetas de precipitación se presentan en la Figura 7.69. Se observa que la precipitación media anual en la cuenca del río Lluta aumenta gradualmente desde 0 a 1 mm/año en el sector bajo (localidad de Poconchile), hasta los 300 mm/año en el sector alto de la cuenca (de 4.500 a 5.000 msnm). En la Tabla 7.37 se especifica la precipitación ponderada de acuerdo al área de influencia entre isoyetas, obteniendo que la precipitación media anual en la cuenca es del orden de los 190,2 mm.

Tabla 7.37 Ponderación de la precipitación según área de influencia entre isoyetas en la cuenca del río Lluta. Fuente: elaboración propia.

Isoyetas de Precipitación (mm)		Área entre isoyetas (km^2)	Precipitación media multianual 1985-2014 (mm)
0		253,4	0
<	10	305,9	1.530
10	20	81,7	1.226
20	50	186,0	6.509
50	100	146,6	10.998
100	150	143,5	17.941
150	200	360,0	63.000
200	250	308,0	69.305
250	300	679,1	186.755
> 300		1.014,5	304.347
			190,2 Precipitación media anual en la cuenca

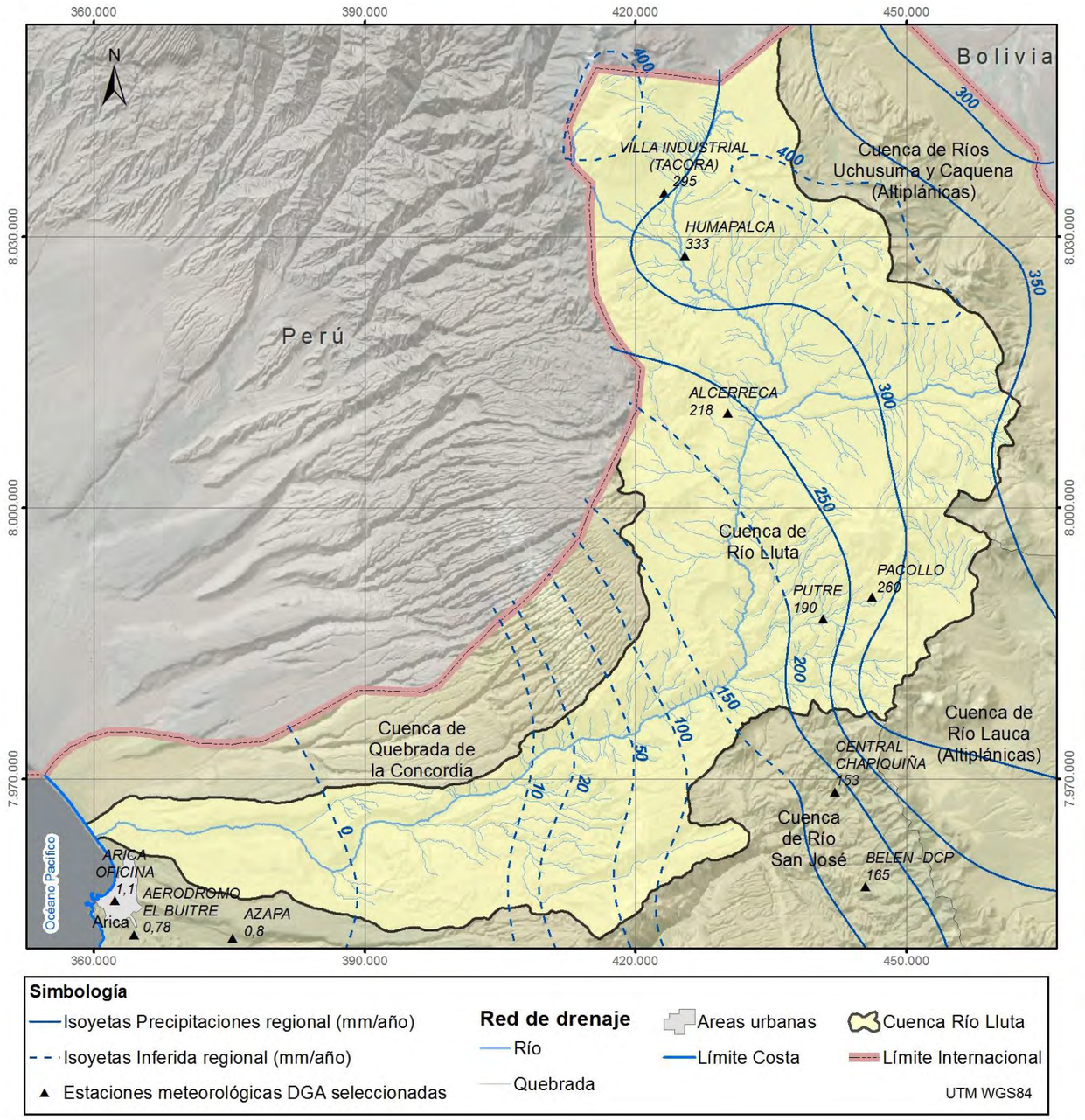


Figura 7.69 Isoyetas de precipitación media anual regional en la cuenca del río Lluta. Fuente: elaboración propia.

Por otro lado, en la Tabla 7.38 se muestra la precipitación media anual de la cuenca del río Lluta en dos periodos, un periodo lluvioso de Diciembre a Marzo en donde se presenta mayor al 90% de la precipitación anual y un periodo seco de Abril a Noviembre donde ocurren precipitaciones esporádicas. En general, en la región de Arica y Parinacota las precipitaciones se concentran en la temporada estival producto del llamado "invierno altiplánico".

Tabla 7.38 Precipitación media anual en la cuenca del río Lluta. Fuente: elaboración propia.

Estación pluviométrica DGA	PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL PERIODO 1985-2014				
	DIC-MAR		ABR-NOV		TOTAL
	Pp [mm]	Pp [%]	Pp [mm]	Pp [%]	Pp [mm]
Villa industrial (Tacora)	265	90%	30	10%	295
Humapalca	306	92%	27	8%	333
Alcérreca	201	92%	17	8%	218
Putre	177	93%	13	7%	190

La magnitud de la precipitación media mensual en la cuenca se presenta en la Tabla 7.39 y de manera gráfica en la Figura 7.70 se observa la variación temporal. Las lluvias se concentran en los meses de enero y febrero, del orden de los 60 mm a 109 mm, y en los meses de abril a noviembre las precipitaciones son de 0 mm a 9 mm.

Tabla 7.39 Precipitación media mensual en la cuenca del río Lluta.

Estación pluviométrica DGA	Altitud [msnm]	Precipitación media mensual [mm] periodo 1985-2014												
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Pp acum.
Villa industrial (Tacora)	4.080	94,8	84,6	51,5	9,1	1,7	2,7	5,3	3,1	0,7	2,0	5,1	34,2	295
Humapalca	3.980	109	108	58,4	6,7	1,6	3,4	4,4	3,1	1,4	1,6	5,3	29,9	333
Alcérreca	3.592	79,2	60,1	40,9	4,7	0,9	2,5	3,4	3,0	0,4	0,5	2,0	20,8	218
Putre	3.545	62,7	64,2	29,2	4,0	1,5	0,7	1,6	1,8	1,6	0,4	1,7	20,8	190

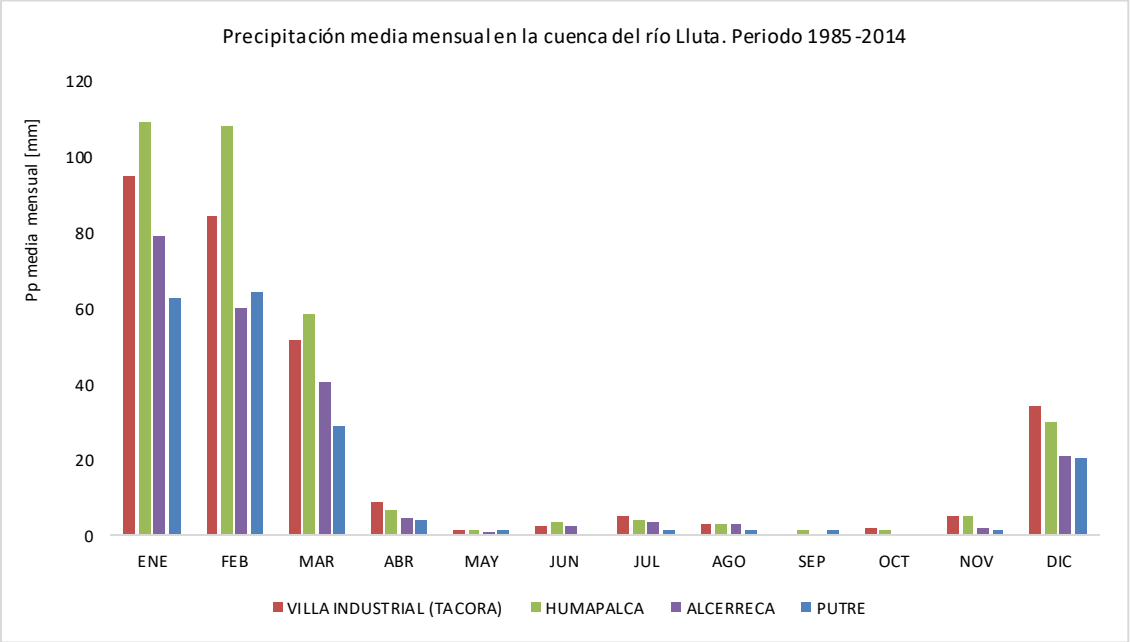


Figura 7.70 Variación temporal mensual de la precipitación media en la cuenca del río Lluta. Fuente: elaboración propia.

EVAPORACIÓN MEDIA ANUAL Y MEDIA MENSUAL

Las pérdidas de agua por evaporación en la cuenca del río Lluta son altas. Estas pérdidas se registran en el sector bajo del Valle del río Lluta, en los Humedales del sector alto de la cuenca y en la Laguna Blanca. El valor promedio de evaporación potencial registrado en la estación Putre, anualmente alcanza los 1.964 mm, equivalente a una tasa de evaporación de 5,5 mm/día.

En la Figura 7.71 se presenta la evaporación media mensual. Se observa una variación entre 130 mm en el mes de febrero hasta 200 mm en el mes de octubre.

En el subcapítulo "Evapotranspiración" del componente "Análisis Regional", se presentan todas las estaciones meteorológicas de la XV Región que miden evaporación potencial del tanque tipo A. Se realiza un análisis más detallado a nivel regional.

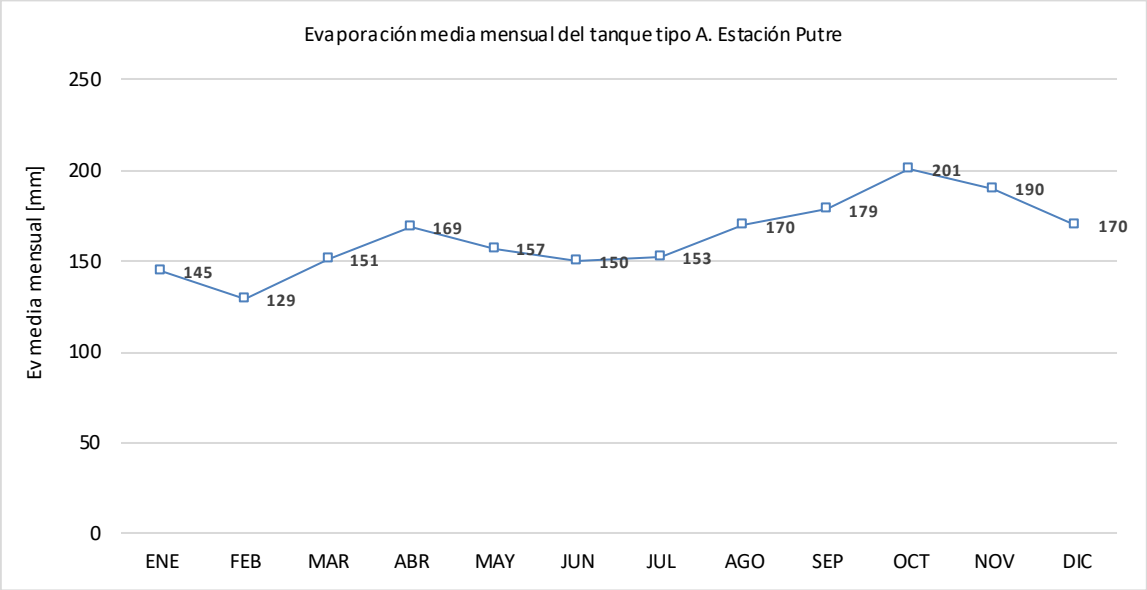


Figura 7.71 Evaporación media mensual potencial en Estación Putre [3.545 msnm]. Fuente: elaboración propia.

EVAPOTRANSPIRACIÓN MEDIA ANUAL Y MEDIA MENSUAL

Para el análisis de la evapotranspiración en la cuenca del río Lluta, se calculó la evapotranspiración utilizando la fórmula de Turc en las estaciones presentes en la cuenca. Los resultados obtenidos se incluyen en la Tabla 7.40. Se observa que el valor de evapotranspiración de la cuenca varía entre los 188 y los 253 [mm/año].

Tabla 7.40 Estaciones consideradas y valor estimado de la evapotranspiración en la cuenca. Fuente: elaboración propia.

Est. Meteorológica DGA	Altitud [msnm]	Pp	T	Precipitación media anual [mm/año]	Temperatura media anual [°C]	ETP [mm/año] estimación método Turc
Villa Industrial (Tacora)	4.080	x		294,8	5,2*	253,2
Humapalca	3.980	x		333,0	5,8*	277,8
Alcérreca	3.990	x		218,3	5,7*	205,1
Putre	3.545	x	x	190,2	8,9	188,7

* Valor estimado a partir de la relación obtenida de la temperatura y la altitud en la Región.

Adicionalmente, a partir de la información disponible en el producto satelital MODIS 16, y siguiendo la metodología detallada en el Anexo VI, se estimó la evapotranspiración de la cuenca. MODIS 16 incluye información de evapotranspiración

y flujo de calor latente real, estimado a partir de información satelital remota y utilizando como método de cálculo, para el caso de la evapotranspiración, la ecuación de Penman-Monteith. El valor medio anual estimado para la cuenca, considerando datos entre 2000 y 2014 es de 228,5 [mm/año]. Este valor se encuentra dentro del rango de los valores estimados en las estaciones de la cuenca, utilizando la fórmula de Turc.

7.3.1.4 Fluviometría

La cuenca del río Lluta cuenta con una red de monitoreo activa de 5 estaciones fluviométricas administradas por la DGA. Las coordenadas y periodos de información disponible de las estaciones se presentan en la Tabla 7.41.

Tabla 7.41 Coordenadas y periodo de información de las estaciones fluviométricas en la cuenca del río Lluta. Fuente: elaboración propia.

Estación Fluviométrica DGA	Código BNA	DATUM WGS84 H19S		Altitud [msnm]	Periodo	Años	Estado
		UTM Este	UTM Norte				
Río Caracarani en Humapalca	01201005-2	425.888	8.027.070	3.908	1956-2014	59	V
Río Colpitas en Alcérreca	01201001-K	433.773	8.010.594	3.251	1956-2014	59	V
Río Lluta en Alcérreca	01201003-6	433.013	8.009.301	3.550	1956-2014	50	V
Río Lluta en Tocontasi	01210001-9	404.890	7.969.012	1.850	1960-2013	7	V
Río Lluta en Panamericana	01211001-4	362.683	7.965.067	10	1960-2014	55	V

V: Vigente.

Las estaciones correspondientes al río Lluta presentan un mismo régimen hidrológico con pequeñas variaciones. Los caudales del río Lluta dependen muy fuertemente de las lluvias estivales altiplánicas, siendo ésta la principal causa en los aumentos de caudal durante los meses de verano. Los deshielos se manifiestan con el ligero aumento de caudal durante el mes de diciembre, observado en algunas estaciones.

CAUDAL MEDIO ANUAL Y MEDIO MENSUAL

La escorrentía superficial media anual registrada en la cuenca, alcanza valores no superiores a 1,13 m^3/s en el sector bajo del Valle del río Lluta hasta el sector de la

quebrada Socoroma. Desde este último sector hacia los sectores altos de la cuenca, los valores de escorrentía aumentan hasta llegar a los 4,53 m^3/s (Quebradas Caracarani, Colpitas y Río Azufre).

De acuerdo a lo indicado por la División de Estudios y Planificación (2010), la estación fluviométrica Lluta en Tocontasi, controla el 75% de la cuenca de drenaje y registra prácticamente el caudal total de la cuenca.

El río Lluta presenta un caudal permanente durante el año, cuyo gasto promedio es 2 m^3/s. Sin embargo, en el documento "Estudio de Factibilidad de Embalses para los Valles de Lluta y Azapa, I Región" (Ingendesa, 2004) se indica que el río Lluta presenta un caudal medio anual de 2,38 m^3/s.

Tabla 7.42 Caudal medio anual para el año hidrológico en la cuenca del río Lluta. Fuente: elaboración propia.

Estación fluviométrica	Altitud [msnm]	Periodo		Caudal medio anual [m^3/s]			
		1985-2014	Otro [años]	Min	Max	Prom	Desv Est
Río Caracarani en Humapalca	3.908	X		0,22	0,67	0,35	0,09
Río Colpitas en Alcérreca	3.251	X		0,35	0,69	0,52	0,10
Río Lluta en Alcérreca	3.550		25	1,18	3,12	1,97	0,54
Río Lluta en Tocontasi	1.850		5	2,08	5,01	3,24	1,25
Río Lluta en Panamericana	10		25	0,34	2,80	1,27	0,69

De acuerdo al análisis de la variación temporal a nivel mensual de los escurrimientos (Tabla 7.43), durante los meses de enero, febrero y marzo se registran los caudales medios más altos del año hidrológico, estos caudales superan la media anual. Presentándose caudales sobre el río Lluta en el mes de febrero del orden de los 4,89 m^3/s a 10,3 m^3/s en las estaciones en Alcérreca y en Tocontasi.

En los meses de junio y julio se observa un pequeño incremento del caudal medio. En la Figura 7.72 se observa con mayor claridad la variación de los caudales medios mensuales y su respuesta a la precipitación media mensual.

Tabla 7.43 Caudal medio mensual en la cuenca del río Lluta. Fuente: elaboración propia.

Estación fluviométrica	Caudal medio mensual [m^3/s]												
	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	PROM
Río Caracarani en Humapalca	0,20	0,20	0,25	0,49	0,68	0,47	0,31	0,30	0,32	0,41	0,33	0,24	0,35
Río Colpitas en Alcérreca	0,39	0,40	0,42	0,70	0,92	0,74	0,47	0,44	0,46	0,46	0,44	0,41	0,52
Río Lluta en Alcérreca	1,08	1,04	1,26	3,47	4,89	3,22	1,76	1,40	1,46	1,46	1,38	1,21	1,97
Río Lluta en Tocontasi	1,78	1,35	1,70	3,75	10,3	8,88	1,87	1,73	1,86	1,87	1,84	2,00	3,24
Río Lluta en Panamericana	0,17	0,14	0,38	2,79	4,23	3,18	1,15	0,72	0,81	0,84	0,56	0,23	1,27

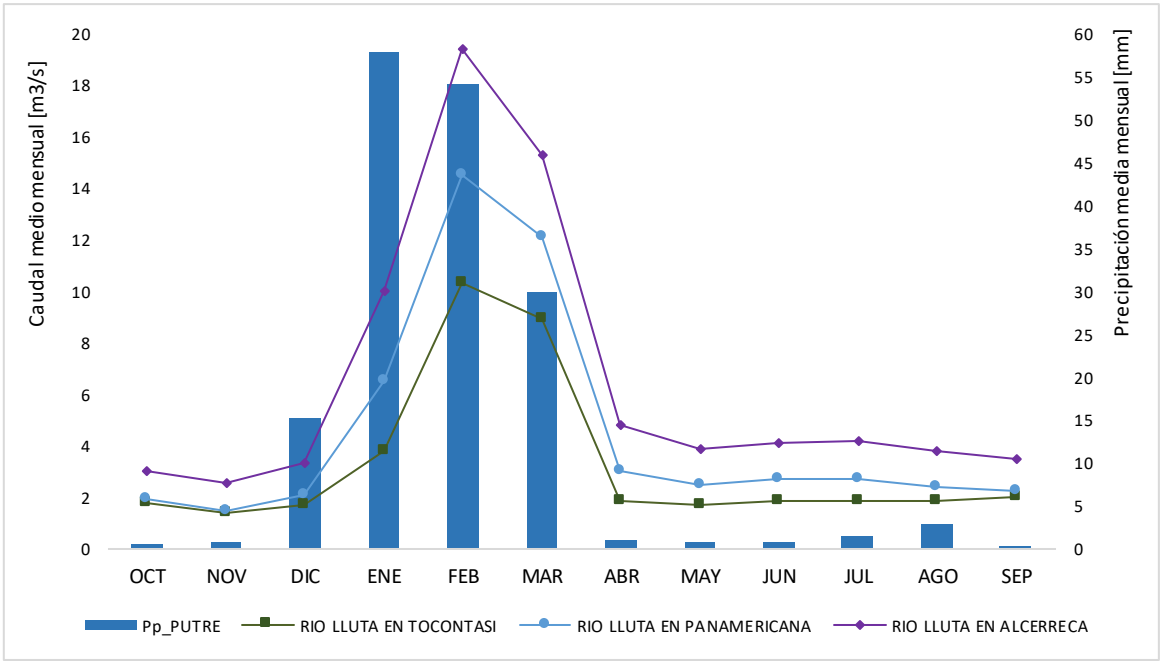


Figura 7.72 Caudal medio mensual en el río Lluta y su relación con la precipitación media. Fuente: elaboración propia.

ANÁLISIS DE FRECUENCIA DE LOS CAUDALES

Mediante el análisis de frecuencia de las series de caudales mensuales, se determinó si los años secos y los años lluviosos mantienen el mismo comportamiento que el año hidrológico medio. En el Anexo VI se detalla la metodología. Para ello se graficaron curvas de variación estacional definidas para distintas probabilidades de excedencia.

En la Tabla 7.44 y Figura 7.73, se presentan los caudales mensuales para las probabilidades de excedencia del 15% (año muy húmedo), 85% (año muy seco) y caudal medio. Se seleccionaron estaciones fluviométricas ubicadas sobre el río Lluta y en estaciones de afluentes menores de importancia en la cuenca. Allí se observa la distribución típica de los valores estadísticos representativos de la disponibilidad del recurso en puntos significativos de la cuenca del río Lluta.

Tabla 7.44 Caudales mensuales asociados a probabilidad de excedencia. Fuente: elaboración propia.

Estación: RÍO CARACARANI EN HUMAPALCA													
Pexc (%)	T (años)	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep
15	6,7	0,20	0,20	0,30	0,70	1,30	0,70	0,40	0,40	0,40	0,50	0,40	0,30
85	1,2	0,20	0,20	0,20	0,30	0,20	0,30	0,20	0,20	0,30	0,30	0,30	0,20
Promedio		0,20	0,20	0,25	0,49	0,68	0,47	0,31	0,30	0,32	0,41	0,33	0,24
Estación: RÍO COLPITAS EN ALCÉRRECA													
Pexc (%)	T (años)	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep
15	6,7	0,50	0,50	0,50	1,10	1,70	1,20	0,60	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
85	1,2	0,30	0,30	0,30	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,30
Promedio		0,39	0,40	0,42	0,70	0,92	0,74	0,47	0,44	0,46	0,46	0,44	0,41
Estación: RÍO LLUTA EN ALCÉRRECA													
Pexc (%)	T (años)	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep
15	6,7	1,30	1,30	1,70	4,90	8,90	4,76	2,20	1,60	1,70	1,60	1,60	1,40
85	1,2	0,90	0,90	0,90	1,40	1,50	1,40	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,00
Promedio		1,08	1,04	1,26	3,47	4,89	3,22	1,76	1,40	1,46	1,46	1,38	1,21
Estación: RÍO LLUTA EN PANAMERICANA													
Pexc (%)	T (años)	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep
15	6,7	0,20	0,20	0,60	4,70	6,95	6,20	1,80	1,20	1,10	1,00	0,90	0,40
85	1,2	0,10	0,10	0,10	0,20	0,40	0,50	0,20	0,40	0,50	0,50	0,30	0,10
Promedio		0,17	0,14	0,38	2,79	4,23	3,18	1,15	0,72	0,81	0,84	0,56	0,23

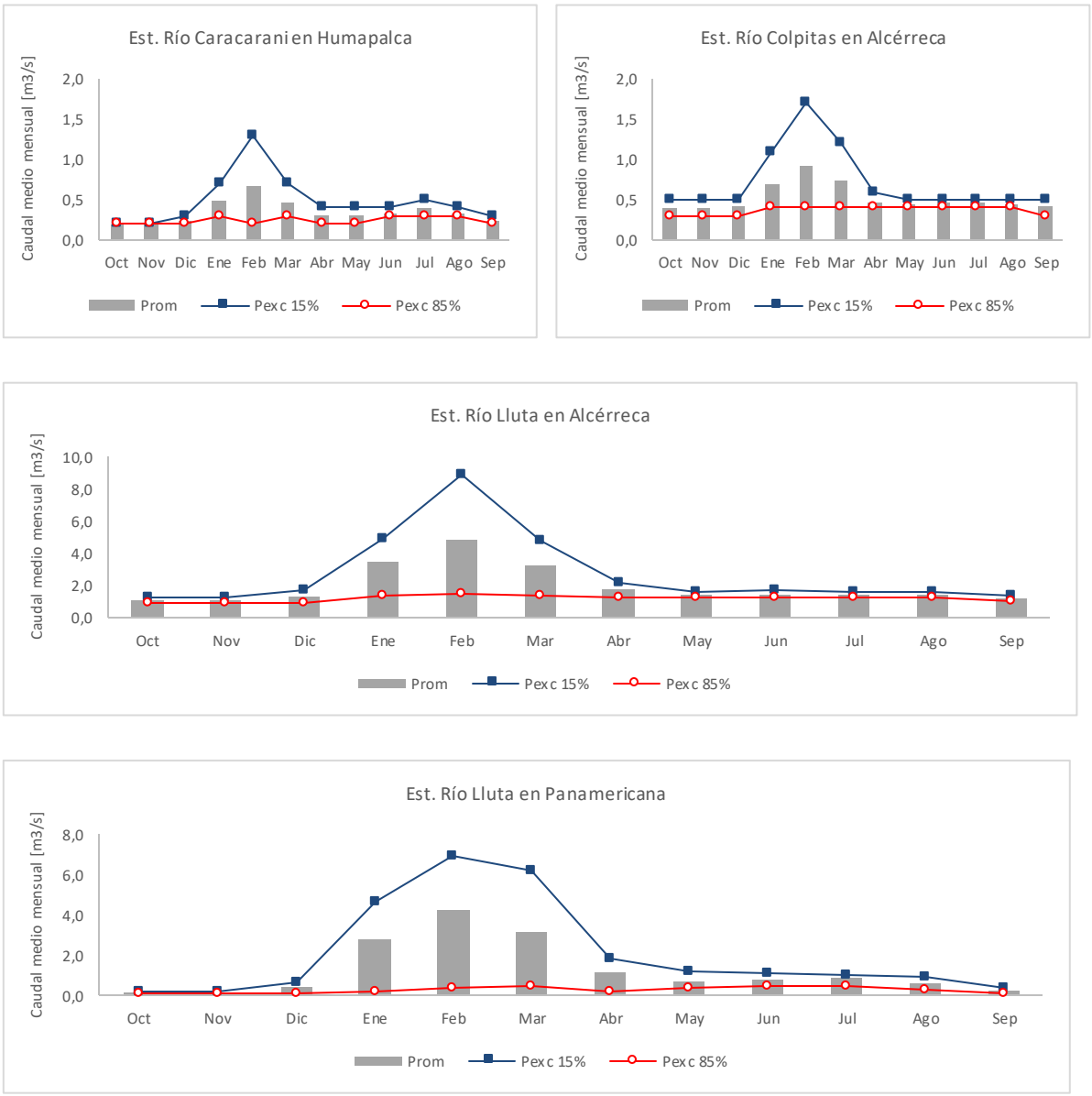


Figura 7.73 Curvas de variación estacional asociadas a probabilidad de excedencia de 15% y 85% y caudal medio mensual en las estaciones fluviométricas de la cuenca del río Lluta. Fuente: elaboración propia.

Analizando la Figura 7.73, la quebrada Colpitas presenta el mismo régimen pluvial que la quebrada Caracarani, pero con caudales ligeramente mayores, debido a la mayor superficie de su cuenca, y con una mayor influencia de las pequeñas precipitaciones de julio en la escorrentía para los años húmedos.

En los meses de enero a marzo, denominados como "Invierno Altiplánico", los caudales aumentan notablemente, pudiendo para un año húmedo (P_{exc} 15%) ser cuatro veces mayor que el caudal que escurre durante el resto del año. Se aprecia un ligero aumento de caudales en julio y agosto, debido a precipitaciones en estos meses, pero que para años normales o secos (P_{exc} 85%) no tienen mayor significación.

En la estación río Lluta en Panamericana ubicada en la parte baja de la cuenca, se observa la influencia de la gran cantidad de bocatomas para riego con la disminución de los caudales en los meses de verano para un año húmedo y para todos los meses en años normales y secos.

7.3.1.5 Levantamiento Hidrológico

Para el presente estudio se realizaron cuatro campañas de terreno, en donde se seleccionaron 17 puntos de medición, incluyendo el río Lluta como cauce principal y afluentes de importancia para la escorrentía de la cuenca. Los métodos de aforo utilizados fueron el molinete y de forma manual.

Por otra parte, existen registros históricos de aforos, los cuales se tuvieron en cuenta para caracterizar de mejor forma la hidrología de la cuenca en corrientes sin control fluviométrico por parte de la DGA. En la Tabla 7.45 se especifican las coordenadas de los puntos aforados tanto históricos como recientes y en las Figura 7.74 y Figura 7.75 se muestra su localización en la cuenca. Los resultados de las campañas hidrométricas de los puntos aforados, se presentan en las Tabla 7.46 y Tabla 7.47.

Tabla 7.45 Coordenadas de los puntos aforados en estudios de referencia y campaña reciente. Fuente: elaboración propia.

Sitio de Aforo	ID	DATUM WGS84 H19S		Año	Estudio de referencia
		UTM Este	UTM Norte		
Q. Putre en Jamiraya	NIE-1	434.307,9	7.985009,3	1966, 1968	Niemeyer (1968)
R. Lluta en Jamiraya	NIE-2	429.524	7.982.027		
R. Lluta en Chironta	NIE-3	417.913.4	7.974.664,4		
R. Caracarani en Humapalca	NIE-4	425.888	8.027.070		
R. Azufre antes junta con R. Caracarani	NIE-5	422.351	8.013.349		
R. Caracarani antes junta con R. Azufre	NIE-6	425.234	8.027.559		
R. Azufre después junta con R. Caracarani	NIE-7	425.102,8	8.027.387,3		
R. Lluta antes junta con R. Colpitas	NIE-8	433.282,1	8.010.391,7		
R. Colpitas antes junta con R. Lluta	NIE-9	433.773	8.010.594		
R. Lluta después junta con R. Colpitas	NIE-10	433.013	8.009.301		
Humapalca	AZ-1	424.056,12	8.028.107,28	1993	JICA-DGA (1995)
Humapalca	CR-1	425.825,53	8.028.113,89		
-	CV-1	431.132,35	8.026.296,25		
Q. Teleschuno	TL-2	432.892,58	8.026.296,25		
-	GC-1	436.429,79	8.026.329,78		
-	CQ-1	438.206,77	8.024.485,74		
-	CP1	450.589,4	8.015.261,38		
-	AL-1	450.589,4	8.011.599,54		
Q. Llancomane	PT-1	445.341,37	7.991.298,62		
Q. Pacollo	PT-2	447.119,38	7.991.298,62		
Q. Taipicahua	PT-3	447.129,96	7.989.446,53		
Q. Jurase	PT-4	447.108,79	7.987.615,61		
Canal Lluscuma	PT-5	447.108,79	7.987.615,61		
-	AR-1	441.845,78	7.983.960,91		
-	SR-1	445.417,66	7.980.256,74		
Chapisca	LT-1	403.179,59	7.967.158,87		
-	A-1	425.359,19	8.026.979,49		
-	A-2	425.359,19	8.026.979,49		
-	A-3	425.031,78	8.027.594,64		
-	A-4	425.147,53	8.027.561,57		
-	A-5A	421.639,81	8.029.917,69		
-	A-5B	421.639,81	8.029.917,69		
-	A-8	415.703,61	8.036.323,91		
-	A-10	413.927,15	8.037.112,71		
-	A-11	413.986,81	8.036.986,76		
-	A-12	412.936,52	8.040.210,82		
-	A-13	413.323,48	8.039.873,48		
-	AV-1	412.847,27	8.040.789,6		

Sitio de Aforo	ID	DATUM WGS84 H19S		Año	Estudio de referencia
		UTM Este	UTM Norte		
-	AV-2	412.936,52	8.040.733,38		
-	AV-3	412.814,15	8.040.336,5		
-	AV-4	412.817,46	8.040.293,51		
-	AV-5	412.817,46	8.040.293,51		
-	C-1	433.245,56	8.009.734,51		
-	C-2	433.305,09	8.010.349,67		
-	C-3	433.539,25	8.010.163,14		
-	C-4	437.207,71	8.010.888,09		
-	C-5	437.215,64	8.010.919,85		
-	C-6	439.922,34	8.012.959,79		
-	C-9	451.446,66	8.011.885,29		
-	C-10	451.944,08	8.013.155,3		
-	C-11A	454.822,75	8.014.541,71		
-	C-11B	454.822,75	8.014.541,71		
-	C-12	453.690,33	8.011.588,96		
-	C-14	451.436,07	8.011.663,04		
-	CV-1	437.128,33	8.010.832,53		
-	CV-2	435.834,52	8.010.276,91		
-	CV-3	435.834,52	8.010.276,91		
-	CV-4	434.773,53	8.010.083,76		
-	CV-5	436.437,77	8.010.824,59		
R. Lluta en ruta 5	LLAS-18	362.763	7.965.179	2015-2016	ICASS (2016)
R. Lluta puente camino a Putre	LLAS-21	368.903	7.964.225		
R. Lluta en el Jordan	LLAS-23	377.769	7.964.972		
R. Lluta en puente Poconchile	LLAS-25	387.019	7.959.943		
R. Lluta en estación fluviométrica DGA	LLAS-29	403.216	7.968.291		
	LLAS-31	437.312	7.980.485		
-	LLAS-32	436.068	7.982.283		
-	LLAS-33	439.904	7.988.077		
-	LLAS-34	442.266	7.988.095		
-	LLAS-38	444.380	7.991.932		
R. Colpitas antes de la confluencia del R. Lluta	LLAS-39	433.565	8.010.221		
R. Lluta antes de la confluencia del R. Colpitas, Q Allane	LLAS-40	433.267	8.010.326		
-	LLAS-42	436.202	8.026.327		
-	LLAS-43	438.223	8.024.375		
-	LLAS-44	432.981	8.020.814		
	LLAS-45	425.588	8.026.722		
	LLAS-111	432.372	7.968.135		

Como se observa en las Figura 7.74 y Figura 7.75, existe similitud en la localización de algunos aforos históricos con aforos recientes realizados en la cuenca. A continuación se comenta en detalle.

El punto LLAS-40 se ubica en el río Lluta antes de la confluencia con el río Colpitas, este coincide con los aforos históricos NE-8 (Niemeyer, 1968) y C-2 (JICA-DGA, 1995). A nivel mensual es consecuente el mes de noviembre, para el año 1966 se aforó un caudal de 781 l/s, en el año 1993 el caudal fue de 564 l/s y en el año 2015 el caudal fue de 537 l/s. Dada la poca diferencia encontrada entre los caudales, se podría decir que en este punto del río Lluta, el caudal se logra mantener constante.

El punto LLAS-39 se ubica en el río Colpitas antes de la confluencia con el río Lluta, este coincide con el aforo histórico C-3 (JICA-DGA, 1995). A nivel mensual es consecuente el mes de noviembre, para el año 1993 se aforó un caudal de 346 l/s y en el año 2015 el caudal fue de 245,4 l/s. Se podría decir que el caudal pasante en este punto del río Colpitas disminuyó aproximadamente un 29%. Sin embargo, como se mencionó anteriormente los aforos sólo representan un instante específico y está fuertemente influenciado por las actividades que ocurren aguas arriba.

Otros aforos coinciden en localización pero difieren en los meses aforados. Estos son el aforo LLAS-42 y el aforo histórico GC-1 (JICA-DGA, 1995), el aforo LLAS-43 y el aforo histórico CQ-1 (JICA-DGA, 1995), y el aforo LLAS-29 y el aforo histórico LT-1 (JICA-DGA, 1995).

Comparando los aforos LLAS-45 y LLAS-44 realizados en las campañas Nov/2015 y Mar/2016, ambos sobre el río Lluta parte alta, el primero aguas arriba del otro a una distancia aproximada de 9,5 km. Se logra ver el aumento del caudal en el río en aproximadamente 1,5 veces, una vez recibe los aportes de afluentes intermedios, además de las precipitaciones registradas de diciembre a marzo.

Al analizar el tramo del río Lluta antes (aforo LLAS-40) y después (LLAS-41) de recibir el aporte de la cuenca de drenaje del río Colpitas (aforo LLAS-39), de las mediciones de May/2016 y Ago/2016, se observa un aumento significativo en el caudal del río. Se podría decir que el aporte de la subcuenca intermedia, varía según la temporada de precipitaciones, los caudales aforados fueron de 387 l/s en mayo y de 182,4 l/s en agosto.

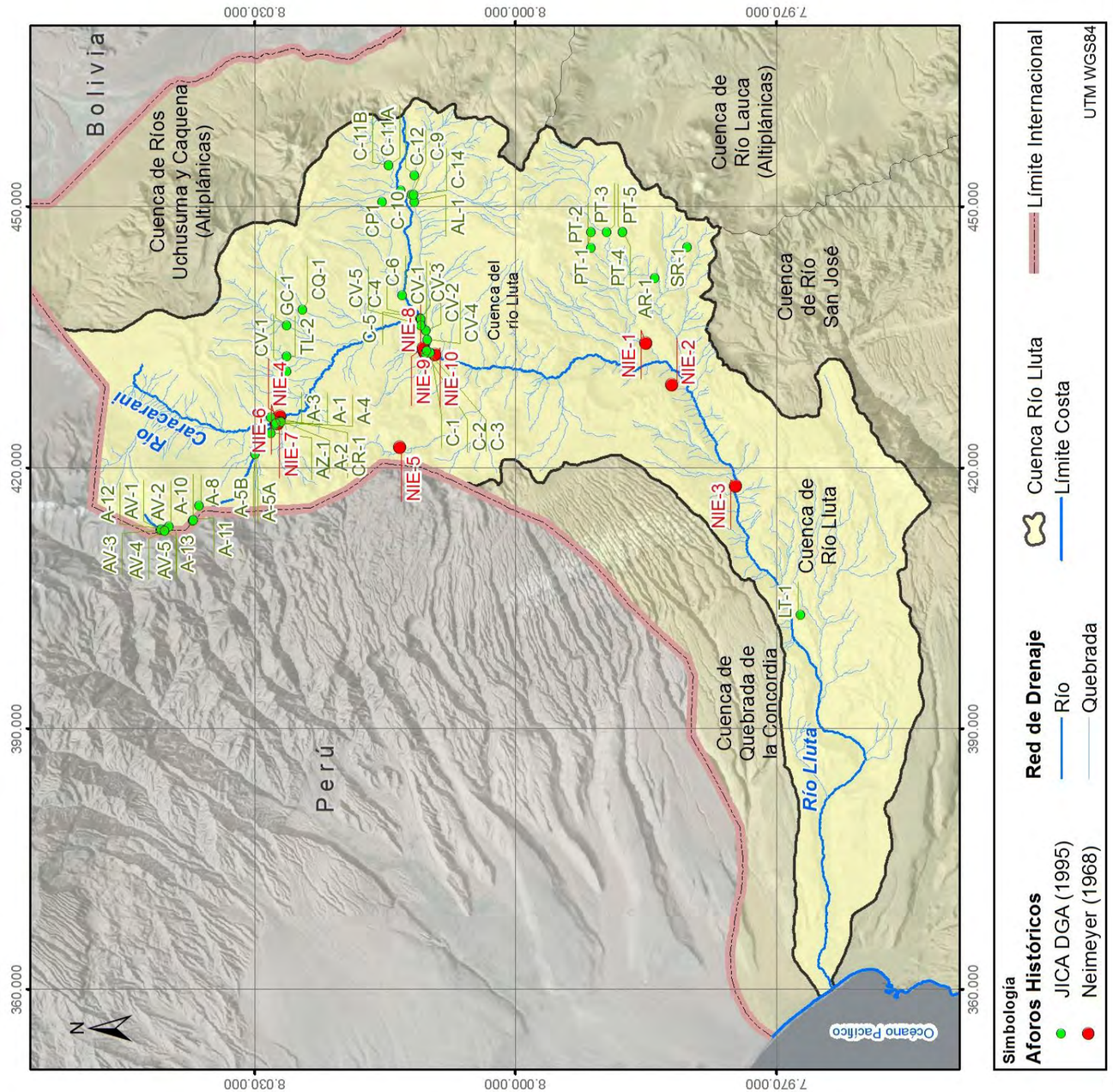


Figura 7.74 Localización de los aforos históricos encontrados en la cuenca del río Lluta. Fuente: elaboración propia.

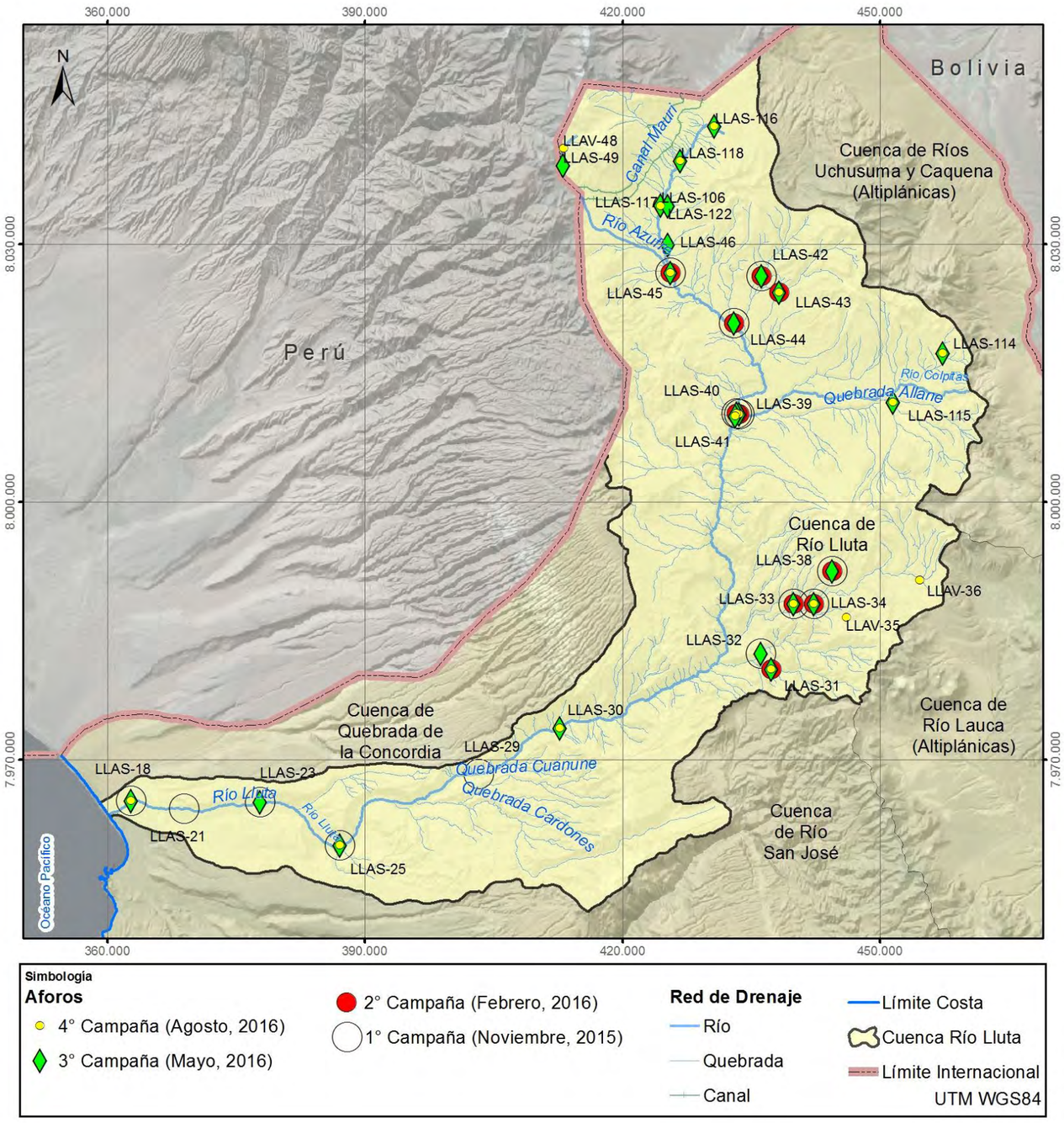


Figura 7.75 Localización de los aforos en las cuatro campañas de este estudio en la cuenca del río Lluta. Fuente: elaboración propia.

Tabla 7.46 Caudales obtenidos de las campañas de aforos en la cuenca del río Lluta. Fuente: elaboración propia.

Nº	Sitio de aforo	CAUDAL AFORADO							
		Campaña I 13-17 Nov 2015		Campaña II 1-3 Mar 2016		Campaña III 12,18-25 May 2016		Campaña IV 5-11, 23 Ago 2016	
		Método	Q [l/s]	Método	Q [l/s]	Método	Q [l/s]	Método	Q [l/s]
1	LLAS-18	Molinete	21,6			Molinete	492,5	Molinete	367
2	LLAS-21	Molinete	42,3						
3	LLAS-23	Molinete	29,4			Molinete	963,1		
4	LLAS-25	Molinete	369,9			Molinete	967,4	Molinete	1.120,1
5	LLAS-29	Molinete	1.213,8						
6	LLAS-30					Molinete	2.085,4	Molinete	1.595
7	LLAS-31			Manual	140,6	Manual	28,9	Manual	7,9
8	LLAS-32	Manual	36,1			Manual	13,8		
9	LLAS-33	Manual	27,1	Manual	85,9			Manual	29,6
10	LLAS-34	Manual	41,2	Manual	242,1	Manual	15,3	Manual	17,2
11	LLAV-35							Manual	5
12	LLAV-36							Manual	7,14
13	LLAS-38	Manual	78,4	Manual	60,6	Manual	53,1		
14	LLAS-39	Molinete	245,4	Molinete	743,0		387,1	Molinete	182,4
15	LLAS-40	Molinete	537,0	Molinete	2.065,1		843,5	Molinete	620,4
16	LLAS-41					Molinete	1.299,2	Molinete	1.403,3
17	LLAS-42	Manual	161,3	Molinete	204,6	Molinete	207,4		
18	LLAS-43			Manual	214,2	Molinete	74,1	Manual	42,5
19	LLAS-44	Molinete	280,0	Molinete	1.150,2	Molinete	315,7		
20	LLAS-45	Molinete	166,2	Molinete	778,4	Molinete	565,3	Molinete	338,9
21	LLAS-46					Manual	20,7		
22	LLAV-48							Manual	0,11
23	LLAS-49					Manual	96,5		
24	LLAS-106					Manual	132		
25	LLAS-111	Molinete	21,6	Manual	34,6				
26	LLAS-114					Manual	21,5	Manual	8,34
27	LLAS-115					Manual	3,2	Manual	15,3
28	LLAS-116					Manual	10,5	Manual	4
29	LLAS-117							Molinete	140,3
30	LLAS-118					Manual	69,4	Manual	140,3
31	LLAS-122					Manual	3,5		

Tabla 7.47 Registro de los aforos históricos encontrados en la cuenca del río Lluta. Fuente: elaboración propia.

ID Sitio Aforado	Año	CAUDAL AFORADO [l/s]											
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
NIE-1	1968							324					
NIE-2								1.940					
NIE-3								1.700					
NIE-4								179					
NIE-5	1966										20	36	
NIE-6											286	266	
NIE-7											313	300	
NIE-8											585	781	
NIE-9	1968 1966							410			350	431	
NIE-10	1968 1966							629			952	1134	
AZ-1	1993						76						
CR-1							394						
CV-1							82						
TL-2							7						
GC-1							168						
CQ-1							77						
CP1							211						
AL-1							20						
PT-1							43						
PT-2							17						
PT-3							184						
PT-4							9						
PT-5							62						
AR-1							33						
SR-1							12						
LT-1							1.184						
A-1												242	
A-2												0	
A-3												74	
A-4												173	
A-5A												119	
A-5B												0	
A-8												48	
A-10												48	
A-11												6	
A-12												14	

ID Sitio Aforado	Año	CAUDAL AFORADO [l/s]											
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
A-13												39	
AV-1												2	
AV-2												3	
AV-3												0	
AV-4												1	
AV-5												1	
C-1												932	
C-2												564	
C-3												346	
C-4												154	
C-5												110	
C-6												71	
C-9												6	
C-10												74	
C-11A												17	
C-11B												4	
C-12												2	
C-14												1	
CV-1												2	
CV-2												1	
CV-3												2	
CV-4												0	
CV-5												4	

7.3.1.6 Modelación hidrológica

Las generalidades del modelo hidrológico HEC-HMS utilizado para la modelación hidrológica de la cuenca se describen en el anexo VI. A continuación se detalla el planteamiento concebido, información base, parámetros calibrados y resultados obtenidos del modelo.

PLANTEAMIENTO DEL MODELO

La cuenca del río Lluta se dividió en dos subcuencas sobre el mismo cauce, una de la parte alta (río Lluta Alto) y otra de la parta baja (río Lluta Bajo). Para relacionarlas se utilizó un conector "Reach" que sirve para calcular el tránsito del hidrograma a medida que circula por el cauce. En representación de las extracciones de agua superficial se utilizó el ícono "diversion" y a la salida de la cuenca se utilizó un sumidero o "Sink". Ver esquema de la cuenca en Figura 7.76.

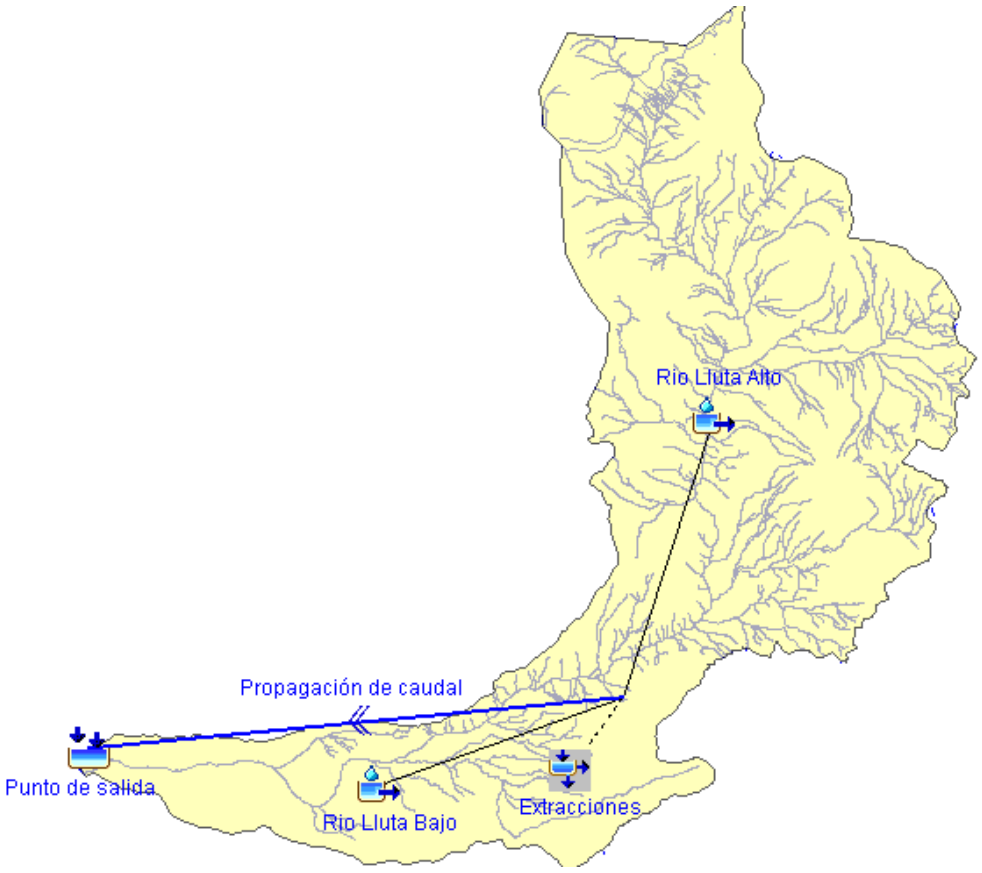


Figura 7.76 Esquema en el modelo hidrológico HEC-HMS de la cuenca del río Lluta. Fuente: elaboración propia.

MODELO METEOROLÓGICO

Las series meteorológicas utilizadas en cada subcuenca se describen a continuación:

- Precipitación diaria: los registros corresponden a las estaciones meteorológicas villa industrial (zona alta) y Putre (zona media-baja).
- Evaporación media mensual: los registros corresponden a las estaciones meteorológicas Putre (zona alta) y Azapa (zona media-baja).

ESPECIFICACIONES DE CONTROL

El intervalo del tiempo modelado es diario, la fecha de inicio fue 01-ene-1985 y la fecha de finalización fue 31-dic-2014.

INFORMACIÓN BASE

Se requiere ingresar parámetros físicos de la cuenca definidos por el modelo continuo seleccionado, así como información antrópica que eventualmente modifica las condiciones naturales del agua en la cuenca y registros fluviométricos para la posterior calibración. Las series de tiempo utilizadas se describen a continuación:

- El tiempo de retardo se determinó para cada subcuenca como el 60% del tiempo de concentración, aplicando la ecuación de *California Highways* en base a la longitud del cauce y al delta altitudinal.
- *Caudal diario observado*: para la calibración del modelo se utilizaron series de caudales diarios para el mismo periodo de la simulación de las estaciones Río Lluta en Alcérreca (zona alta) y Río Lluta en Panamericana (salida de la cuenca).
- *Caudal de extracción:* se utilizó el registro de concesiones de agua superficial de la DGA otorgadas en la cuenca, considerando que éste caudal es constante y de uso consuntivo, además de que no fuera mayor al disponible en el río.

Dado que no se cuenta con mediciones directas de todos los parámetros físicos requeridos para representar adecuadamente el comportamiento hidrológico de la cuenca, estos fueron objeto de calibración y los escogidos finalmente fueron los que mejor representaron los caudales simulados al comparar con los observados. En la Tabla 7.48 se presentan los parámetros físicos definidos para el modelo SMA.

El análisis estadístico de dicha comparación fue basado en los resultados del coeficiente Nash-Sutcliffe, ampliamente utilizado en la calibración de modelos hidrológicos para el chequeo de la bondad de ajuste. En la subcuenca Lluta Alto este valor fue 0,4 y a la salida de la cuenca fue de 0,59, siendo un ajuste bueno ≥0,4.

Tabla 7.48 Parámetros utilizados para el modelo SMA en la cuenca del río Lluta. Fuente: elaboración propia.

Zonas definidas en el modelo hidrológico	Parámetro	Unidad	Subcuenca Lluta Alto	Subcuenca Lluta Bajo
Intercepción vegetación	Almacenamiento inicial en vegetación	[%]	2	20
	Capacidad almacenada por intercepción de vegetación	[mm]	5	5
Acumulación en depresiones del terreno	Almacenamiento inicial en depresiones	[%]	2	20
	Capacidad almacenada en depresiones	[mm]	10	5
	Infiltración máxima	[mm/h]	8	20
Zona no saturada (Matriz de Suelo)	Almacenamiento inicial en matriz de suelo	[%]	2	50
	Capacidad almacenada en el suelo	[mm]	20	20
	Capacidad almacenada en la zona de tensión del suelo	[mm]	8	8
	Percolación máxima del suelo hacia acuífero libre	[mm/h]	5	15
Zona saturada (acuífero superficial)	Almacenamiento inicial en acuífero superficial	[%]	2	50
	Capacidad almacenada en acuífero superficial	[mm]	20	50
	Percolación máxima del acuífero superficial hacia el acuífero profundo	[mm/h]	3	8
	Coeficiente de almacenamiento del acuífero superficial	[h]	500	500
Zona saturada (acuífero profundo)	Almacenamiento inicial en acuífero profundo	[%]	2	50
	Capacidad almacenada en acuífero profundo	[mm]	40	80
	Percolación máxima del acuífero profundo	[mm/h]	1	4
	Coeficiente de almacenamiento del acuífero profundo	[h]	500	500

RESULTADOS DEL MODELO HIDROLÓGICO

Se compararon a nivel diario los caudales observados con los caudales simulados, existiendo similitud en algunos y diferencias en otros para todo el periodo analizado. Sintetizando dicha información, se calculó el caudal medio anual en los años con más de 9 meses de información en el caso de los datos observados. Los registros incompletos de la estación Río Lluta en Alcérreca fueron los años 1992, 2005 y el periodo 2001-2003. En la estación río Lluta en Panamericana los años incompletos fueron 1988, 1996 y el periodo 2012-2014.

Los resultados del caudal observado y caudal simulado a nivel medio anual se muestran en las Figura 7.77 y Figura 7.78 para la subcuenca Lluta alto y subcuenca Lluta bajo, respectivamente. Se observa en general que los caudales simulados están subestimados en relación a los observados, especialmente a partir del año 1997, situación que podría atribuirse a la regulación de las extracciones aguas arriba, las cuales fueron consideradas constantes en el modelo, además el cauce pudo haber recibido escurrimientos adicionales por crecidas instantáneas que superan los valores medios. Cabe mencionar que la cuenca del río Lluta, es una de las cuencas de la región con mayor intervención antrópica, lo que resulta complejo caracterizar a cabalidad.

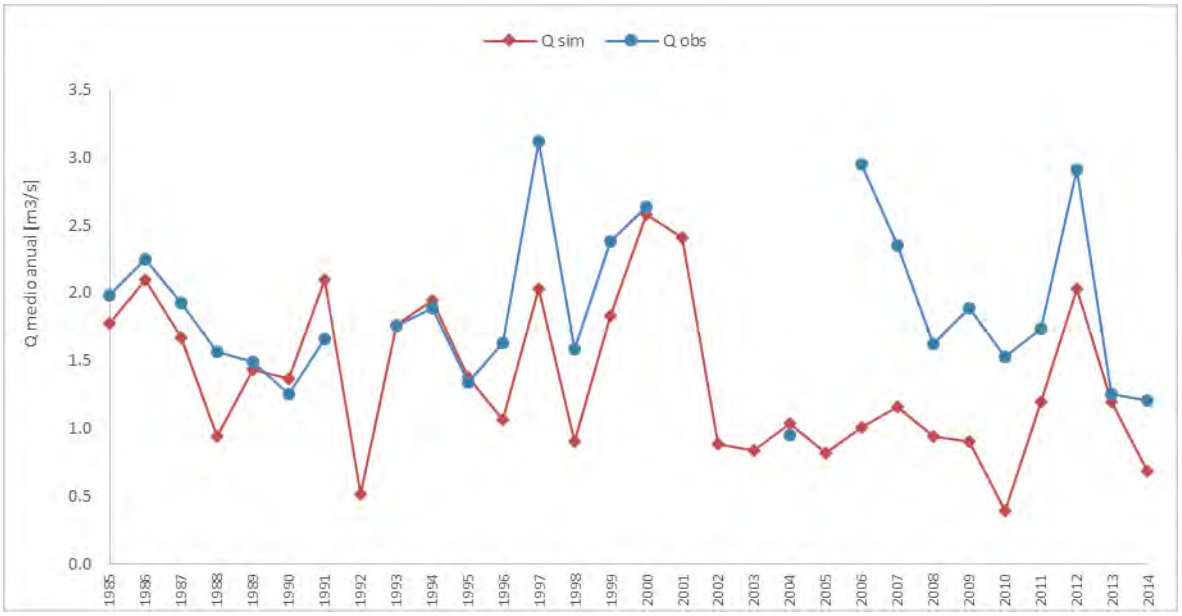


Figura 7.77 Comparación caudales medios anuales observados y simulados en la subcuenca Lluta Alto. Fuente: elaboración propia.

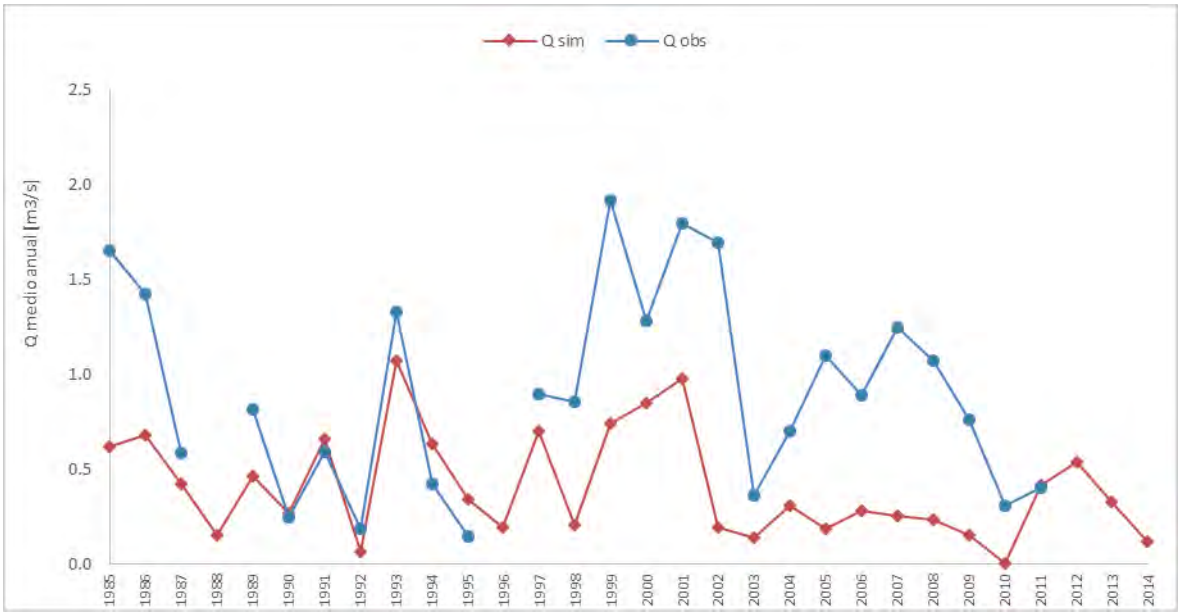


Figura 7.78 Comparación entre el caudal medio anual observado y el simulado en la subcuenca Lluta Bajo. Fuente: elaboración propia.

7.3.1.7 Estimación de la recarga de aguas subterráneas

La recarga del acuífero del valle de Lluta proviene de distintas fuentes. Al acuífero percola agua proveniente de precipitaciones y de deshielos de las zonas más altas, que a su vez generan escurrimientos en sentido longitudinal por el valle, en donde parte de este caudal se infiltra. Así mismo, se considera que ocurre una recarga significativa durante las crecidas veraniegas de la Región.

ANTECEDENTES

En el estudio de JICA-DGA (1995) se realizó un balance hídrico simple, priorizando las intervenciones que afectan a la cuenca. De este modo, se calculó una estimación de los bombeos, caudales de riego, demandas de agua potable y agua para uso industrial. La recarga al acuífero en el valle del río Lluta fue calculada en función de la estimación efectuada en el valle de Azapa, considerando que presentan condiciones semejantes, pero suponiendo que la porosidad efectiva en el acuífero del Lluta es un 70% de la del Azapa. Con este factor, se calculó que el 53% del agua superficial infiltra recargando al acuífero, siendo del orden de los 572 l/s anual.

De acuerdo al documento "Plan de acción estratégico para el desarrollo hídrico de la región de Arica y Parinacota" liderado por la DGA (2010), en la cuenca del río Lluta

existe un sistema hidrogeológico que se desarrolla preferencialmente en la zona baja del Valle, entre la localidad de Rosario y Lluta en Panamericana. El volumen total almacenado se estima del orden de los 110 millones de m^3 y se considera que la recarga media anual del acuífero es de 460 l/s.

De otro modo, GFC Ingenieros Ltda. (2010) en el estudio "Metodología para la estimación de recarga de cuencas altiplánicas y precordilleranas de vertiente pacífica en el norte de Chile, XV, I, II y III regiones", obtuvieron recargas para un escenario promedio del orden de los 2.904 l/s y 838 l/s en las cuencas del río Lluta Alto y del río Lluta bajo río Azufre, respectivamente. Estos valores representan el 23% de la precipitación media anual calculada en el estudio.

En el estudio "Mejoramiento del sistema de gestión y control de los recursos hídricos asignados en el río Lluta y construcción de un modelo de operación hídrica de la cuenca" liderado por INH-MOP (2013), se constató para los aforos realizados en su momento, que las pérdidas del caudal por infiltración, varían entre el 7% y 26% con respecto al caudal medido en la sección del río Lluta en Sacapa. El porcentaje mayor de pérdida, se presenta en caudales bajos, del orden de los 60 l/s, mientras que para los caudales altos, las pérdidas no superan el 11 %.

ANÁLISIS DE LA RECARGA: RELACIÓN PRECIPITACIÓN - ESCORRENTÍA

Para la estimación de la recarga media anual, se implementó una metodología regional ampliamente desarrollada para las cuencas altiplánicas y precordilleranas de vertiente pacífica, como referencia principal se contó con el estudio SDT N° 317 liderado por DEP-DGA (2011). Adicionalmente, para distribuir la recarga a nivel mensual, en este proyecto se plantea una metodología simplificada basada en los procesos hidrológicos que predominan en la región. Los detalles del procedimiento realizado en las cuencas de la región de Arica y Parinacota se presenta en el Anexo VI.

Con relación a las subcuencas analizadas en la cuenca del río Lluta, en la Tabla 7.49 se presenta la información base utilizada. Cabe mencionar que el cálculo de la precipitación media anual se realizó utilizando el método de las isoyetas, descrito en el capítulo "Hidrometeorología" del Análisis Regional y para el caudal medio anual se contó con la información de las estaciones fluviométricas río Lluta en Alcérreca y río Caracarani en Humapalca.

Tabla 7.49 Información base utilizada de cada subcuenca del río Lluta. Fuente: elaboración propia.

Subcuencas	Coord. UTM N del Centroide	Altitud media [msnm]	Área [km^2]	Pp media anual [mm/año]	Pp media anual [l/s]	Q medio anual [l/s]
Río Lluta alto	8.024.419	4.769	1.357	264	11.358,7	1.970
Rio Lluta bajo Río Azufre	8.039.897	4.967	308	275	2.685,8	350

Para la estimación de la recarga neta, se estableció una relación entre el promedio de los caudales mínimos decadales (meses de junio, julio y agosto) y los caudales medios observados, y lo mismo pero con los caudales calculados. Lo anterior se adoptó siguiendo las hipótesis y conceptos hidrológicos del estudio SIT N° 317, a continuación se describen:

- Los flujos subterráneos son despreciables y los caudales superficiales controlados a la salida de la cuenca representan la escorrentía total.
- Se entenderá como "recarga neta de la cuenca", aquella parte de la escorrentía total de salida de una cuenca, compuesta por el agua que ha infiltrado al menos una vez y que ha transitado subterráneamente en algún momento, tal que su permanencia dentro de la cuenca es superior a la de un año hidrológico.
- Esta recarga neta o caudal base interanual de salida de la cuenca puede ser estimada, como el promedio de los mínimos decadales observados entre los meses de junio, julio y agosto. Existe consenso en interpretar las series hidrológicas del norte de Chile, bajo la perspectiva de ciclos hidrológicos decadales, a partir de los cual es razonable estimar el flujo base como el promedio de los 4 mínimos decadales observados históricamente.

De acuerdo a las correlaciones obtenidas, es factible asumir que la recarga neta en las cuencas altiplánicas de la XV Región, corresponde entre el 43% y el 46% de la escorrentía total. Adicionalmente, Aquaterra Ingenieros Ltda. (2011) en el estudio SIT N° 251, encontraron que los flujos subterráneos en las cuencas del río Lluta Alto y río Lluta bajo río Azufre son despreciables frente al caudal de salida observado. En la Tabla 7.50 se muestran los valores de la estimación de la recarga neta.

Tabla 7.50 Caudales considerados en la correlación y estimación de la recarga neta. Fuente: elaboración propia.

Subcuencas	Q obs. [l/s]	Q cal [l/s]	Q min decadal prom [l/s]	Recarga neta [l/s] (40% - Estudio SDT 137)	Recarga neta [l/s] (43% - Propuesto Actual)
Río Lluta alto	1.970	1.574	650	788	847
Rio Lluta bajo Río Azufre	350	387	213	140	151

SÍNTESIS DE LA ESTIMACIÓN DE LAS PRINCIPALES RECARGAS

Una vez revisados los antecedentes de la cuenca del río Lluta, relacionados con la estimación de la recarga y de analizar conceptualmente las componentes que condicionan el tránsito del agua hasta llegar al acuífero, fue adoptada la metodología regional propuesta por el estudio SIT N° 317 para la parte alta y en la parte baja se adoptó el valor citado en el estudio SDT N° 306.

Cabe mencionar que el valor obtenido de la recarga media anual en la cuenca, es un referente que consideró varias hipótesis y simplificaciones, anteriormente descritas. Sin duda la principal limitante en el análisis es la cantidad de información disponible, alguna de esta desconocida y/o no controlada. En la Tabla 7.51 se presenta de manera resumida las principales fuentes de recarga, el método utilizado y los valores estimados a nivel anual. Seguidamente en la Tabla 7.52 se presenta la distribución de la recarga estimada a nivel mensual, concentrándose esta en los meses con mayor registro precipitación, de enero a marzo.

Tabla 7.51 Síntesis de las principales estimaciones de recarga al acuífero en la cuenca del río Lluta. Fuente: elaboración propia.

Principales fuentes de recarga al acuífero	Método	valor estimado anual [l/s]		
		Río Lluta bajo río Azufre	Río Lluta Alto	Río Lluta Bajo
Percolación de la PRECIPITACIÓN que contribuye a la escorrentía en la parte alta	Relación precipitación-escorrentía. Metodología adoptada del estudio SIT N° 317- DEP-DGA (2011)	151	847	-
Recarga neta anual del FLUJO BASE en la caja del río Lluta en la parte alta				
Aporte de FLUJO SUBTERRÁNEO pasante desde la parte alta del valle y recarga por infiltración de EXCEDENTES DE RIEGO	Se adoptó la estimación realizada en el estudio SDT N° 114 - DEP-DGA (1998). Citada igualmente en el estudio SDT N° 306 - DEP-DGA (2010)	-	-	460

Tabla 7.52 Valores de la recarga media mensual estimada en la cuenca del río Lluta.

Subcuencas	Distribución mensual de la recarga estimada [l/s]											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Río Lluta alto	348	310	189	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Rio Lluta bajo Río Azufre	60	59	32	0	0	0	0	0	0	0	0	0

7.3.2 Marco geológico

La cuenca del río Lluta en su parte baja abarca la Cordillera de la Costa, la Depresión Intermedia y parte de la Precordillera. La parte alta de la cuenca del río Lluta, se extiende por parte de la Precordillera, pero principalmente por la Cordillera Occidental.

GEOLOGÍA

En esta cuenca no afloran las rocas asociadas al arco jurásico de la Cordillera de la Costa, pero sí lo hace la Formación Livilcar (JKil), entre las localidades de Chapisca y Socoroma, que se asocia al trasarco jurásico. Las rocas cretácicas de la zona son los intrusivos del Cretácico Superior − Paleoceno de Lluta (KPi (a)), que afloran en las quebradas de Lluta y Cardones; y los intrusivos del Eoceno (Eg), una franja de orientación NNW − SSE que aflora al sur del volcán Tacora.

Las rocas del Oligoceno-Holoceno que afloran en la cuenca del río Lluta son: la Formación Azapa (Oa), al noreste de la localidad de Chapisca; la Formación Oxaya (OMo) en la Precordillera y en la Depresión Central; la Formación El Diablo (Mimd), que se expone en el sector occidental de la Depresión Central; la Formación Huaylas (Msh) que aflora en la Precordillera, al sur de la localidad de Coronel Alcérreca; la Formación Lupica (OMl), que aflora principalmente en los alrededores de Putre, en la Cordillera Occidental; al este de Putre aflora la Formación Lauca (PlPl); la Ignimbrita Lauca (Pll) se ubica discontinuamente en la Cordillera Occidental, en la Precordillera y en la Depresión Central; la Formación Visviri (PPlv) se localiza en gran parte del sector alto de la cuenca, entre las localidades de Chislluma y Colpitas; y, entre Socoroma y Putre, aflora un intrusivo del Mioceno medio (Mmi).

Las rocas volcánicas cenozoicas que afloran en la cuenca del río Lluta son los volcanes y remanentes de volcanes del Mioceno inferior, medio y superior (Miv, Mmv y Msv), que afloran en la zona nororiental de la precordillera, entre Humapalca y Socoroma, y al este de Colpitas. Hay pequeños afloramientos de los volcanes y centros eruptivos menores del Plioceno (Plv), al este de Chislluma y al oeste de Colpitas. Los volcanes y centros eruptivos del Pleistoceno (Pv) y del Holoceno (Hv) afloran en la parte alta de la cuenca, en la cordillera Occidental.

Los depósitos no consolidados o semiconsolidados que se encuentran en la Cordillera de la Costa son los depósitos eólicos (Qe) se localizan en los alrededores de la localidad de Poconchile y los depósitos litorales (Ql) se localizan en la zona costera de la cuenca. En la Depresión Central y la Precordillera se pueden encontrar los depósitos de la avalancha Lluta (Msrl) localizados en la Depresión Central y borde occidental de la Precordillera, al norte y sur de la quebrada. Los depósitos salinos (PlHs) se localizan al noreste de la localidad de Chislluma, en el límite internacional con Perú. Los depósitos de remoción en masa y los depósitos coluviales (PlQr y Qc), los que se observan principalmente a lo largo de la quebrada de Lluta. Los depósitos aluviales (Pa, Ha) se disponen esencialmente como mantos, en las zonas de la Depresión Central. Los depósitos fluviales (Plf, Pf, Hf) se observan a lo largo de los cauces. Los depósitos que se encuentran en la Cordillera Occidental corresponden a los depósitos glaciales (Qg, PlHg), ubicados al este de Putre, los depósitos palustres (Hp) ubicados esencialmente en quebradas y depresiones de la Cordillera Occidental, los depósitos

antrópicos (Han) corresponden a limos, arcillas y arenas, acumulados en un embalse de regadío, al suroeste de Humapalca, al oeste de Pampa Chañonasa.

TECTÓNICA Y ESTRUCTURAS

La primera etapa (Jurásico Medio-Cretácico Inferior) se evidencia en la Depresión Central, en el curso medio de la quebrada Lluta, entre Tiñare y Millune: el Miembro Inferior de la Formación Livilcar se dispone predominantemente homoclinal, con 20 a 50° de manteo al oeste. Se observan discordancias angulares internas muy suaves y dos fallas subverticales, normales y de rumbo, syndepositacionales, indicando un episodio de extensión mientras se depositaban sedimentos marinos-litorales durante el Jurásico Inferior en el área. En el curso superior de la quebrada Lluta, al oeste de Putre, las capas de la Formación Livilcar se disponen moderadamente plegadas, en actitud homoclinal con 40 a 60° de manteo al oeste.

La segunda etapa no tiene más evidencia en la cuenca que los intrusivos cretácicos mencionados anteriormente. Sin embargo, durante la tercera etapa (Oligoceno-Holoceno) se producen los mayores cambios en el relieve y la deformación de este periodo se evidencia principalmente en la Precordillera y Cordillera Occidental.

En el curso medio-alto del valle Lluta, en la localidad de Iquecta, al este de Aranche, se observa una zona de fallas, de unos 2 km de ancho. Estas fallas subverticales de edad eocena y oligocena inferior temprana son de rumbo N5°E y muestran estrías subhorizontales dextrales y sinextrales alternadas y se podrían correlacionar con el sistema de fallas Domeyko, de dirección general norte-sur y movimientos de rumbo alternados, transpresivos y compresivos, de similar edad.

La deformación oligocena se expresa en la cuenca con: la falla Ausipar aflora con un rumbo N30°W y un manteo variable desde 50°E hasta subhorizontal en la quebrada Lluta, localidad de Tiñare. Su desplazamiento se amortigua en la parte inferior de la Formación Oxaya. Hacia arriba, la falla se propaga a un pliegue en las capas superiores de la Formación Oxaya. En Millune, 3 km al este de Tiñare, aflora una falla norte-sur, subvertical inclinada al este, que corta las rocas de la Formación Livilcar. Hacia arriba, en las capas de la Formación Oxaya, existe una suave flexura monoclinal, generada por el último movimiento (Mioceno) subvertical de la falla y cuya prolongación al sur se

uniría con la traza de la Falla Ausipar. Por esto, la falla de Millune puede ser considerada como una rama oriental secundaria de la Falla Ausipar.

La deformación de edad Miocena-Holocena se evidencia con las siguientes estructuras: entre los anticlinales de Huaylillas y Oxaya, entre Puquios y el cordón Quevilque, se ubica un sinclinal ancho, muy suave, de longitud menor a 15 km, y flancos con manteos menores a 2°. Al norte, en el área entre el volcán Taapacá y la localidad de Zapahuira, el sistema de cabalgamientos y pliegues de vergencia oeste está representado por anticlinales y sinclinales, de rumbo N-S a N20°W, los cuales están montados hacia el oeste por fallas inversas. Al noroeste de Putre, una falla inversa, de 15 km de largo y bajo ángulo, monta las capas plegadas de la Formación Lupica sobre las capas subhorizontales de la formaciones Oxaya y Huaylas. Al este de Socoroma, el pliegue más occidental del sistema corresponde a un sinclinal asimétrico, con flancos 30-40°E y 50-70°W, cortado en la base por la falla Socoroma que monta, hacia el oeste, la Formación Lupica sobre la Formación Oxaya y el volcán Quevilque.

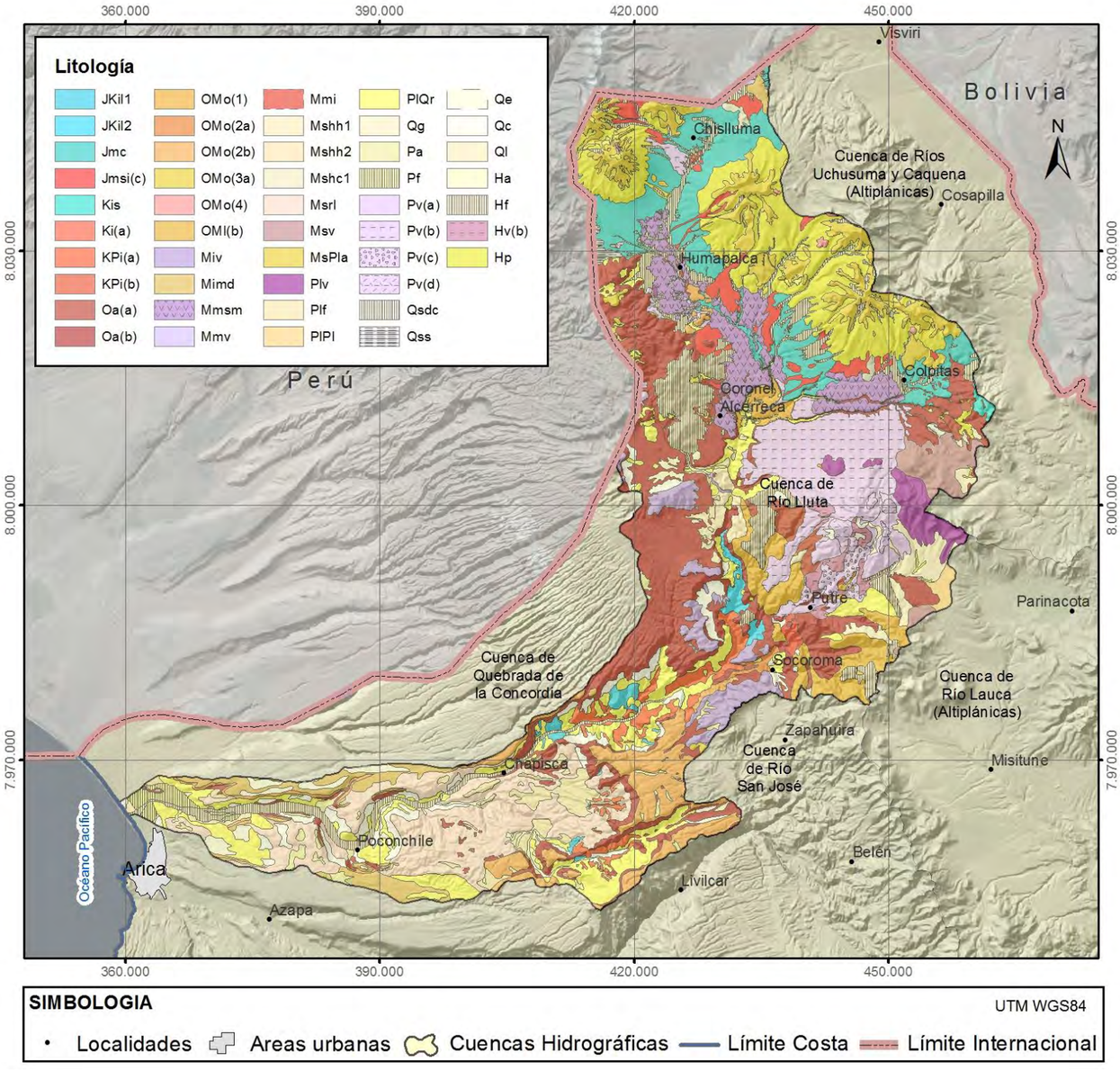


Figura 7.79 Mapa geológico de la cuenca del río Lluta. Fuente: modificado de García *et al.* (2004) y García (2012).

7.3.3 Caracterización Hidrogeológica

7.3.3.1 Estudios existentes

Para una mejor compresión del comportamiento hidrogeológico de la cuenca del río Lluta, ésta se ha dividido en la subcuenca del río Lluta Alto y Bajo. Desde la década de los años 60 el valle del Lluta ha sido estudiado por el déficit de recursos hídricos en la ciudad de Arica y para aumentar la productividad de los cultivos. Desde el punto de vista hidrogeológico se ha investigado en detalle el sector bajo del valle del río Lluta, y algunos sectores muy puntuales como el río Colpitas y el sector de Alcérreca y a rasgos generales el resto de la cuenca.

Niemeyer (1968) evaluó la opción de desviar el río Caquena hacia el río Lluta para mejorar la calidad de este último y además evaluó la ubicación de un embalse en el río Lluta. En el Anexo VI de geología se describen las unidades estratigráficas e intrusivas.

En el año 1976 el Instituto de Investigaciones Geológicas (Henríquez *et al.*) describió a nivel general las unidades acuíferas y el basamento de toda la cuenca. En éste se cita de un modo general que el acuífero de la subcuenca del río Lluta Alto, desde Caracarani hasta la quebrada Allane (Figura 7.64), corresponde a depósitos fluviales ubicados en las áreas inmediatas a los cursos superficiales que circulan en los cañones, ya que tales cursos constituyen los niveles bases de recarga de agua. A partir de la quebrada Huaylas (Figura 7.64), el río Lluta se encajona en unas rocas volcánicas de baja permeabilidad en que no se desarrollan acuíferos. En la subcuenca del río Lluta Bajo, se abre un valle encajonado en las rocas de baja permeabilidad de las Formaciones Oxaya y Azapa. Según Henríquez *et al.* (1976) el área de inundación del valle está formado por materiales de derrumbes de laderas y corrientes de barro que constituyen acuíferos de baja importancia hidrogeológica.

SUBCUENCA DEL RÍO LLUTA ALTO

En el año 2011 la minera Hemisferio Sur S.C.M. presentó un estudio de impacto ambiental (EIA), el cual incluyó la descripción de la geología, geomorfología, riesgos naturales, hidrología, hidrogeología y uso y calidad de suelo del sector alto de la cuenca, cerca de Alcérreca (Figura 7.64). En los trabajos de terreno se perforaron dos sondajes, RCLPA-1 y 2, cuya estratigrafía permitió desarrollar los perfiles que se

ubican en la Tabla 7.77 y se muestran en la Figura 7.81. La estratigrafía del sondaje RCLPA-1 presenta un estrato de arena gruesa de 0 a 37 m de, un estrato de limo y arcilla con intercalaciones de arena fina de 37 a 69 m y una capa de arena gruesa de 69 a 82 m. Mientras que el sondaje RCLPA-2 presenta una capa de arena gruesa de 0 a 56 m y un estrato de arcilla de 56 a 77 m.

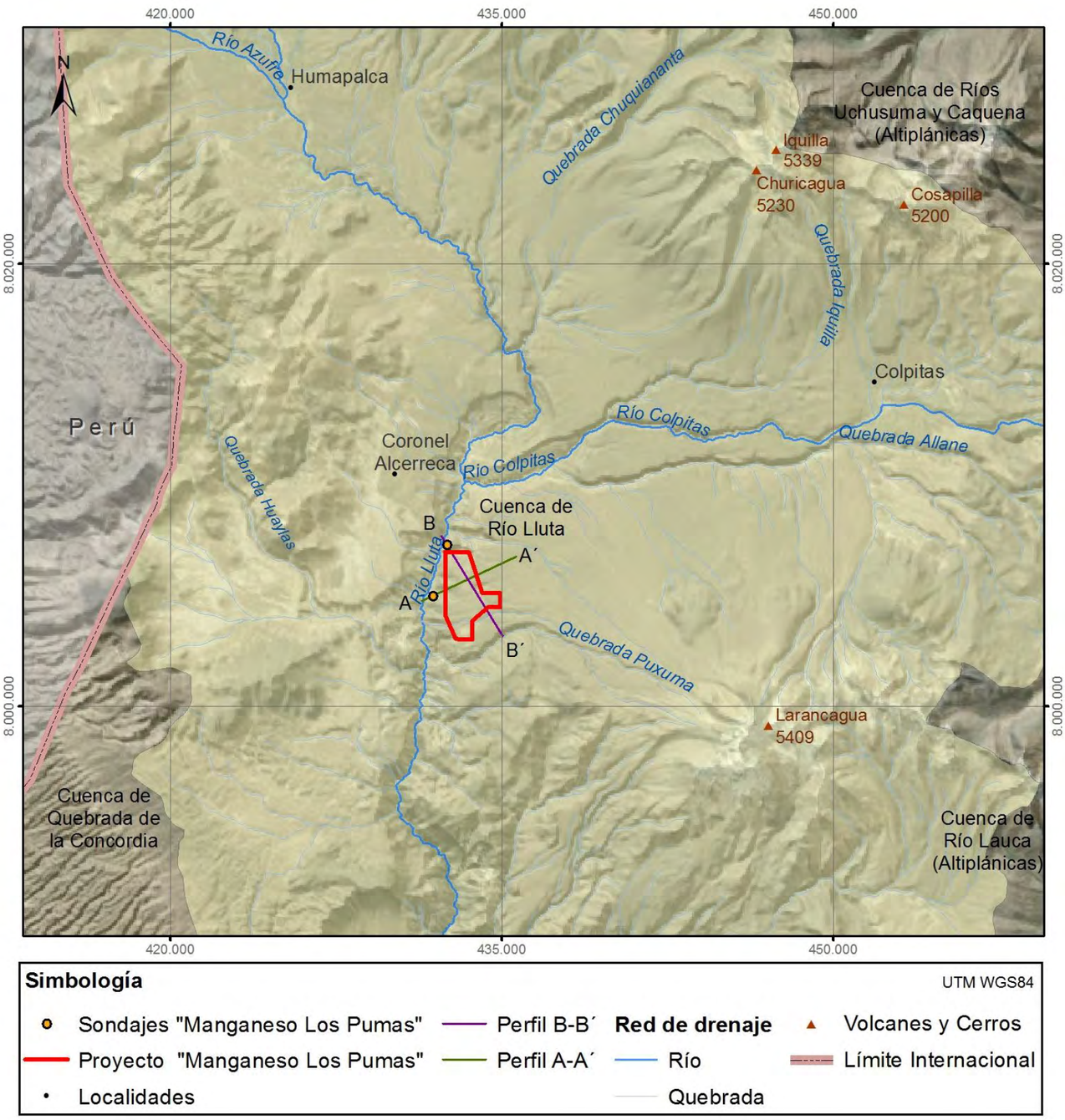


Figura 7.80 Ubicación **del proyecto minero "Manganeso Los Pumas" y de los sondajes. Fuente:** modificado de Aquaconsult (2010).

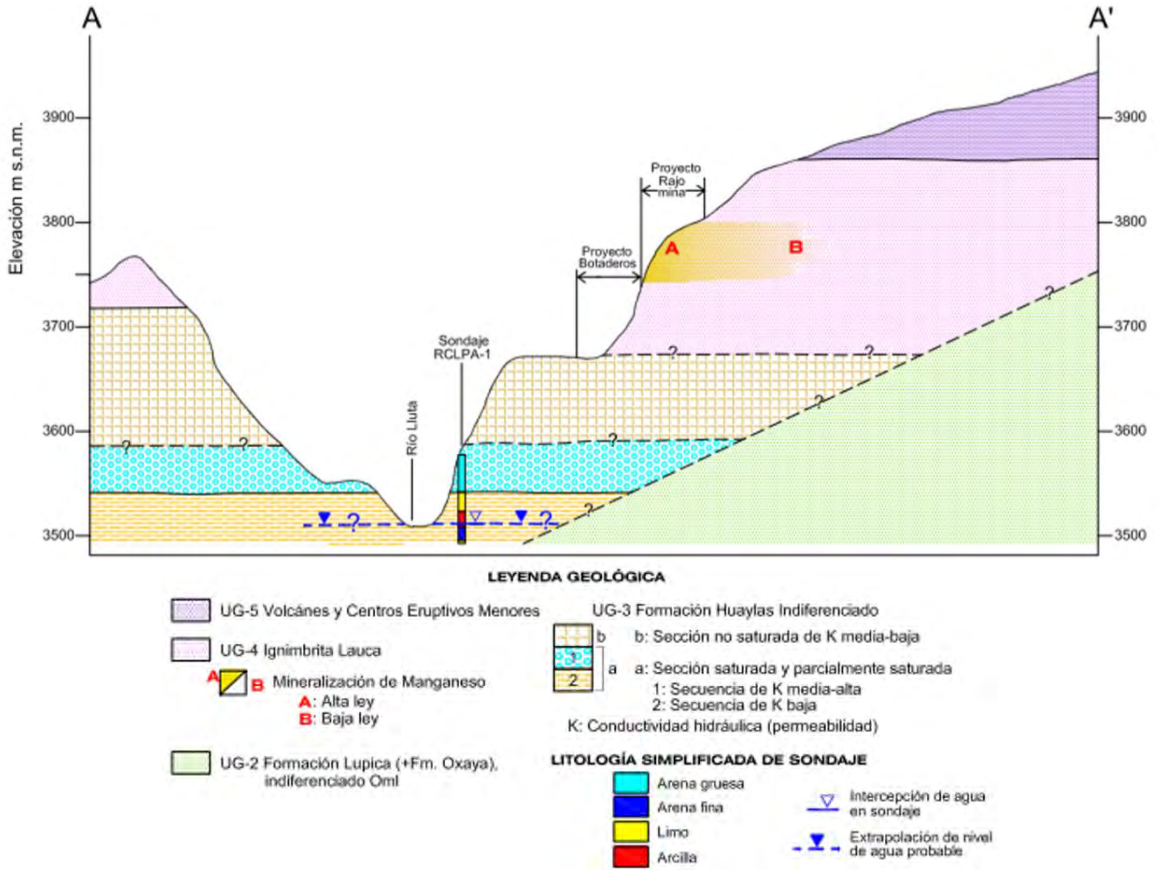


Figura 7.81 Perfil A-A' geológico-**hidrogeológico del proyecto "Manganeso Los Pumas". Fuente: Aquaconsult (2010).**

Aquaconsult (2010) identificó un basamento mesozoico que probablemente está afectado por la falla Copaquilla-Tignamar. A ésta sobreyace la Formación Lupica, cuyo techo se encuentra a 180-250 m de profundidad, la que también estaría afectada por esta falla. La Formación Lupica está compuesta por rocas sedimentarias, principalmente correspondientes a areniscas y fangolitas, con intercalaciones volcánicas que pertenecen a las partes media y superior de la Formación Lupica. Esta unidad al sufrir un alto grado de cementación y compactación reduce la permeabilidad a un nivel de baja-nula. La unidad con mayor capacidad acuífera del sector serían los depósitos coluviales y aluviales de 3 m de espesor, compuestos por materiales no consolidados y con permeabilidad primaria.

La siguiente unidad que sobreyace a la última y con capacidad acuífera sería una parte de la Formación Huaylas. La zona no saturada de la Formación Huaylas corresponde a 30 m de espesor de una secuencia subhorizontal compuesta por limos y arcillas con intercalaciones de arenas finas y un estrato de diatomita en la parte superior, 80 m de

alternancia de limos y arenas y otra secuencia de 50-70 m de arenas gruesas, parcialmente saturada, en que por debajo se encuentran sedimentos finos saturados.

A esta unidad sobreyace la Ignimbrita Lauca, que según Aquaconsult (2010) no presentaría agua subterránea. Y por último las rocas y conos volcánicos que no presentan conductividad hidráulica, pero que por fracturas de diaclasamiento originado en los procesos de enfriamiento pueden ser puntualmente buenos acuíferos.

A nivel local en el sector del proyecto minero "Manganeso Los Pumas", Aquaconsult (2010) estimó que la conductividad hidráulica primaria del basamento Mesozoico es baja a muy baja, del orden de 10^{-9} a 10^{-5} m/día, presentando una permeabilidad secundaria por fallas y fracturas de 10^{-5} a 1 m/día, del mismo modo que la Formación Lauca. La Formación Huaylas es la unidad con mayor capacidad acuífera de las identificadas en los sondajes, con una conductividad hidráulica estimada entre 10^{-2} y 10^{2} m/día. Sobre ésta se deposita la Ignimbrita Lauca cuya permeabilidad varía entre 10^{-3} a 1 m/día, sin embargo, se encuentra en una posición topográfica muy por encima del posible nivel freático. A ésta sobreyacen formaciones volcánicas y subvolcánicas cuyas permeabilidades primarias, Aquaconsult (2010) calificó como bajas a medias, 10^{-2} a 1 m/día y 10^{1} a 10^{2} m/día respectivamente, pero las fracturas de diaclasamiento originadas en el proceso de enfriamiento proporcionarían una permeabilidad secundaria media a alta, de 1 a 10 y 10 a 10^{2} m/día.

En el año 2011 la empresa Geodatos realizó una prospección geofísica mediante el método NanoTem en la cuenca del río Lluta, para ello se llevó a cabo un perfil en el río Caracarani en Humapalca y en el río Lluta en Alcérreca. Posteriormente, AMEC (2014) efectuó 4 perfiles de tomografía eléctrica en el río Colpitas con el objetivo de elaborar un modelo conceptual hidrogeológico de este sector. En la Figura 7.82 se muestra la ubicación de los 2 perfiles de Nano TEM efectuados por Aquaterra (2011) y la interpretación de los 4 perfiles TEM realizados por AMEC (2014).

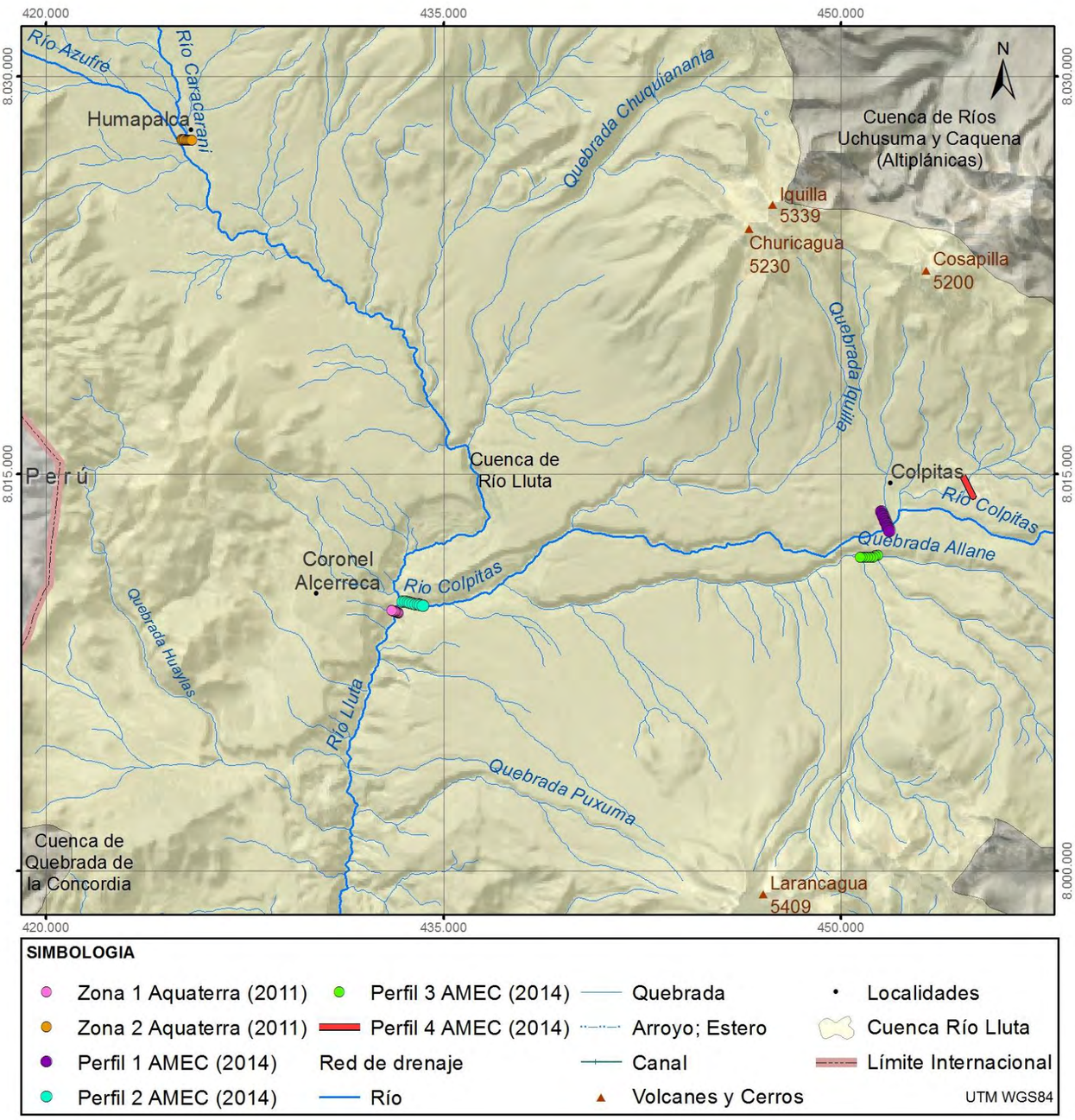


Figura 7.82 Ubicación de los perfiles Nano TEM efectuados por Aquaterra (2011) y los 4 perfiles TEM realizados por AMEC (2014) en el sector alto de la cuenca del río Lluta. Fuente: elaboración propia.

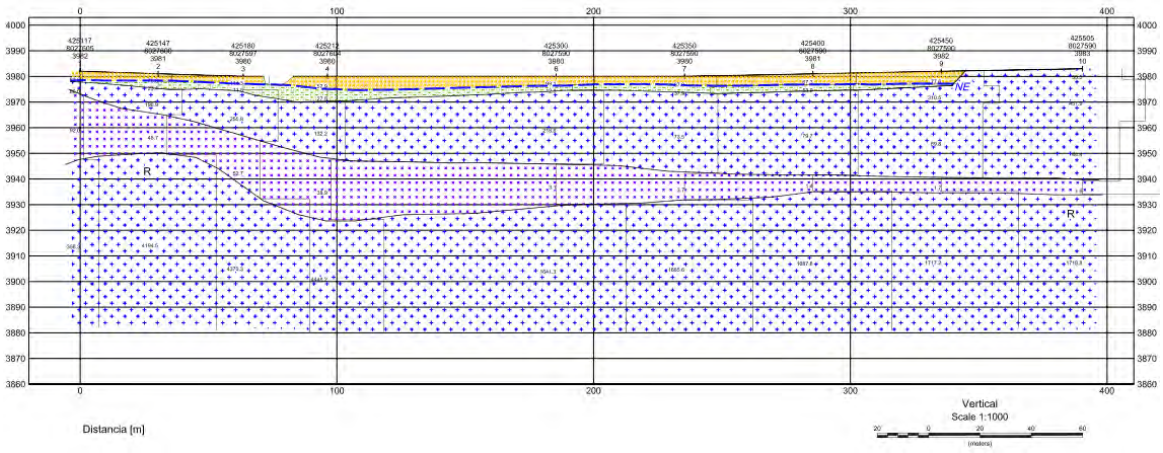


Figura 7.83 Perfil geofísico Zona 2 mediante Nano TEM transversal río Caracarani en Humapalca. Fuente: Aquaterra (2011).

En la Figura 7.84 se muestra el Perfil 1 transversal al río Colpitas realizado por AMEC (2014). En este perfil se observa como los depósitos de avalancha de detritos y la ignimbrita Lauca no están saturados los 30 m desde la superficie, sin embargo los depósitos aluviales y fluviales del Holoceno están saturados hasta prácticamente la superficie. No se identifica un acuífero importante en este perfil.

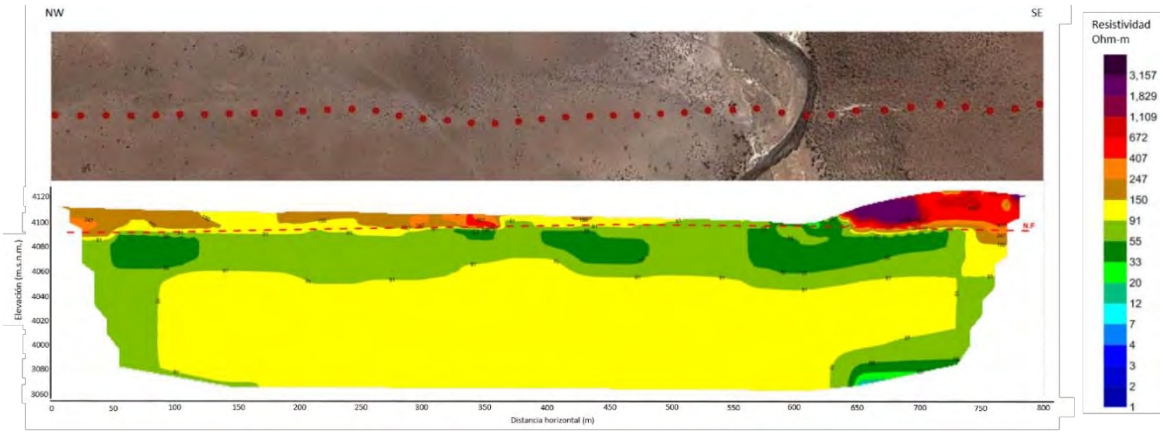


Figura 7.84 Perfil geofísico 1 transversal al río Colpitas. Fuente: AMEC (2014).

En el perfil 2 de la Figura 7.85 se encuentra en el río Colpitas antes de la confluencia del río Lluta. Se observa como es una zona de al menos 150 m de depósitos coluviales compuesto de gravas y arenas saturadas.

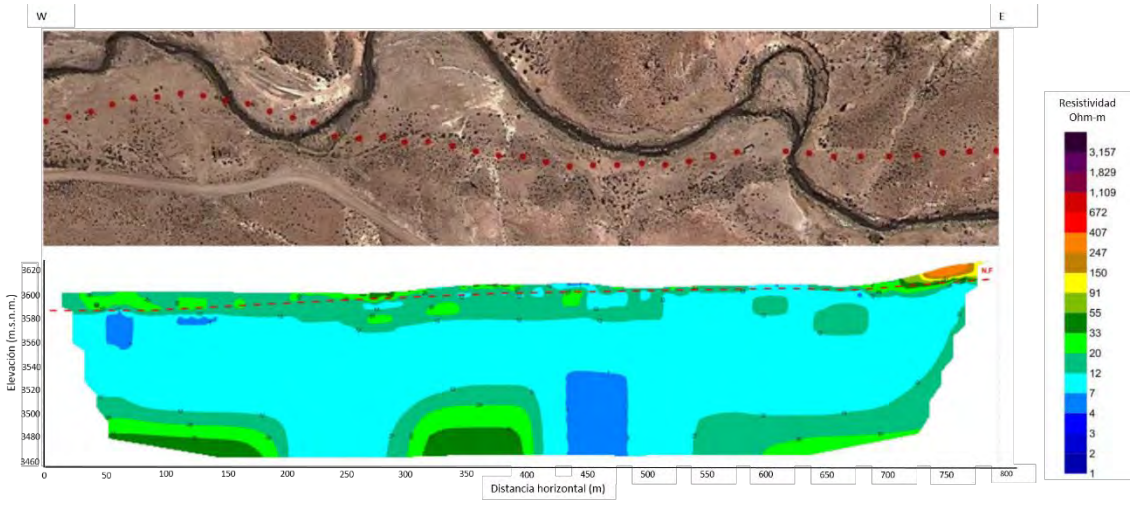


Figura 7.85 Perfil geofísico 2 transversal al río Colpitas. Fuente: AMEC (2014).

En la Figura 7.86 se muestra el Perfil geofísico 3 transversal a la quebrada Allane. Se observa que la ignimbrita y el domo dacítico en el que se encuentra el perfil son muy resistivos, por lo que el contenido en agua es bajo.

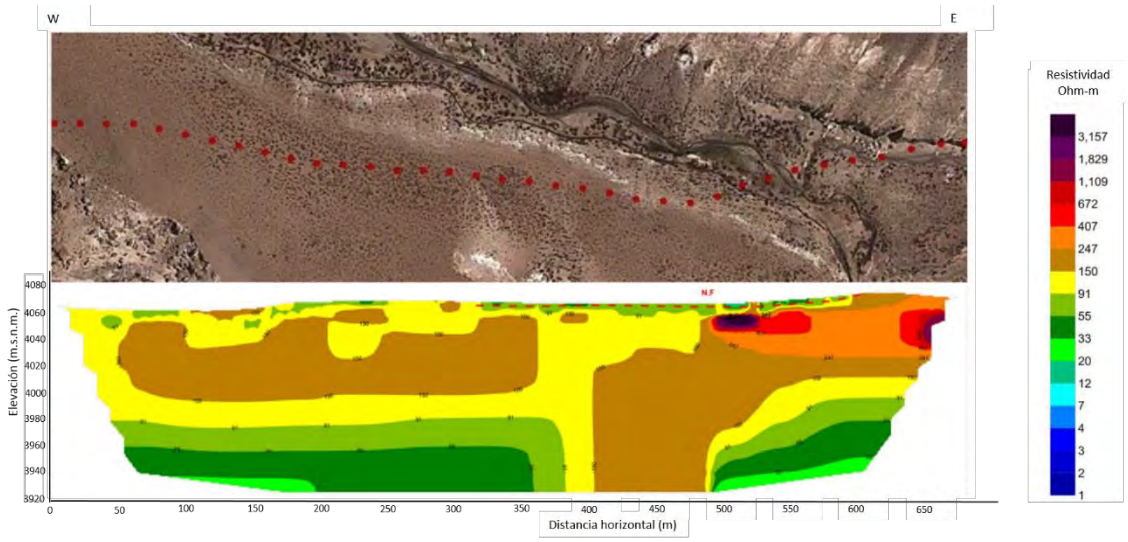


Figura 7.86 Perfil geofísico 3 transversal al río Colpitas. Fuente: AMEC (2014).

En el Perfil geofísico 4 que se presenta en la Figura 7.87 se identifica que la Formación Visviri y los depósitos palustres son materiales que muestran poca resistividad. Por lo tanto, se concluye que en este sector existen al menos 140 m de zona saturada.

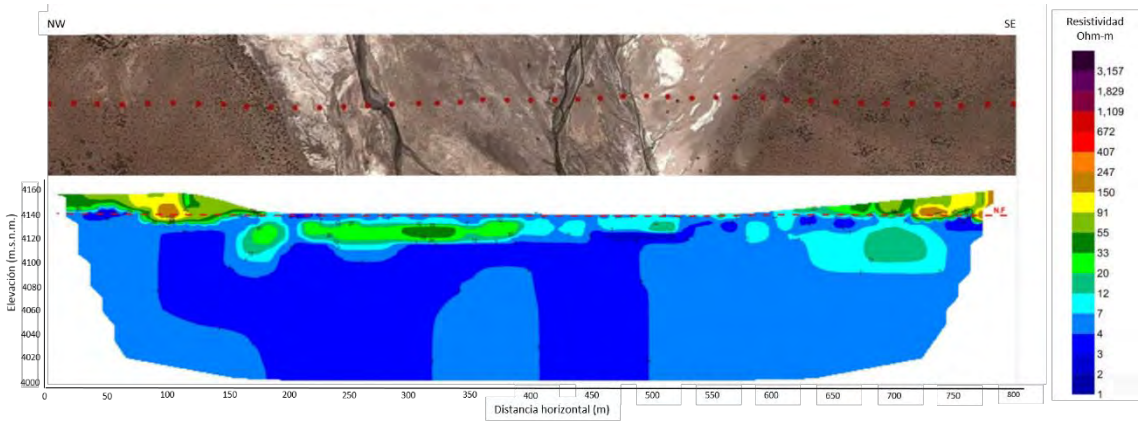


Figura 7.87 Perfil geofísico 4 transversal al río Colpitas. Fuente: AMEC (2014).

AMEC (2014) identificó, de un modo preliminar, ocho unidades geológicas de depósitos consolidados y cinco unidades geológicas de depósitos no consolidados a partir del mapa hidrogeológico de Chile (DGA, 1989) y de los mapas geológicos existentes en la región. Cabe destacar que AMEC (2014) aclaró que el grupo Terciario-Cuaternario son rocas fracturadas, que tienen una porosidad secundaria, y por eso la unidad tiene una importancia hidrogeológica baja a alta. A continuación se describen las unidades hidrogeológicas.

SUBCUENCA DEL RÍO LLUTA BAJO

Las unidades hidrogeológicas del valle de Lluta se analizaron con mayor detalle en el estudio de JICA (1995) mediante 5 perfiles electromagnéticos transversales al valle y en AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (1998c) a través de 3 perfiles gravimétricos y 9 sondajes eléctricos verticales y de los datos estratigráficos de los sondajes.

La JICA (1995) identificó en la zona del Lluta bajo dos sistemas acuíferos en el valle, los cuales se ubican en la zona de los depósitos fluviales que se distribuyen entre la carretera Panamericana y Rosario (aproximadamente 18 km) y en la Formación Concordia que se localiza en las áreas de aguas abajo de la carretera Panamericana (aproximadamente 2 km), los que se muestran en la Figura 7.89. Este informe determinó que en el tramo medio y superior del valle del río Lluta, los depósitos fluviales alcanzan un espesor de 200 m y se dividen en 3 unidades. Las unidades superior e inferior se componen principalmente de capas de grava con un diámetro de 5 a 30 cm y una matriz que está rellena principalmente con limo y arena muy fina originado de las cenizas volcánicas, mientras que la unidad media es una capa de toba

de baja permeabilidad. En el sector bajo del valle del río Lluta, la Formación Concordia compuesta principalmente de depósitos marinos alcanza un espesor de 200 m y se divide en 3 unidades. Las unidades superior e inferior son arenas no consolidadas y la unidad media lo constituyen cenizas volcánicas. Por lo tanto, según se puede observar en la Figura 7.89 estas dos formaciones componen los acuíferos superior e inferior. Según la JICA (1995), no habría tobas aguas arriba de Chacabuco, por lo que el río Lluta recargaría al acuífero inferior en este sector, pero aguas abajo de Chacabuco aparece la toba que confina al acuífero inferior siendo el acuífero superior el único que se recargaría de agua superficial. La JICA (1995) justificó los supuestos anteriores por dos razones, (1) el gradiente del agua subterránea del acuífero inferior es mayor que el gradiente del lecho del río aguas abajo de Chacabuco y (2) el contenido de nitratos del acuífero superior, es muy alto comparado con el acuífero inferior y el río, por lo tanto el acuífero superior se recarga con el agua superficial contaminada con fertilizantes y el nitratos se acumula en este acuífero.

Según se puede observar en la Figura 7.90, el basamento del sector bajo de la cuenca considera que lo componen las Formaciones Azapa, Oxaya y El Diablo (JICA, 1995).

En el estudio de JICA (1995) además se estimaron los parámetros hidráulicos del acuífero del valle del río Lluta a partir de la interpretación de las pruebas de bombeo de corta duración en sus sondajes.

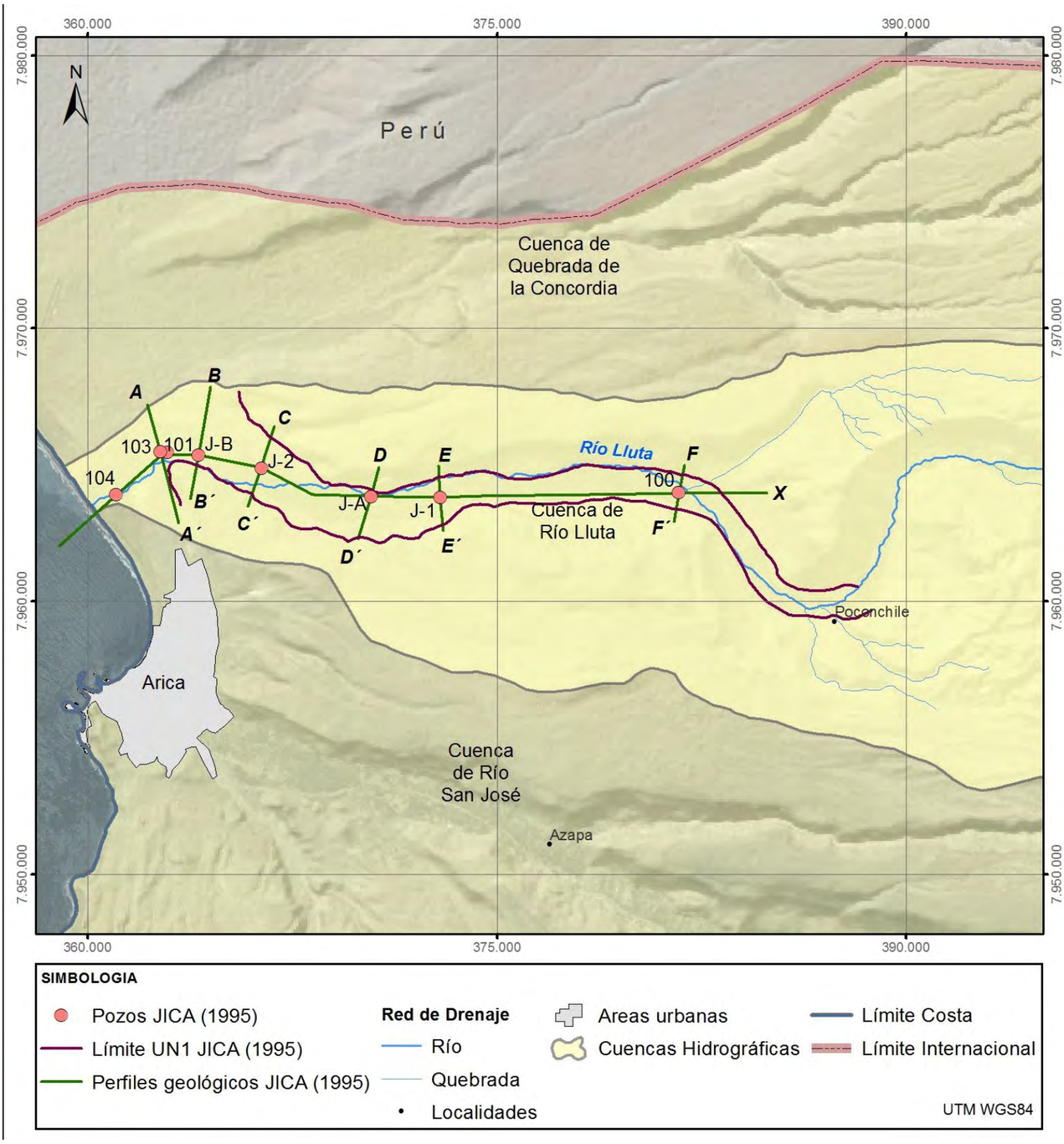


Figura 7.88 Ubicación de los perfiles geológicos del sector del valle el río Lluta. Fuente: modificado de JICA (1995).

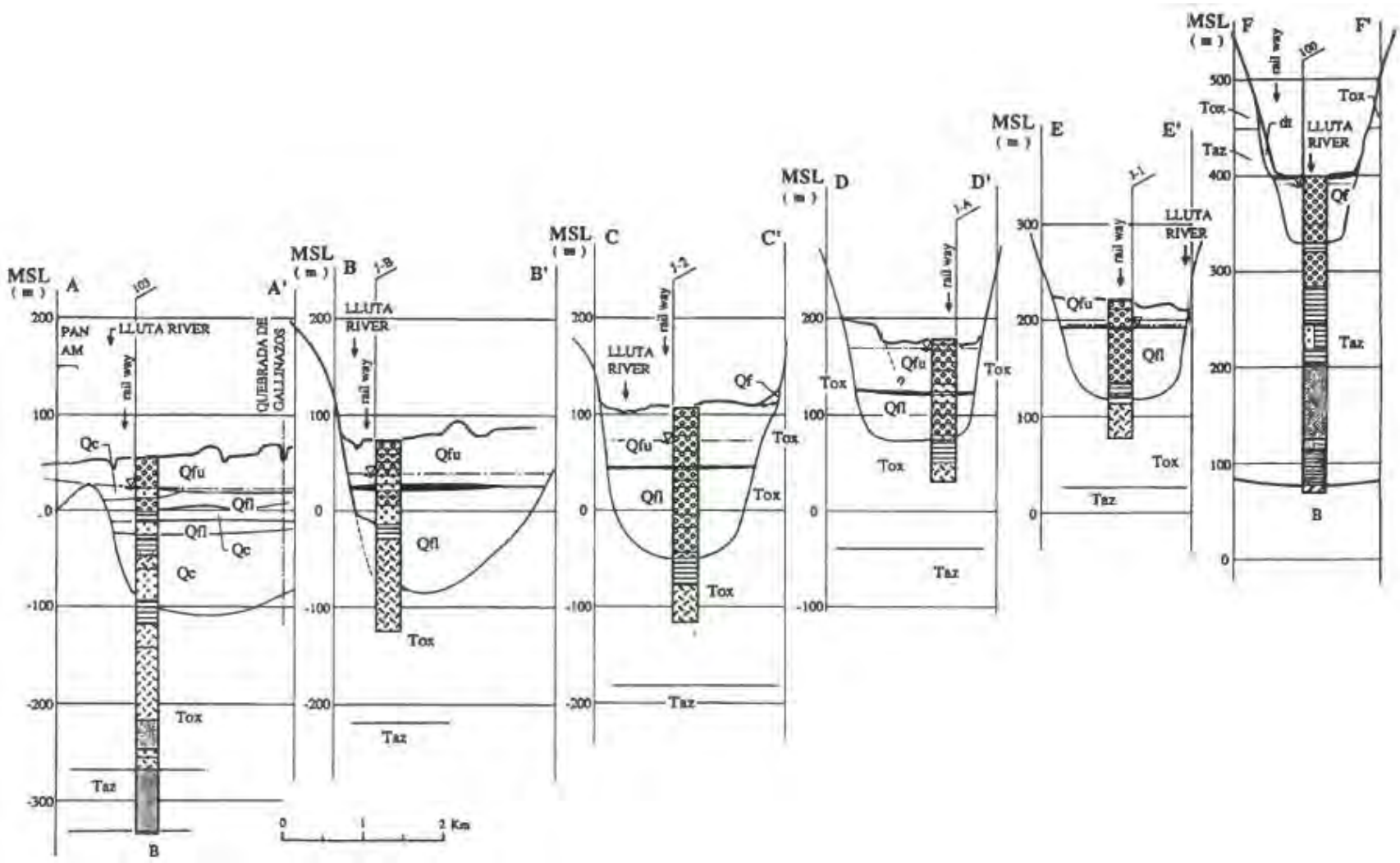


Figura 7.89 Perfiles geológicos del sector del valle el río Lluta. Fuente: JICA (1995).

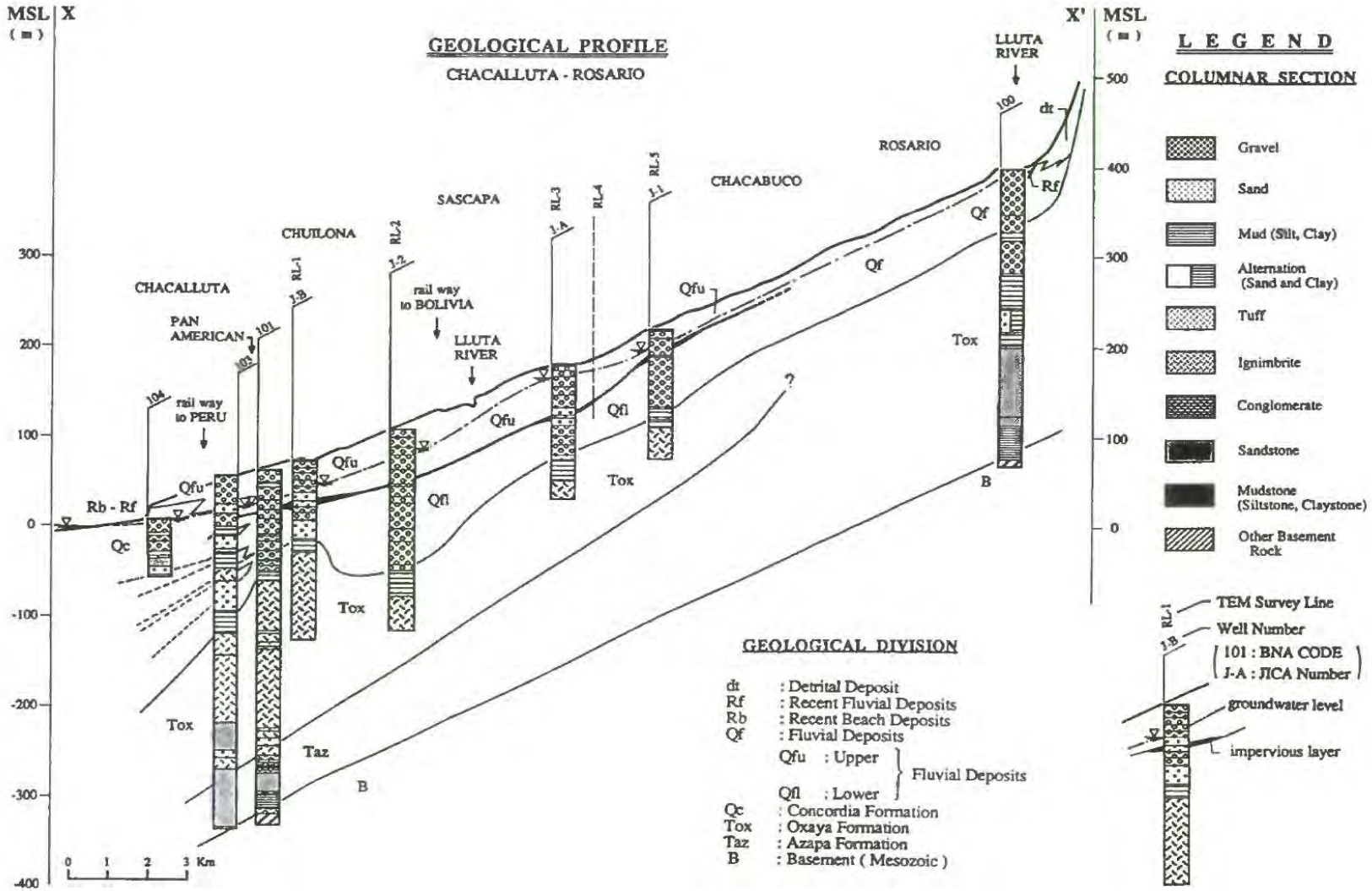


Figura 7.90 Perfil geológico X-X´ del sector del valle el río Lluta. Fuente: JICA (1995).

Posteriormente, en el año 1998 la empresa ESSAT perforó 11 sondajes en el valle del río Lluta para solucionar el problema de déficit del suministro de agua potable en Arica. Después de la perforación se llevaron a cabo algunas pruebas de bombeo de larga duración. A partir de los datos obtenidos en las pruebas de bombeo, de las mediciones de nivel piezométricos y aforos en el cauce del río Lluta, AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (1998c) confeccionó un modelo de simulación del tramo comprendido desde 3 km aguas arriba de Poconchile hasta la Ruta 5. Por otro lado, en este estudio se realizaron 3 perfiles gravimétricos y 9 sondajes eléctricos verticales para definir la profundidad del basamento.

Finalmente, AC ING. y AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (2002) analizaron la distribución espacial de la conductividad hidráulica a partir de la modelación de los parámetros hidráulicos obtenidos en las pruebas de bombeo en el valle de Lluta en el estudio de AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (1998c). Según se muestra en la Figura 7.91, los valores de conductividad hidráulica varían desde 0,15 m/día hasta 2,6 m/día, y el coeficiente de almacenamiento oscila entre 0,6 a 11 %.

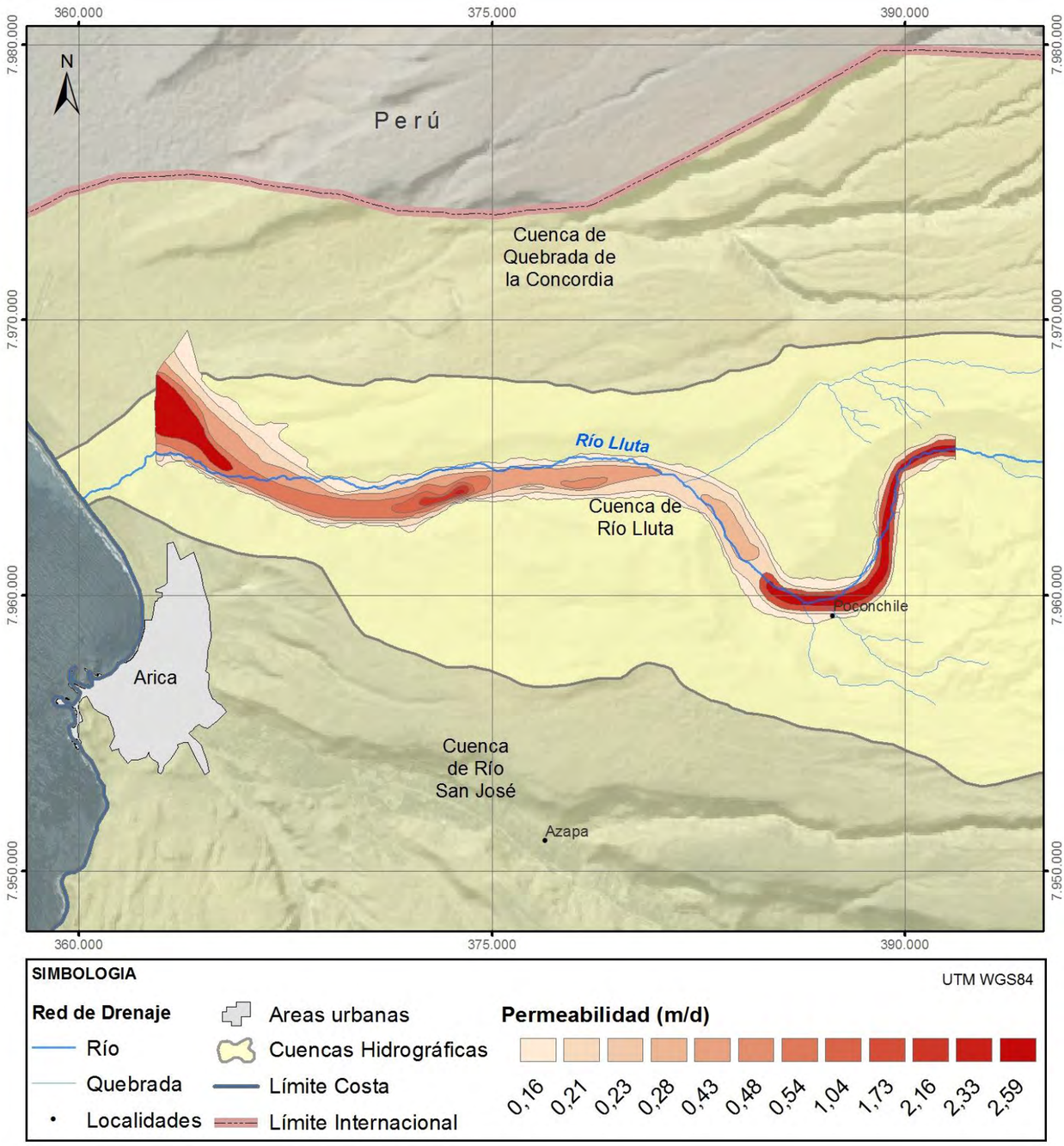


Figura 7.91 Distribución de la conductividad hidráulica (m/día) en el valle del río Lluta. Fuente: modificado de AC ING y Ayala, Cabrera y Asociados (2002).

7.3.3.2 Definición y caracterización de las unidades hidrogeológicas

En esta sección se identificaron las unidades hidrogeológicas existentes en la cuenca del río Lluta Alto y Bajo según la información de los antecedentes, mapa geológico 1:250.000 García *et al.* (2004) y el mapa hidrogeológico 1.000.000 (DGA, 1989).

SUBCUENCA DEL RÍO LLUTA ALTO

La subcuenca del río Lluta Alto presenta las siguientes unidades hidrogeológicas con baja, media y alta importancia hidrogeológica:

- Unidad hidrogeológica I (importancia alta): su extensión es limitada a los entornos de ríos, quebradas y bofedales, y su espesor máximo no superan los 10-15 m de profundidad. Esta unidad está compuesta por depósitos aluviales y fluviales del holoceno. Los depósitos aluviales se encuentran predominantemente compuestos por arenas con matriz de arena fina. Los depósitos fluviales están constituidos por ripios y gravas (normalmente clastosoportados), arenas y limos, semiconsolidados. Esta unidad hidrogeológica se caracteriza por ser un medio con permeabilidad primaria y régimen libre.
- Unidad hidrogeológica II (importancia alta-media): corresponde a la Formación Visviri, la que está constituida por hasta 200 m de espesor de gravas, de grano fino a grueso, arenas, así como areniscas y limolitas semiconsolidadas, con intercalaciones menores de tobas, diatomitas, bentonitas y calizas. Esta unidad hidrogeológica se caracteriza por ser un medio con permeabilidad primaria y régimen libre.
- Unidad hidrogeológica III (importancia alta-media): considera las lavas andesíticas y dacíticas que tienen una permeabilidad primaria baja a nula, pero que por fracturación presentan una importancia hidrogeológica media-alta. Los Complejos Volcánico Caracarani, Chuquiananta, Churicagua, Copatanca, Nevados de Putre y el volcán Tacora se caracterizan por tener familias de fracturas conectadas que originan acuíferos colgados y/o recargan a otras unidades hidrogeológicas.
- Unidad hidrogeológica IV (importancia media): corresponde a los depósitos salinos o evaporíticos, compuestos por mantos subhorizontales de

sales, limos salinos y costras salinas, en parte detríticos, y expuestos predominantemente en la laguna Blanca y al sur de Humapalca. Esta unidad presenta una permeabilidad primaria y secundaria por disolución de sales.

- Unidad hidrogeológica V (importancia media): considera los materiales detríticos semiconsolidados a consolidados. Comprende los depósitos coluviales, palustres, glaciares, antrópicos y depósitos detríticos de avalancha de los volcanes del Pleistoceno, la Formación Lauca y la Formación Huaylas del Mioceno Superior. Los depósitos detríticos de los volcanes se sitúan en ambos lados de la quebrada del río Lluta en el nacimiento del río. La Formación Huaylas tiene 240 m de espesor de ripios, de grano medio a fino, gravas, areniscas, limolitas, arcillolitas, diatomitas, y calizas, con intercalaciones menores de rocas piroclásticas. Los depósitos de origen glaciar son mayoritariamente mantos estratificados, y en menor proporción a morrenas laterales y/o frontales, y están compuestos por brechas sedimentarias, gravas y limos; su grado de selección es pobre y la matriz arenosa-limosa. Y los depósitos palustres corresponden a limos y turbas, consolidados a semiconsolidados, y alto contenido de material orgánico. Esta unidad hidrogeológica se caracteriza por ser un medio con porosidad primaria y libre.
- Unidad hidrogeológica VI (importancia baja-media): considera a la Formación Lupica (a y d) y Formación Putani. La Formación Lupica (a) está constituida por secuencias de lavas andesíticas y dacíticas, tobas y brechas volcánicas y sedimentarias; y la Formación Lupica (d) corresponde a areniscas, fangolitas y calizas. El miembro superior de la Formación Putani son areniscas gruesas, calizas, conglomerados y yeso. Esta unidad se caracteriza por poseer una permeabilidad primaria baja o nula, sin embargo, puede presentar una permeabilidad secundaria baja por la conexión hidráulica de las fracturas.
- Unidad hidrogeológica VII (importancia baja): corresponde a la Formación Oxaya, ignimbrita Lauca, Formación Lupica, Formación Livilcar, flujos piroclásticos y volcanes y remanentes de volcanes del Mioceno. Esta unidad es una secuencia de rocas volcánico-sedimentarias y/o flujos piroclásticos de tobas, de variada litología y se encuentra moderada a intensamente plegada y fracturada. Esta unidad presenta una porosidad primaria baja o nula, pero con un grado de fracturación que le proporciona una baja importancia hidrogeológica.

- Basamento: lo constituyen las rocas intrusivas del Eoceno, y está compuesta de granodioritas, monzogranitos y monzonitas cuarcíferas.

SUBCUENCA DEL RÍO LLUTA BAJO

La estratigrafía de este sector se puede observar en la Figura 7.92. La subcuenca del río Lluta Bajo presenta las siguientes unidades hidrogeológicas con baja, media y alta importancia hidrogeológica:

- Unidad hidrogeológica I (importancia alta): está constituida por depósitos aluviales y fluviales del Holoceno, Pleistoceno, Plioceno y depósitos litorales. Estos depósitos de 20 a 200 m de espesor están compuestos por arenas y gravas no consolidados. Son depósitos de material sedimentario con una permeabilidad primaria y alta importancia hidrogeológica. Esta unidad hidrogeológica presenta un régimen libre, y localmente presenta una capa de tobas que divide esta unidad acuífera en un acuífero confinado inferior y acuífero libre superior, según JICA (1995).
- Unidad hidrogeológica V (importancia media): son materiales detríticos semiconsolidados a consolidados, los que corresponden a depósitos eólicos, coluviales, de avalancha de Azapa y depósitos de remoción en masas del Plioceno-Cuaternario y las Formaciones El Diablo y Azapa. Presentan una permeabilidad primaria que proporciona una moderada importancia hidrogeológica. Se presenta en régimen libre, sin embargo, la Formación Azapa podría estar confinada por la Formación Oxaya.
- Unidad hidrogeológica VI (importancia media-baja): corresponde a la parte inferior-media de la Formación Oxaya (OMo1). Este miembro corresponde a una ignimbrita con intercalaciones de 200 m de material sedimentario, con una serie de fracturas y fallas con continuidad preferentemente noroeste. Por lo tanto, esta unidad presenta una permeabilidad primaria en el medio poroso sedimentario y una permeabilidad secundaria por fracturación en la ignimbrita. Posee una importancia hidrogeológica media a baja.
- Unidad hidrogeológica VII (importancia baja): compuesta por los miembros ignimbríticos y andesíticos de la Formación Oxaya (OMo2)

y la Formación Livilcar. La Formación Oxaya corresponde a un estrato de al menos 120 m de andesitas, que aflora al norte y oeste de Socoroma, y a la ignimbrita que constituye la pampa Ossa y del Toro Muerto. La Formación Livilcar se depositó durante el Jurásico y en ésta se diferencian dos miembros: el miembro inferior con 1.000 m de espesor de areniscas y paraconglomerados, con intercalaciones de parabrechas, tobas, calizas y lutitas, y un miembro superior constituido por 950 m de calizas, lutitas, areniscas y limolitas. Esta unidad presenta una porosidad primaria baja o nula, pero con un grado de fracturación que le proporciona una baja importancia hidrogeológica.

- Basamento: lo constituyen las rocas intrusivas del Cretácico.

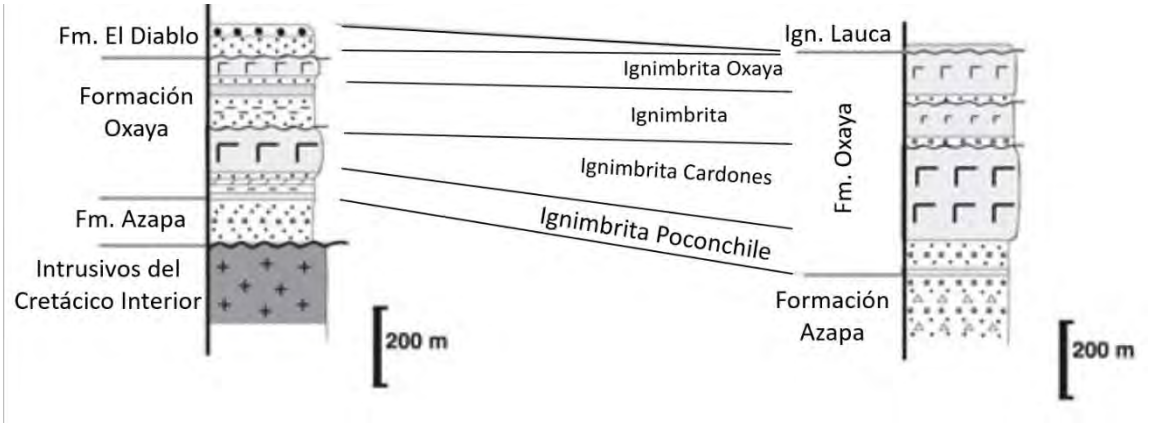


Figura 7.92 Columna estratigráfica Azapa-Poconchile. Fuente: García *et al.* (2004).

En la Tabla 7.53 se presenta un resumen de las unidades hidrogeológicas, y en la Figura 7.93 se muestra un mapa con la importancia hidrogeológica de cada una de las unidades hidrogeológicas presentes en la cuenca del río Lluta.

Tabla 7.53 Resumen de las unidades hidrogeológicas de la cuenca del río Lluta. Fuente: elaboración propia.

Cuenca	Unidad Hidrogeológica	Descripción	Tipo de permeabilidad	Importancia hidrogeológica	Tipo de Unidad
Río Lluta	I	Depósitos aluviales y fluviales Depósitos litorales	Primaria	Alta	Supuestamente Acuífero
	II	Formación Visviri	Primaria	Alta	Supuestamente Acuífero
	III	Complejos volcánicos	Secundaria	Alta-media	Acuíferos fracturados
	IV	Depósitos salinos	Primaria Secundaria	Media	Supuestamente Acuitardo
	V	Depósitos coluviales Depósitos palustres Depósitos glaciares Depósitos antrópicos Depósitos de remoción en masa Depósitos de avalancha de detríticos Formación Lauca Formación Huaylas Formación El Diablo Formación Azapa	Primaria	Media	Supuestamente Acuitardo
	VI	Formación Lupica (a, d) Formación Oxaya (1) Formación Putani	Secundaria	Media-Baja	Supuestamente Acuitardo
	VII	Ignimbrita Lauca Formación Oxaya (Ignimbrita y andesita) Formación Lupica (b) Formación Livilcar Volcanes y remanentes de volcanes Mioceno Flujos piroclásticos	Secundaria	Baja	Supuestamente Acuícludo

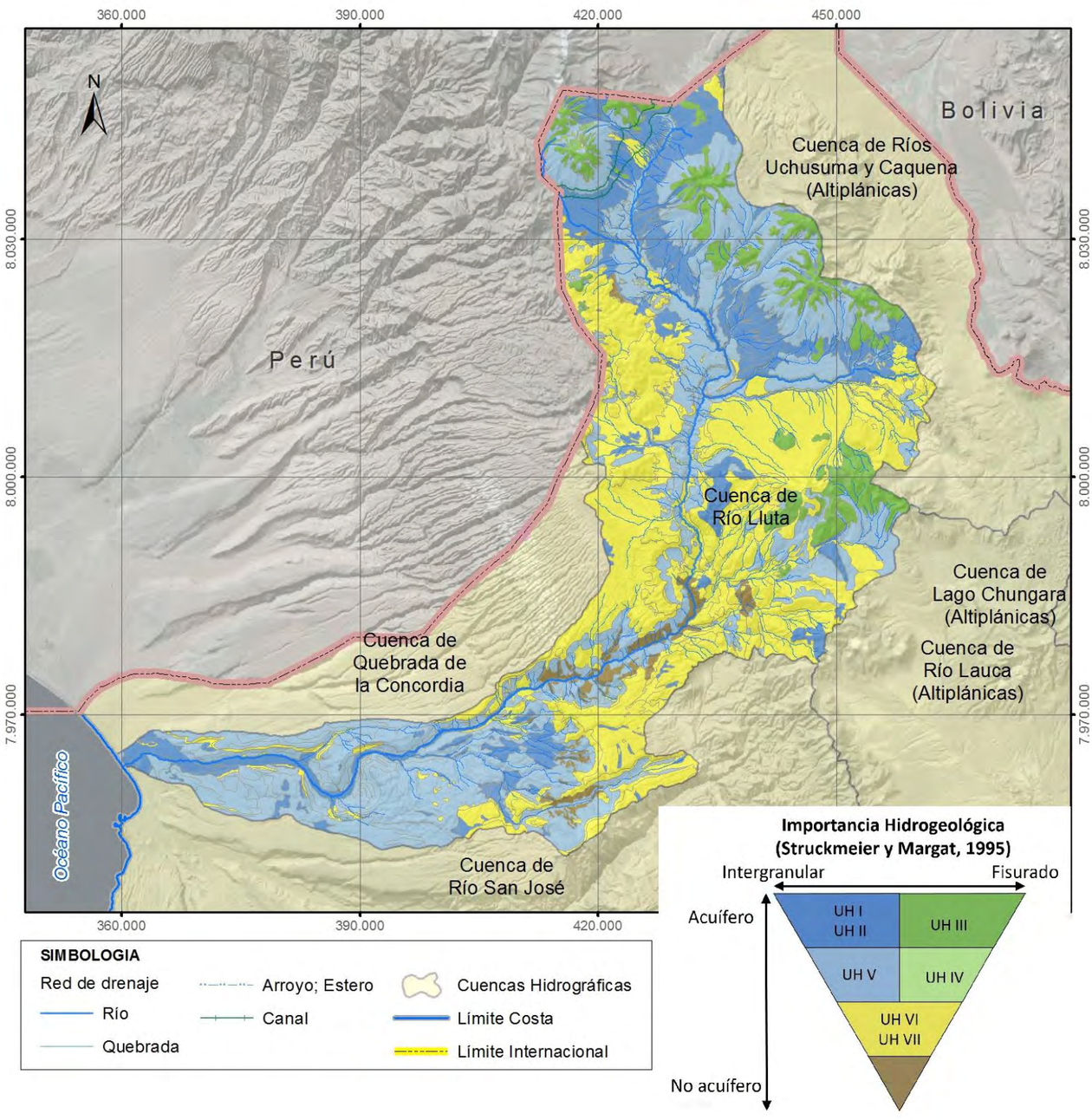


Figura 7.93 Mapa de las unidades según la importancia hidrogeológica presente en la cuenca del río Lluta. Fuente: elaboración propia.

7.3.3.3 Parámetros hidráulicos

Los parámetros hidráulicos de cada una de las unidades hidrogeológicas se estimaron a partir de los antecedentes y de los resultados de las pruebas de bombeo recopiladas, cuyo detalle se puede encontrar en el Anexo VII. En las unidades que no cuentan con antecedentes se han presentado valores referenciales de literatura de parámetros hidráulicos de materiales geológicos similares.

Según se puede observar en la Figura 7.94, en la subcuenca del río Lluta Bajo, entre la carretera Panamericana y el km 26 de la carretera internacional de Arica-La Paz, la JICA (1995) perforó 2 pozos de prueba, J-A y J-B, y dos pozos de observación, J-1 y J-2, y la empresa ESSAT (actualmente Aguas del Altiplano S.A.) construyó 11 sondajes para intentar solucionar el problema de déficit del suministro de agua potable en Arica, y cuyas pruebas de bombeo han permitido obtener los parámetros hidráulicos del acuífero de la zona del Lluta Bajo.

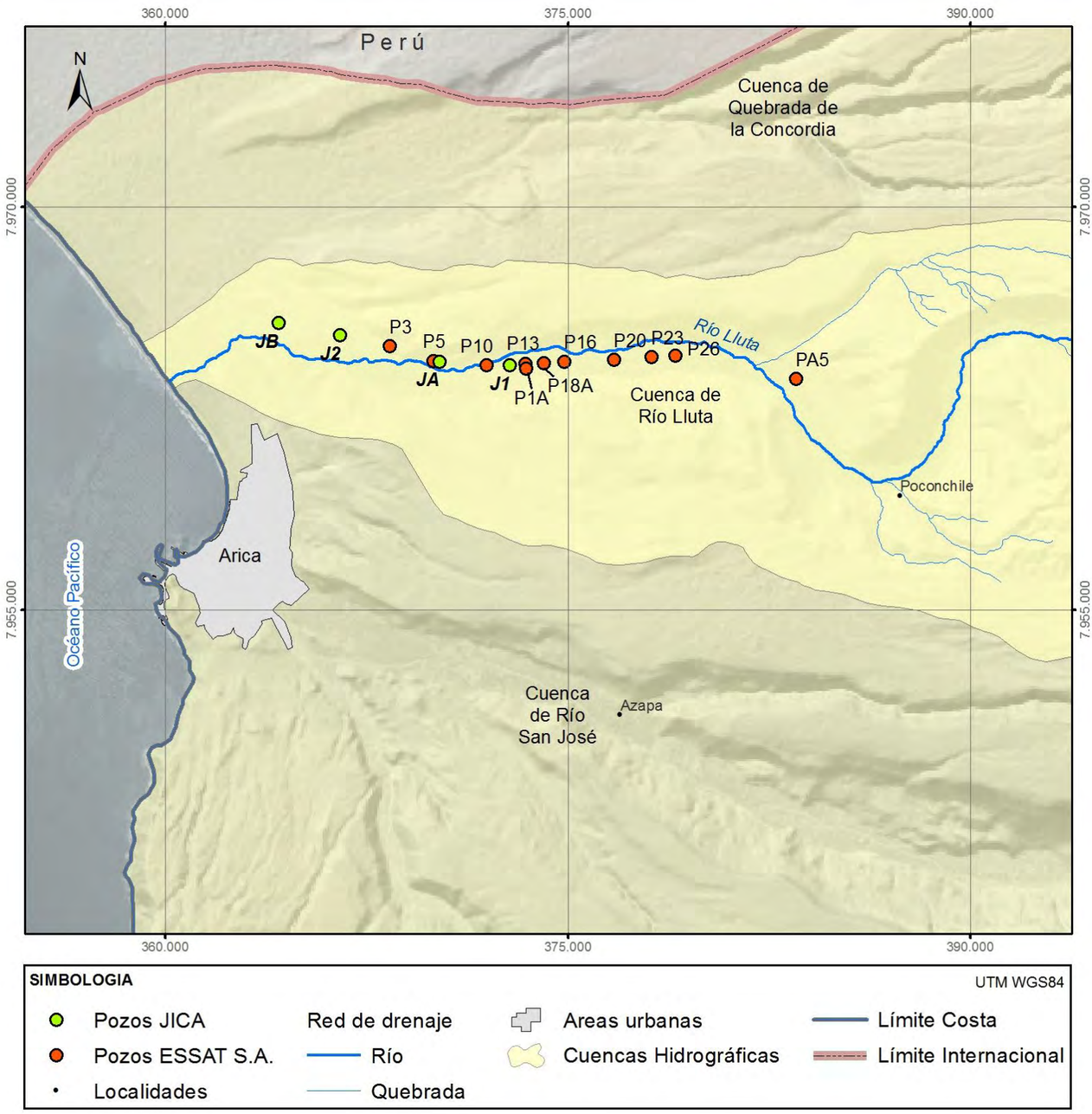


Figura 7.94 Ubicación de los 11 sondajes de la empresa ESSAT S.A y los 4 sondajes JICA. Fuente: elaboración propia.

En la Tabla 7.54 se presentan los valores de los parámetros estimados por AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (1998c) a partir de las pruebas de bombeo de larga duración y por la JICA (1995) con los resultados obtenidos en las pruebas de bombeo de corta duración.

Tabla 7.54 Parámetros elásticos obtenidos de la interpretación de la prueba de bombeo de los pozos ubicados en la subcuenca del río Lluta Bajo. Fuente: elaboración propia.

Pozo	Profundidad (m)	Unidad Hidrogeológica	Tramo criba (m)	Fuente de dato	Tipo Ensayo	Tipo de acuífero	K (m/día)	T (m^2/día)	Sy
P3	152	I VII	5 53	A, C Y ASOC. (98)	Caudal Constante Recuperación	Libre	0,2	23	0,01
P5	149	I	45	A, C Y ASOC. (98)	Caudal Constante Recuperación	Libre	0,3	27	0,01
P10	132	I	34	A, C Y ASOC. (98)	Caudal Constante Recuperación	Libre	1,2	60	0,05
P13	138	I VII	40 11	A, C Y ASOC. (98)	Caudal Constante Recuperación	Libre	1,9	24	3 x10-3
P1A	150	I	84	A, C Y ASOC. (98)	Caudal Constante Recuperación	Libre	5,4	606	5 x10-3
P18A	152	I	69	A, C Y ASOC. (98)	Caudal Constante Recuperación	Libre	6,9	572	5×10^{-3}
P16	150	I	43	A, C Y ASOC. (98)	Caudal Constante Recuperación	Libre	1,1	77	0,08
P20	142	I	68	A, C Y ASOC. (98)	Caudal Constante Recuperación	Libre	0,6	52	0,02
P23	150	I VII	14 55	A, C Y ASOC. (98)	Caudal Constante Recuperación	Libre	1,3	65	0,05
P26	120	I	61	A, C Y ASOC. (98)	Caudal Constante Recuperación	Libre	0,9	70	0,01
PA5	140	I	38	A, C Y ASOC. (98)	Caudal Constante Recuperación	Libre	0,8	47	$3,5 \times 10^{-3}$
JB	72	I VII	29 43	JICA (95)	Caudal Variable Caudal Constante Recuperación	Libre	4,3	310	$4,7 \times 10^{-4}$
J2	90	I	90	JICA (95)	Caudal Variable Caudal Constante Recuperación	Libre	1,6	150	$6,6 \times 10^{-6}$
JA	43	I	42	JICA (95)	Caudal Variable Caudal Constante Recuperación	Libre	0,5	23	$8,5 \times 10^{-4}$
J1	61	I	60	JICA (95)	Caudal Variable Caudal Constante Recuperación	Libre	6,1	368	$6,6 \times 10^{-6}$

En la Tabla 7.55 se presenta un resumen de los parámetros hidráulicos de cada una de las unidades hidrogeológicas definidas en la cuenca del río Lluta. Los valores de los parámetros hidráulicos de la Unidad Hidrogeológica I se obtuvieron a partir de la interpretación de las pruebas de bombeo realizada por la JICA (1995) y AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (1998c). Aquaconsult (2010) estimó valores de conductividad hidráulica para algunas unidades hidrogeológicas según la geología de cada una unidad y en los casos en que no existe información se han entregado valores de parámetros referenciales de acuerdo a la literatura existente y a unidades de roca similares.

Tabla 7.55 Resumen de los parámetros hidráulicos de cada unidad hidrogeológica de la cuenca del río Lluta. Fuente: elaboración propia.

Cuenca	Subcuenca	Unidad Hidrogeológica	Régimen	T (m^2/día)	K (m/día)	S_s (m^{-1})	Sy (%)	Observaciones
Río Lluta	Alto Bajo	I	Libre	20-600	0,1-10	--	1-8	K, Sy por pruebas de bombeo, JICA (1995) y AC (1998)
	Alto	II	Libre		$1E^{-7}$ a $1E^{2}$	--	6-38	K estimado por Domenico y Schwartz (1990) para materiales diversos. Rango de Sy en acuíferos no-consolidados por Morris y Johnson (1967)
	Alto	III	Libre		$1E^{-2}$-$1E^{2}$	--		K estimado por Aguaconsult (2010) depósitos volcánicos
	Alto	IV	Libre		$8E^{-7}$ – $2E^{-3}$	--		K estimado por Domenico y Schwartz (1990) para rocas sedimentarias
	Alto Bajo	V	Libre		$1E^{-6}$ - $1E^{2}$	--		K estimado por Aguaconsult (2010) Fm. Huaylas y por Domenico y Schwartz (1990) para rocas sedimentarias
			Confinado				--	
	Alto Bajo	VII	Libre		$7E^{-4}$ - 30	--		K estimado por Doménico y Schwartz (1998) y S por Domenico y Mifflin (1965) para roca fracturada.
			Confinado			$3E^{-6}$-$7E^{-5}$	--	
	Alto Bajo	VIII	Libre		$1E^{-5}$-1	--		K estimado por Aguaconsult (2010) de la Fm. Lupica. S por Domenico y Mifflin (1965)
			Confinado			$3E^{-6}$-$1E^{-5}$	--	

7.3.3.4 Piezometría

Los antecedentes vinculados con los niveles piezométricos y de los flujos de aguas subterráneas se localizan principalmente en la subcuenca del río Lluta Bajo (valle), donde se han perforado pozos de exploración, de monitoreo y de bombeo. En la subcuenca del río Lluta Alto únicamente se cuenta con niveles piezométricos identificados en los perfiles geofísicos. La piezometría se ha elaborado mediante los antecedentes, la piezometría inferida a partir de los niveles piezométricos registrados en los pozos muestreados, medición de aforos en el río Lluta y sus tributarios, las observaciones realizadas en terreno y en las imágenes satelitales de vertientes y bofedales.

SUBCUENCA DEL RÍO LLUTA ALTO

Tal como se comentó anteriormente, no existen antecedentes sobre la piezometría de la subcuenca del río Lluta Alto en ninguna de las unidades hidrogeológicas. Sin embargo, en el presente estudio se han inferido algunos niveles piezométricos a partir de algunas vertientes observadas en terreno, imágenes satelitales y de las curvas topográficas cada 50 m del IGM. En la Figura 7.95 se muestran los niveles piezométricos inferidos, y de ellos se han trazado las líneas de flujo subterráneo, las que van desde los complejos volcánicos que delimitan la cuenca hacia las cotas más bajas, cuya dirección principal de flujo es de norte a sur. En la cabecera de la cuenca se observa como las unidades con mayor importancia hidrogeológica alimentan a los cauces superficiales. Después de la confluencia del río Lluta con el río Colpitas, los recursos hídricos son principalmente superficiales, fluyendo superficialmente el río Lluta sobre unidades hidrogeológicas de baja conductividad hidráulica.

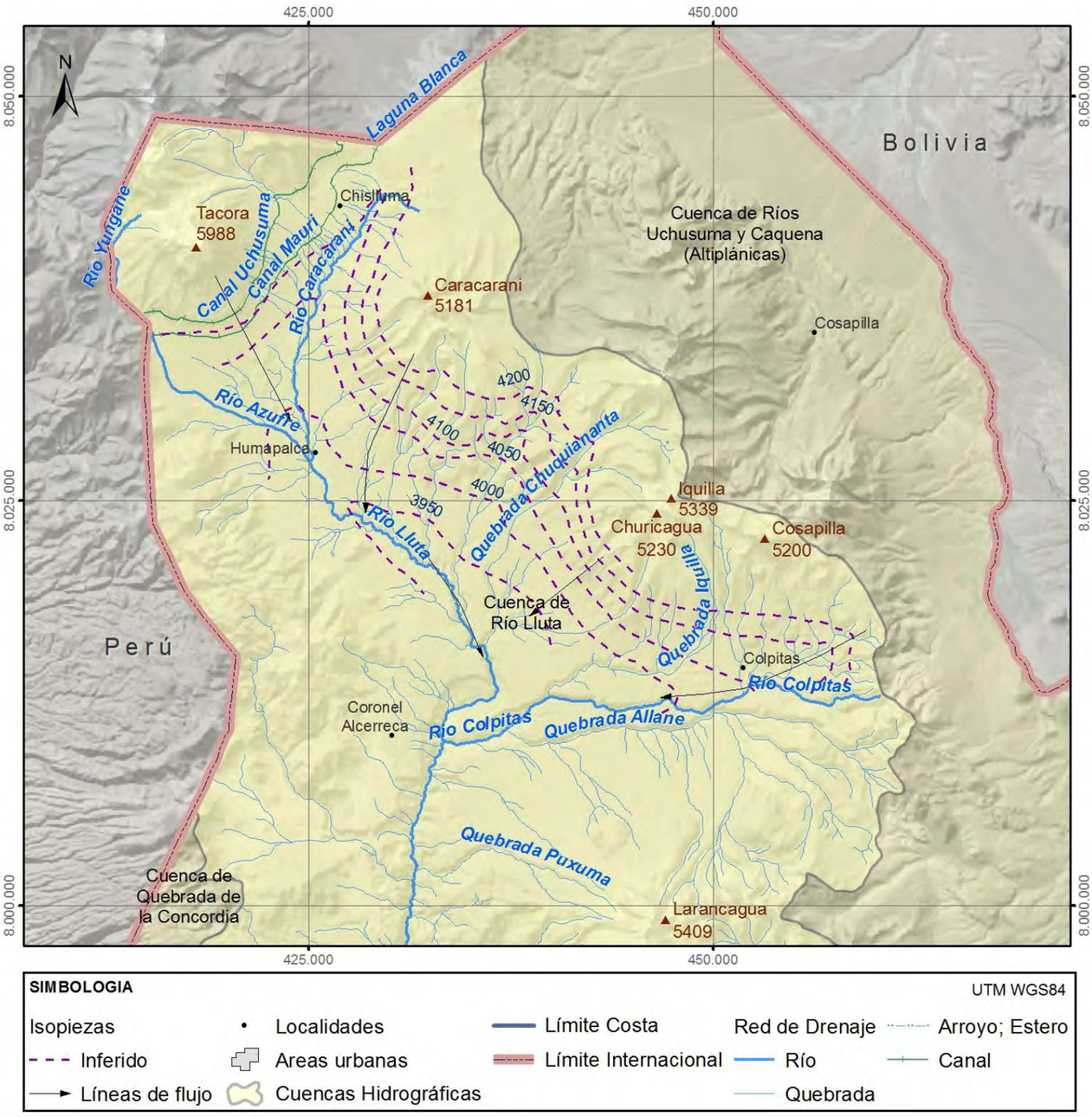


Figura 7.95 Mapa piezométrico inferido de la subcuenca del río Lluta Alto. Fuente: elaboración propia.

SUBCUENCA DEL RÍO LLUTA BAJO

En el valle de la subcuenca del río Lluta Bajo se han perforado pozos, en los cuales se han tomado medidas puntuales o continúas del nivel freático de la Unidad Hidrogeológica I, sin embargo, en el resto de la subcuenca no existe información relacionada con la piezometría.

AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (1998c) y AC ING. y AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (2002) han analizado la distribución espacial del nivel freático en el sector bajo de la cuenca a partir de los niveles registrados en los sondajes construidos por ESSAT, en el pozo 388 perteneciente a Gendarmería, los pozos JA y JB, y los piezómetros n°1 y n°2 construidos en el "Estudio pruebas de larga duración, valle de río Lluta, ESSAT S.A. Arica, I Región". La piezometría indica que el nivel freático es paralelo al escurrimiento superficial del río Lluta en sentido desde la cordillera hacia el mar. Las líneas de flujo presentan una dirección de flujo de este a oeste, desde los 700 msnm en el sector de Mal Paso (7 km aguas arriba de Poconchile) hasta los 40 msnm en la carretera Panamericana, existiendo un gradiente hidráulico medio de 2% en el acuífero.

La piezometría actualizada en el presente estudio se muestra en la Figura 7.96 e incluye las mediciones de AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (1998c) que se elaboró a partir del registro de niveles freáticos de noviembre de 1997, y de datos adicionales de otros estudios (AC ING y AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS, 1997, 2002; y JICA, 1995).

En la Figura 7.96 se ubican los 3 pozos (rombos verdes) donde se midió el nivel freático. El nivel de estos pozos verifica la piezometría elaborada en la subcuenca del Lluta Bajo. Los niveles freáticos del acuífero del valle bajo de Lluta se encuentran relativamente someros, los que van desde los 10 m de profundidad en el pozo LLAP-26, hasta 1,5 m de profundidad en el pozo LLAP-22 que se encuentra aguas abajo del anterior y desciende a 25 m de profundidad en el pozo LLAP-19 en los sectores de la desembocadura.

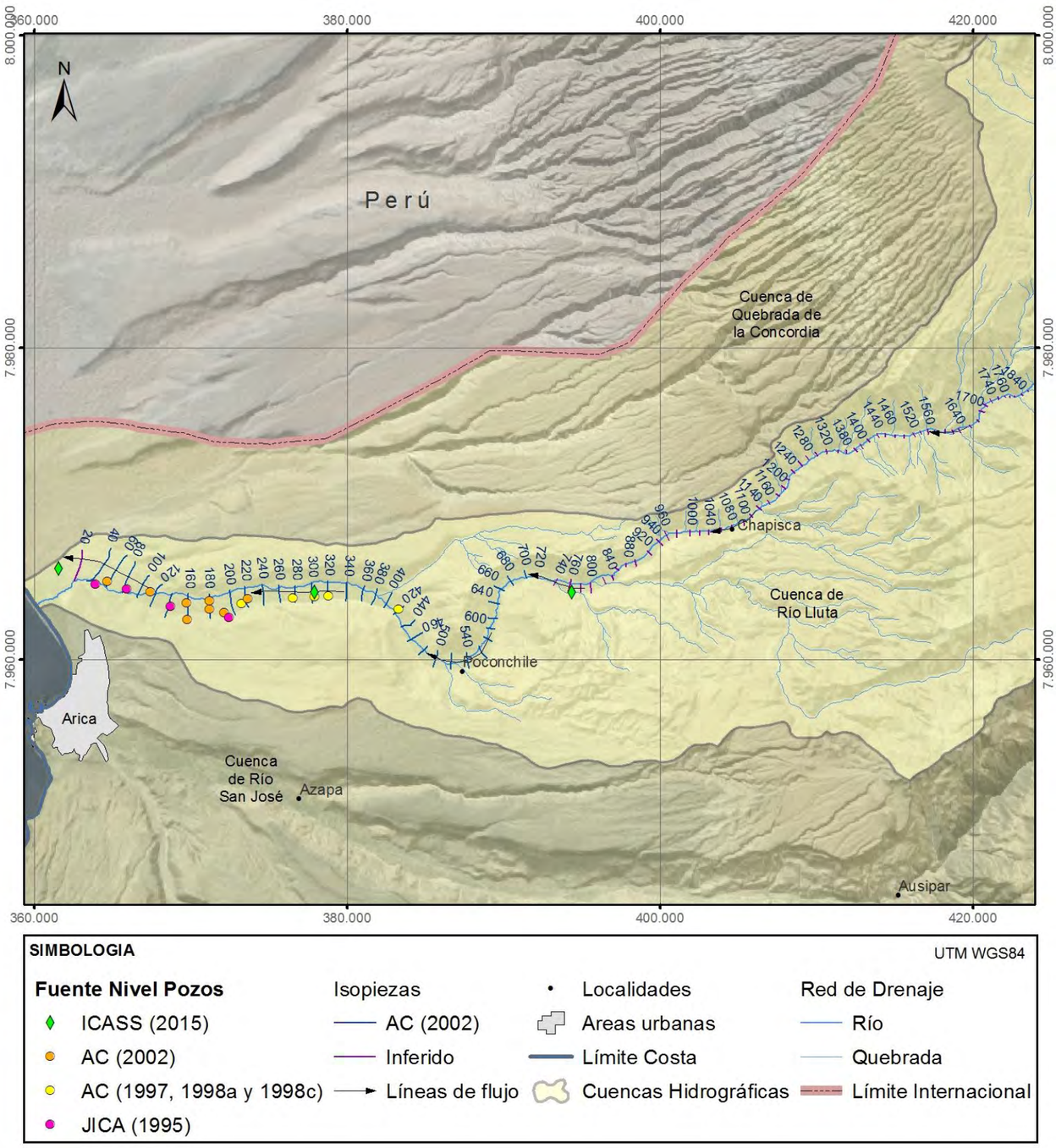


Figura 7.96 Mapa piezométrico de la Unidad Hidrogeológica I en la subcuenca del río Lluta Bajo. Fuente: Ayala, Cabrera y Asociados (1998c) y elaboración propia.

Para analizar la evolución temporal del nivel freático de la Unidad Hidrogeológica I se tomó el registro de nivel que realiza la DGA, la que efectúa un monitoreo de niveles en los pozos J-1 (2000-2009), J-2 (2000—2009), J-A (2000-2015) y J-B (2000-2013), cuyos niveles se muestran en la Figura 7.97. En este gráfico se observa que el nivel freático de la Unidad Hidrogeológica I en la subcuenca del río Lluta Bajo desciende progresivamente desde los 200 msnm en el pozo J-1 hacia la línea de costa, hasta alcanzar 38 msnm en el pozo J-B.

Se analizó la relación entre los niveles piezométricos del acuífero del valle del Lluta con los caudales registrados en la estación Lluta Panamericana y por otro lado, con las precipitaciones. En el sector del acuífero no existen estaciones meteorológica vigente, por lo que se han considerado las estaciones Azapa y Arica Oficina, que se encuentran en la cuenca del río San José, pero que tienen un régimen de precipitaciones similar a la de la cuenca del río Lluta. Según se puede observar en la Figura 7.97, no existe una correlación inmediata entre el caudal del río Lluta y de las precipitaciones con el nivel piezométrico de los sondajes debido a que el acuífero sufre un bombeo de mayor magnitud que el caudal y de las precipitaciones que se producen. Sin embargo, igualmente se observa un ascenso de los niveles piezométricos, luego de la gran precipitación del 1 de marzo de 2003.

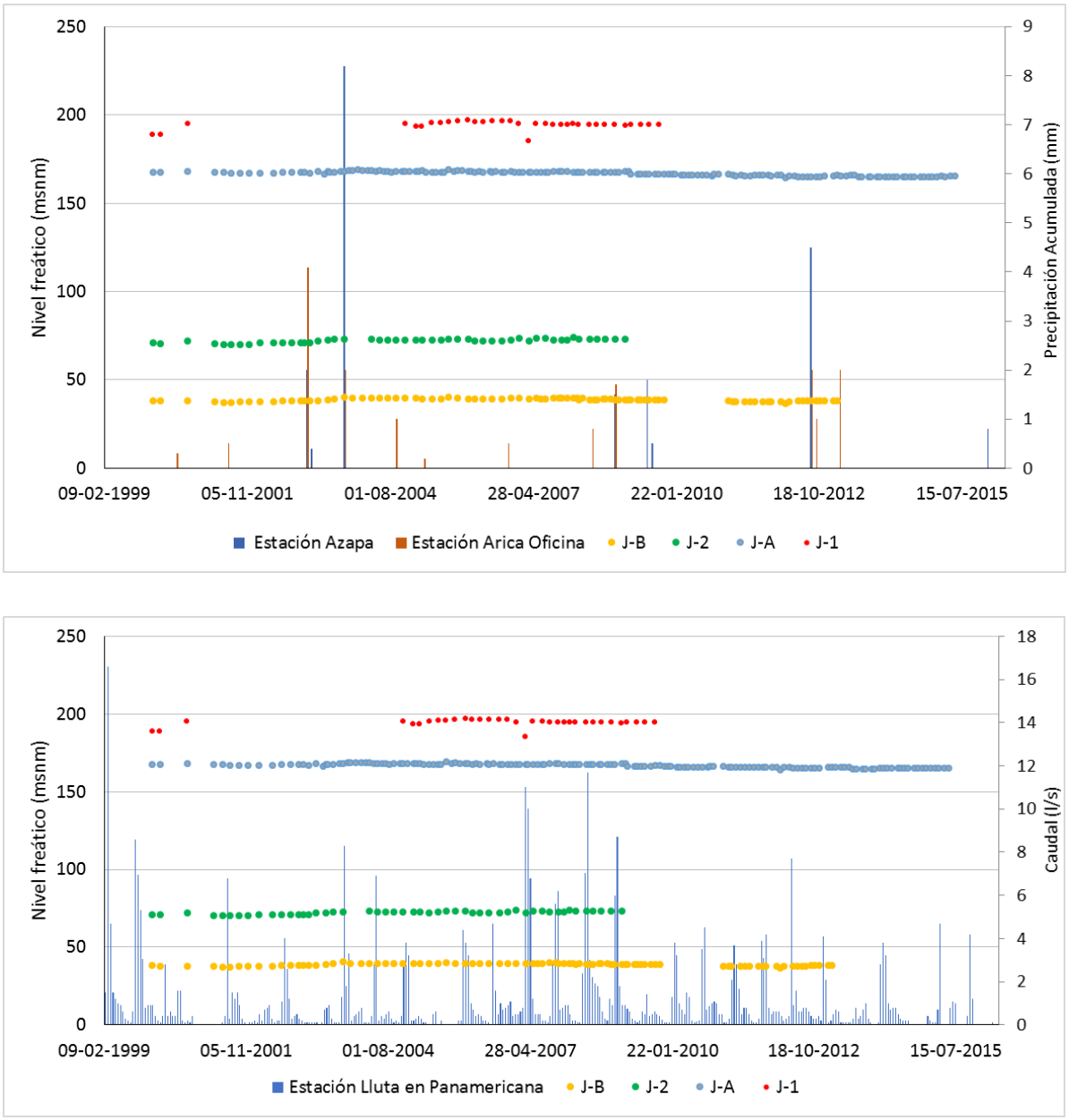


Figura 7.97 Evolución histórica de los niveles de los pozos monitoreados por la DGA en la Unidad Hidrogeológica I durante el periodo 2000-2015 con relación a la precipitación y el caudal. Fuente: elaboración propia.

Si se analiza en detalle la evolución histórica de cada pozo se identifican fluctuaciones en el nivel freático, que se podría asociar a las extracciones en la Unidad Hidrogeológica I, sin embargo, esto no se puede confirmar ya que el registro de niveles se realiza mensualmente. En la Figura 7.98 se observa la evolución de los niveles en el pozo J-2, en el que se muestra una secuencia del descenso repentino y de recuperaciones leves. En

este mismo pozo se observa que hubo una fuerte explotación entre el año 2000 y el 2003, el que disminuyó posteriormente y los niveles subieron 2 m aproximadamente.

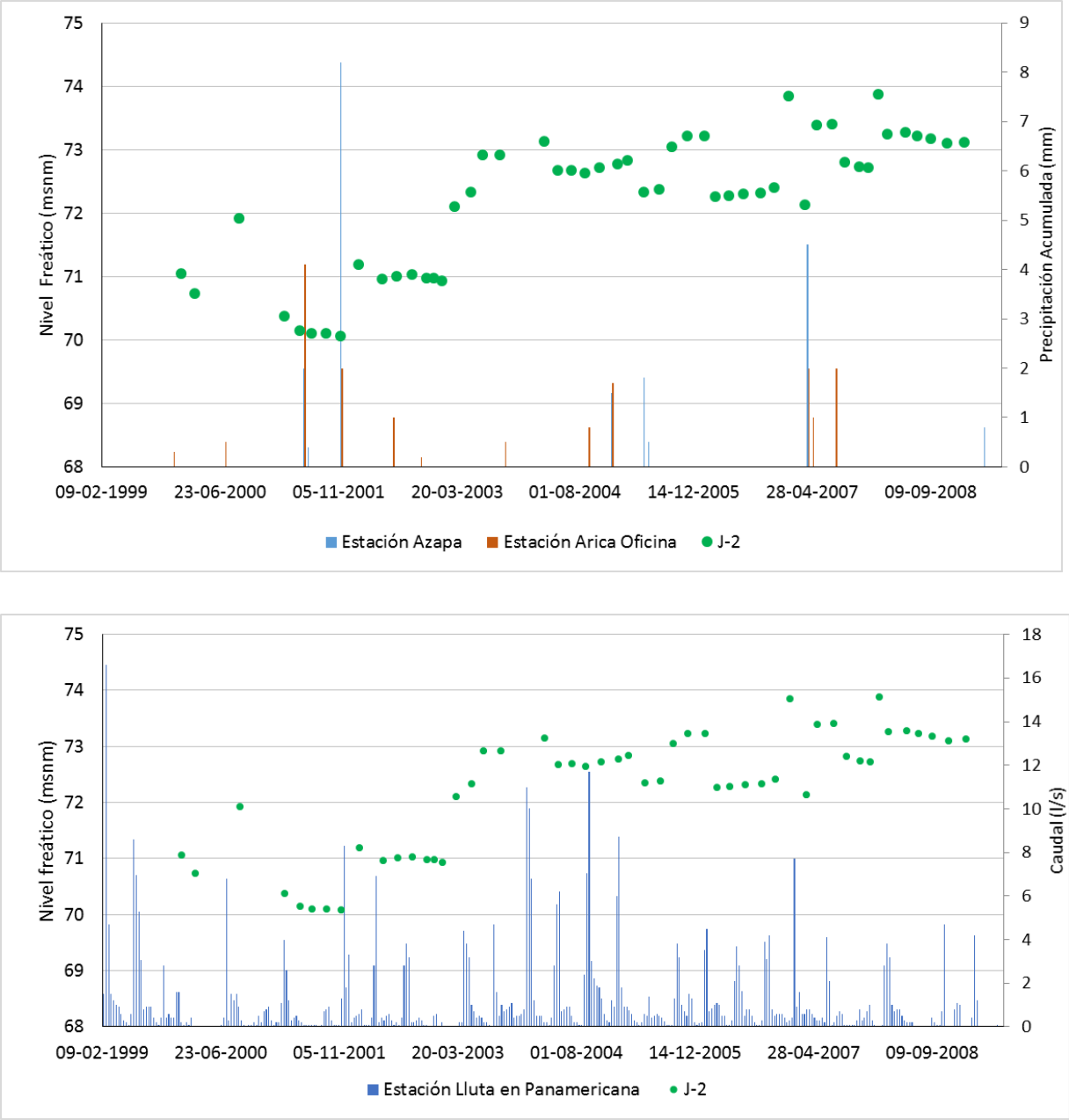
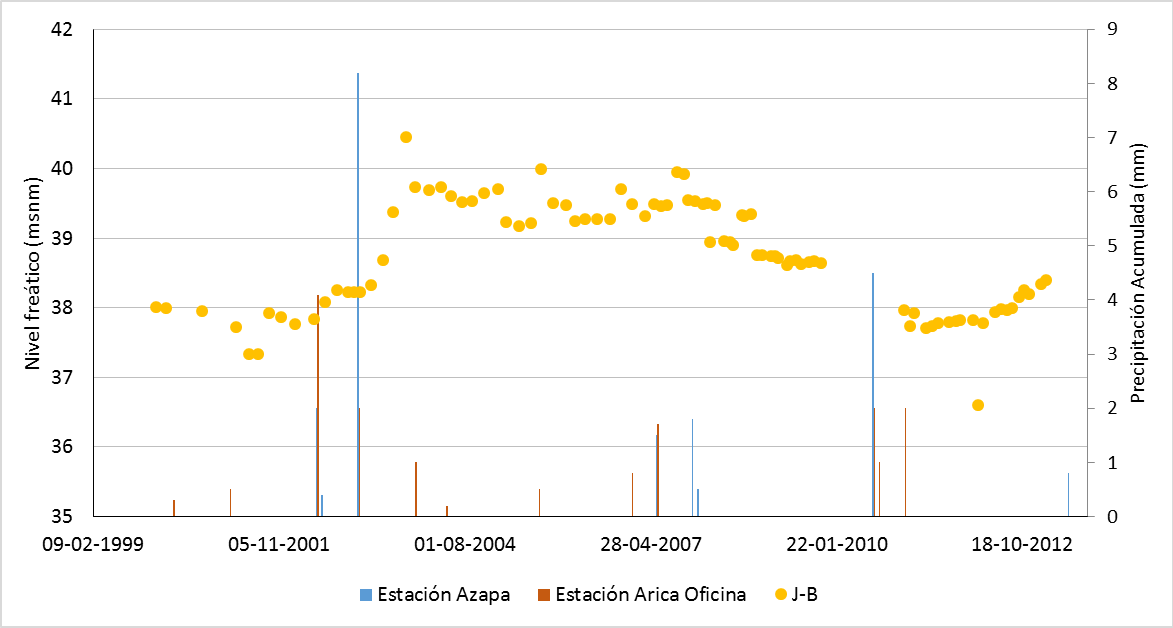
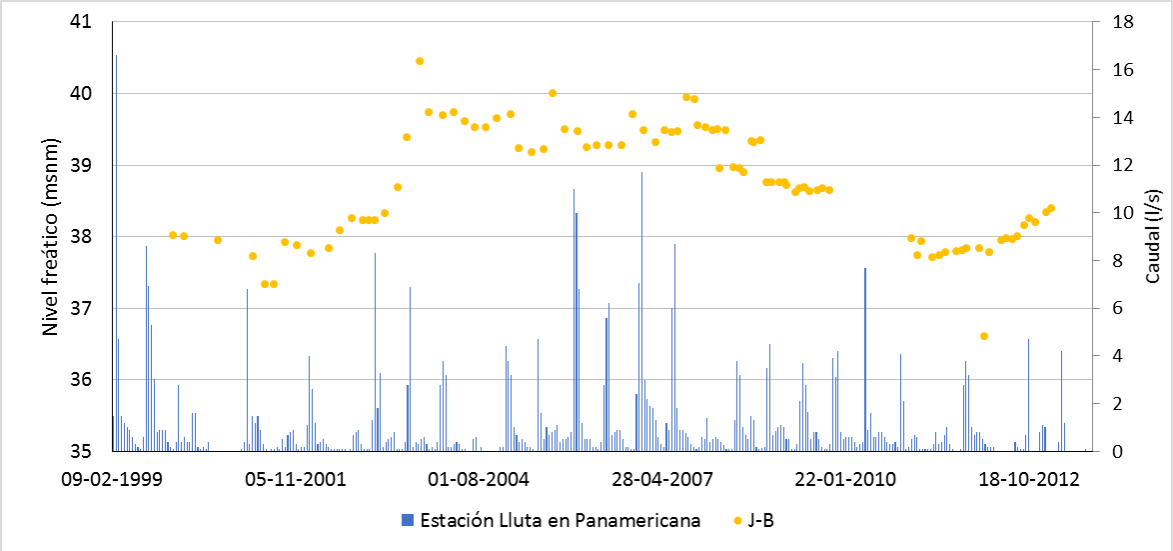


Figura 7.98 Evolución histórica de los niveles del pozo J-2 monitoreado por la DGA en la Unidad Hidrogeológica I durante el periodo 2000-2009 con relación a la precipitación y el caudal. Fuente: elaboración propia.

Los pozos con mayor registro histórico de nivel son los pozos J-B y J-A. En la Figura 7.99 se observa que el nivel en ambos pozos sufrió un ascenso de 2 m, pero desde el año

2004 han sufrido un descenso progresivo hasta la actualidad, de 3 m en el pozo J-A y de 2 m en el caso el pozo J-B.





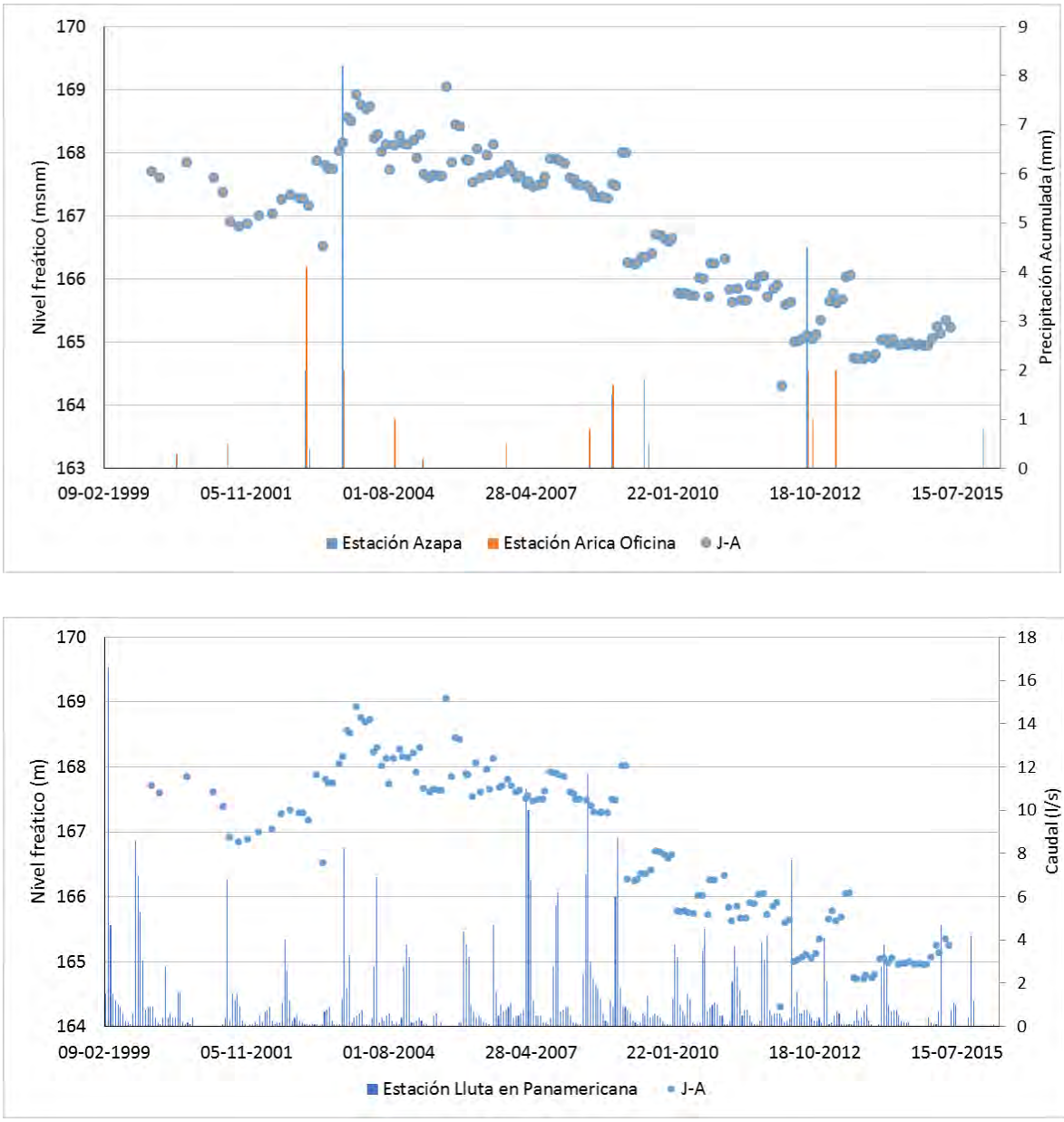


Figura 7.99 Evolución histórica de los niveles de los pozos J-B y J-A monitoreado por la DGA en la Unidad Hidrogeológica I durante el periodo 2000-2015 con relación a la precipitación y el caudal. Fuente: elaboración propia.

Por otro lado, se estudió en detalle el nivel freático registrado en noviembre de 1997 y en los pozos de propiedad de la empresa Agrícola Tarapacá (AT) en septiembre de 1996 y en noviembre de 2000 respecto a la cota del río Lluta. De este modo, se comprobó que el nivel freático en los pozos es similar o se encuentra a pocos metros por debajo que la cota del río Lluta. Esto indicaría que hay una recarga inducida del río, que conlleva una

interacción río-acuífero muy directa y que el río recarga a la Unidad Hidrogeológica I en toda la extensión del Lluta Bajo.

7.3.4 Caracterización Hidroquímica

En esta sección se revisaron los antecedentes existentes relacionados con la composición hidroquímica, la calidad de las aguas y la composición isotópica de las aguas superficiales y subterráneas de la cuenca del río Lluta. Posteriormente, se resumen las actividades efectuadas en las cuatro campañas de muestreo desarrolladas durante el presente estudio. Seguidamente, se describieron los parámetros fisicoquímicos registrados *in situ* durante las campañas de muestreo, se identificaron las facies químicas de las aguas analizadas, se comparó la composición química obtenida con los límites establecidos en la norma chilena para agua potable NCh 409/1 y finalmente se analizó la composición isotópica de las aguas superficiales y subterráneas tomadas en las campañas de terreno.

7.3.4.1 Estudios existentes

La composición hidroquímica y calidad de las aguas superficiales y subterráneas de la cuenca del río Lluta ha sido analizada desde principios de la década de los años 90 debido el déficit de agua para el abastecimiento de la ciudad de Arica, el incremento de la actividad agrícola en el valle del río Lluta y a la precaria calidad del agua del río Lluta.

El análisis de los antecedentes existente se presenta en el Anexo VIII. A partir de los antecedentes se concluye que la calidad del agua de la cuenca del río Lluta está regulada por procesos naturales. Los contaminantes principales del agua del río Lluta provienen de fuentes puntuales, asociadas a características geológicas: arsénico, boro, azufre y metales como hierro, manganeso y zinc, son aportados por el río Azufre, el cual nace a los pies del volcán Tacora. Y el boro además proviene de afloramientos identificados como borateras ubicadas aguas arriba del pueblo de Colpitas, que finalmente desembocan al río del mismo nombre.

En éstos se concluye que en el río Caracarani en Alcérreca las aguas son cloruradas cálcicas y presentan una conductividad eléctrica relativamente baja, inferior a 1.500 µS/cm, un pH relativamente bajo, de 6,6, y altos contenidos de boro, arsénico y cobre. Las aguas de la quebrada Colpitas también son cloruradas sódicas, presentan una conductividad moderadamente alta, con pH levemente básico, de 7,6 y contenidos muy altos de boro y altos de arsénico. El río Lluta, a la altura de la carretera Panamericana,

presenta una elevada conductividad, con valores entre 3.000 y 7.500 µS/cm, y un pH levemente alcalino. El contenido de boro es muy alto y el de arsénico es levemente alto. El contenido de iones mayoritarios del río en este punto es superior al observado en la quebrada Colpitas, en términos de sulfatos y bicarbonatos, y similar en términos de cloruros.

El valle del río Lluta se caracteriza por tener suelos y aguas con alta concentración salina y alto contenido de sodio, cloruros y boro. En los antecedentes se cita el exceso de boro, arsénico y hierro de las aguas superficiales y el elevado contenido de cloruro, sulfatos y boro en las aguas subterráneas. Además, menciona que desde la década de los años 60 la calidad de las aguas subterráneas en el valle del río Lluta está empeorando, consecuencia del riego de nuevos terrenos que contienen sales.

7.3.4.2 Campañas de terreno

En el presente estudio se realizaron 4 campañas de muestreo de aguas superficiales y subterráneas para caracterizar hidroquímica e isotópicamente y determinar la calidad de agua de algunos elementos y parámetros según la norma chilena para agua potable NCh 409/1 en la cuenca del río Lluta. En la Tabla 7.56 se resume el número de mediciones de los parámetros fisicoquímicos registrados *in situ*, el número de muestras tomadas para el análisis hidroquímico y para el análisis isotópico, y en la Figura 7.100 se muestra la ubicación de las muestras analizadas. En el Anexo VIII se describe el protocolo seguido en terreno para la toma de muestras de agua.

Tabla 7.56 Resumen de las actividades realizadas en las campañas de muestreo en la cuenca del río Lluta. Fuente: elaboración propia.

Campaña	Fecha	Medición parámetros fisicoquímicos *in situ*	Muestras para análisis hidroquímico	Muestras para análisis isotópico
Primera	13, 14, 15, 16 y 17 de noviembre de 2015	32	32	21
Segunda	24, 25, 29 de febrero y 1, 3, 4 y 6 de marzo de 2016	36	36	24
Tercera	11, 12, 18, 19, 24 y 25 de mayo de 2016	35	35	23
Cuarta	31 de julio y 05, 10, 11 y 23 de agosto de 2016	25	25	14

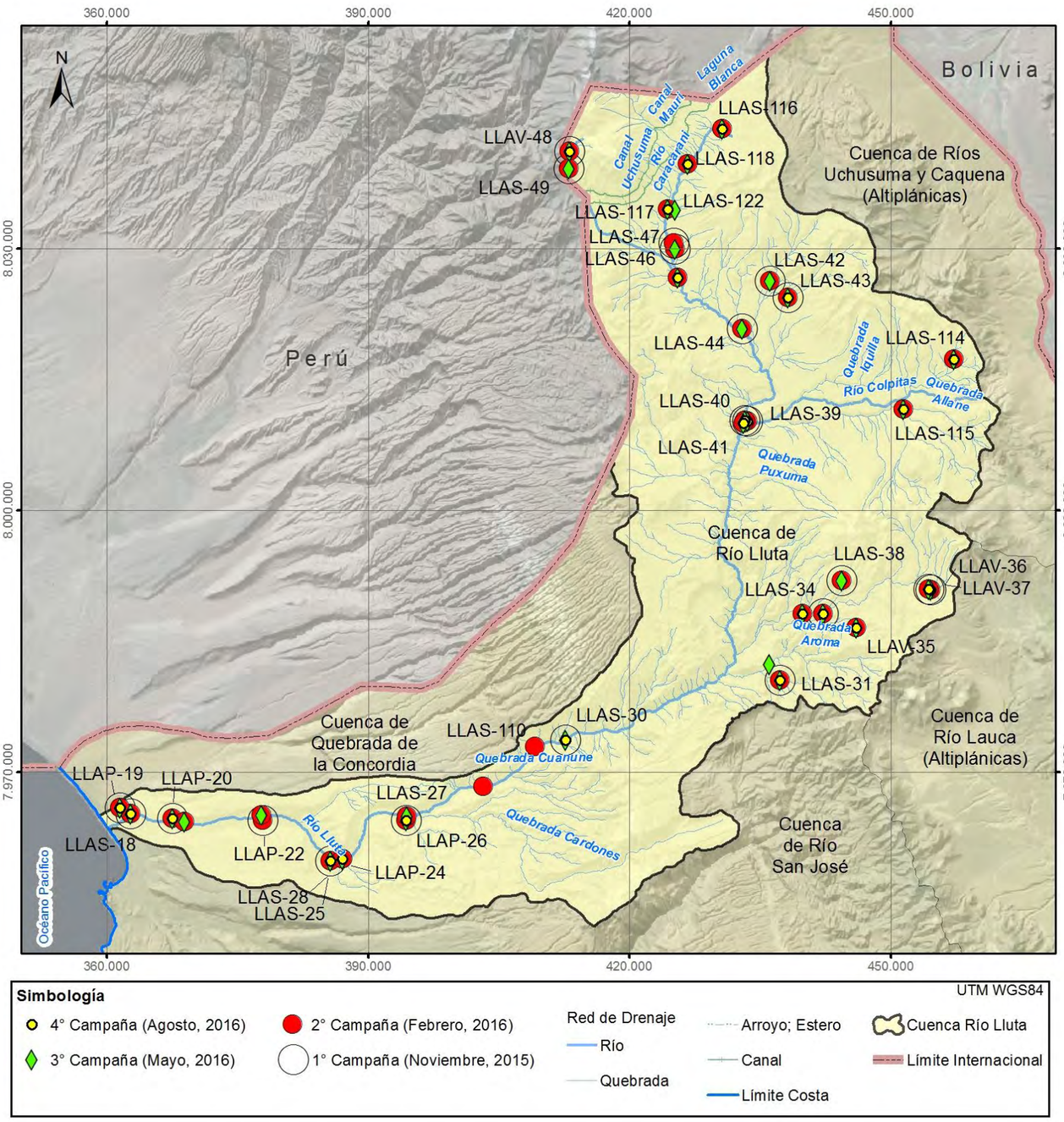


Figura 7.100 Ubicación de los puntos muestreados para el análisis hidroquímico en la cuenca del río Lluta durante las diferentes campañas de muestreo. Fuente: elaboración propia.

7.3.4.3 Parámetros fisicoquímicos *in situ*

En las 4 campañas de terreno se midieron los parámetros fisicoquímicos de las muestras que se tomaron para el análisis hidroquímico e isotópico. En esta sección se evalúan los valores de temperatura, pH, conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales (TDS) para caracterizar estos parámetros fisicoquímicos e identificar si existe una variación espacial y estacional de estos.

TEMPERATURA

La temperatura registrada en las 4 campañas indica un amplio rango de variación, entre 56 y 5°C. En la Tabla 7.57 se resumen los valores máximos, mínimos y promedios de temperatura registrados en las cuatro campañas de terreno realizadas en el presente estudio.

Tabla 7.57 Valores máximos, mínimos y promedios de temperatura registrados en cada campaña de muestreo en la cuenca del río Lluta. Fuente: elaboración propia.

Temperatura (°C)	1°Campaña Noviembre 2015	2°Campaña Febrero 2016	3°Campaña Mayo 2016	4°Campaña Agosto 2016
Máxima	55,7	51,2	51,6	51,1
Mínima	8,9	9,5	7,6	5,7
Promedio	22,7	23	18,5	19,16

En la Figura 7.101 se observa la temperatura medida en las aguas superficiales, la cual varía principalmente entre 10 y 30°C y en la Figura 7.102 se muestra la temperatura registrada en las aguas subterráneas, tanto en pozos como en vertientes, que oscila entre 56 y 9°C. El máximo valor de temperatura se midió en la vertiente hidrotermal de Jurasi, variando entre 51 y 56°C, también destaca la temperatura registrada en el río Azufre (47-30°C) y en la vertiente hidrotermal ubicada en el sector de Las Cuevas (33-30°C). Por otro lado, la temperatura de las aguas subterráneas medida en los pozos ubicados en el valle del río Lluta fluctúa entre 22 y 29°C, siendo generalmente constante en el tiempo. Es destacable que la temperatura más baja (9 y 10°C) se registra en una vertiente próxima al refugio de la Conaf en el sector de Las Cuevas y a 200 m de la fuente hidrotermal (33-30°C), indicando posiblemente diferente origen de las aguas.

Las temperaturas se mantienen constantes en el tiempo, fluctuando de manera puntual en algunas muestras pero sin una variación estacional marcada.

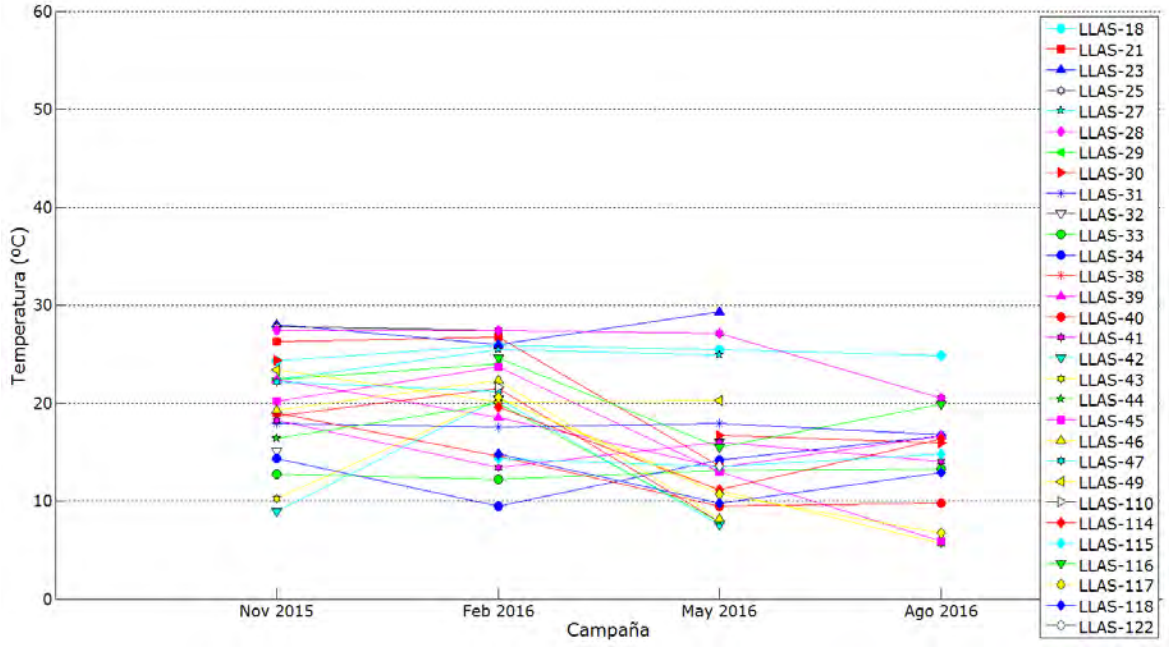


Figura 7.101 Valores de temperatura registrados en las aguas superficiales en las campañas realizadas en la cuenca del río Lluta. Fuente: elaboración propia.

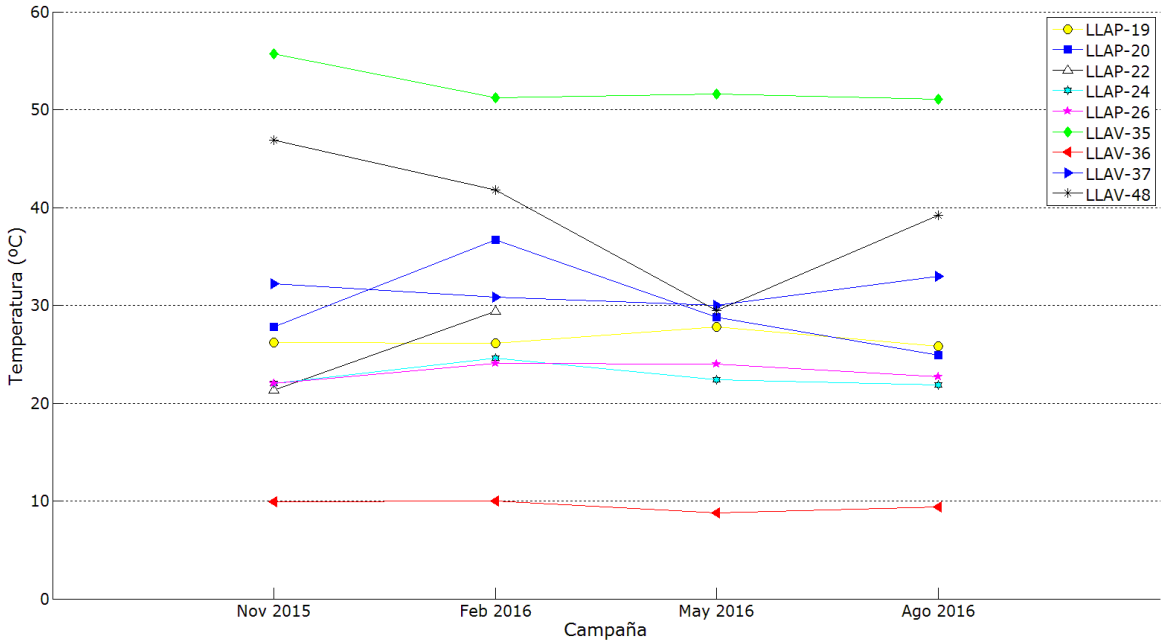


Figura 7.102 Valores de temperatura registrados en las aguas subterráneas en las campañas realizadas en la cuenca del río Lluta. Fuente: elaboración propia.

PH

El parámetro pH registrado *in situ* en las aguas superficiales y subterráneas durante las cuatro campañas de muestreo presenta un amplio rango de variación, es decir, entre pH ácido, de 2 en Aguas Calientes (LLAS-48), a pH alcalino, de 9,2 en el nacimiento del río Caracarani (LLAS-116). La Tabla 7.58 resume los valores máximos, mínimos y promedios de pH registrados en las cuatro campañas de terreno realizados en el presente informe. Para el análisis se consideran los valores obtenidos *in situ,* excepto algunos valores en el que se han considerado los valores obtenidos en el laboratorio, debido a la poca fiabilidad de la medición en terreno.

Tabla 7.58 Valores máximos, mínimos y promedio de pH registrado en cada campaña de muestreo en la cuenca del río Lluta Fuente: elaboración propia.

pH	1°Campaña Noviembre 2015	2°Campaña Febrero 2016	3°Campaña Mayo 2016	4°Campaña Agosto 2016
Máxima	8,54	9,24	9,04	7,9
Mínima	2	1,6	1,7	1,5
Promedio	6,7	6,7	6,8	6,6

En la Figura 7.103 se muestra la amplia variación de pH en las aguas superficiales que se analizaron en la cuenca. El río Azufre se caracteriza por poseer las aguas superficiales más ácidas, pH 2, mientras que el río Caracarani son aguas alcalinas, de pH 6,9 y 9,2. El resultado de la confluencia de estos ríos, el río Lluta, son aguas levemente ácidas, de pH entre 4,5 y 5,5. Estos valores se mantienen constantes hasta la confluencia con el río Colpitas, el cual aporta aguas alcalinas de pH 8. En las quebradas de los complejos volcánicos Ancolacane, Chuquiananta, Churicagua y Copatanca y del río Colpitas son aguas alcalinas, de pH entre 7 y 9.

En el sector de Putre las aguas superficiales de las diferentes quebradas son neutras, variando el pH entre 6 y 7,8. Es destacable que las quebradas Aroma y Socoroma presenten aguas levemente ácidas, en que el pH varía entre 4,5 y 5,5.

Aguas abajo, en el sector del valle, las aguas superficiales del río Lluta tienen un pH neutro-alcalino, de pH entre 6 y 8,5.

Si se comparan los valores de pH de las cuatro campañas de muestreo, se identifica un descenso del pH medido en febrero de 2016 en las aguas del río Lluta, indicando que está más influenciado por el río Azufre, es decir, que recibe mayor aporte de aguas más

ácidas que en el resto de campañas probablemente por las precipitaciones del invierno Altiplánico.

Por otro lado, en la Figura 7.104 se indica que las aguas subterráneas varían desde aguas ácidas hasta aguas neutras, pH entre 1,4 y 7,7. Las aguas de los pozos ubicados en el valle del río Lluta y de las diferentes vertientes son neutras, con un pH que varía entre 6 y 7,3 °C y contante en el tiempo, sin embargo la muestra tomada en el vertiente hidrotermal que da origen al río Azufre son aguas ácidas, pH entre 2 y 1,44.

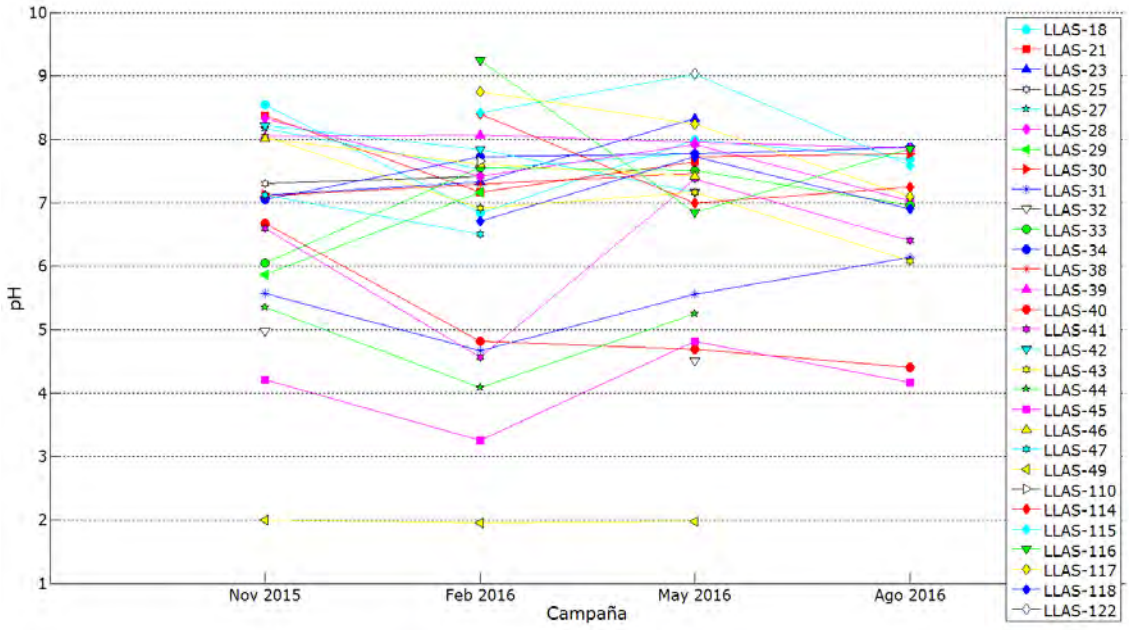


Figura 7.103 Valores de pH registrados en las aguas superficiales en las campañas realizadas en la cuenca del río Lluta. Fuente: elaboración propia.

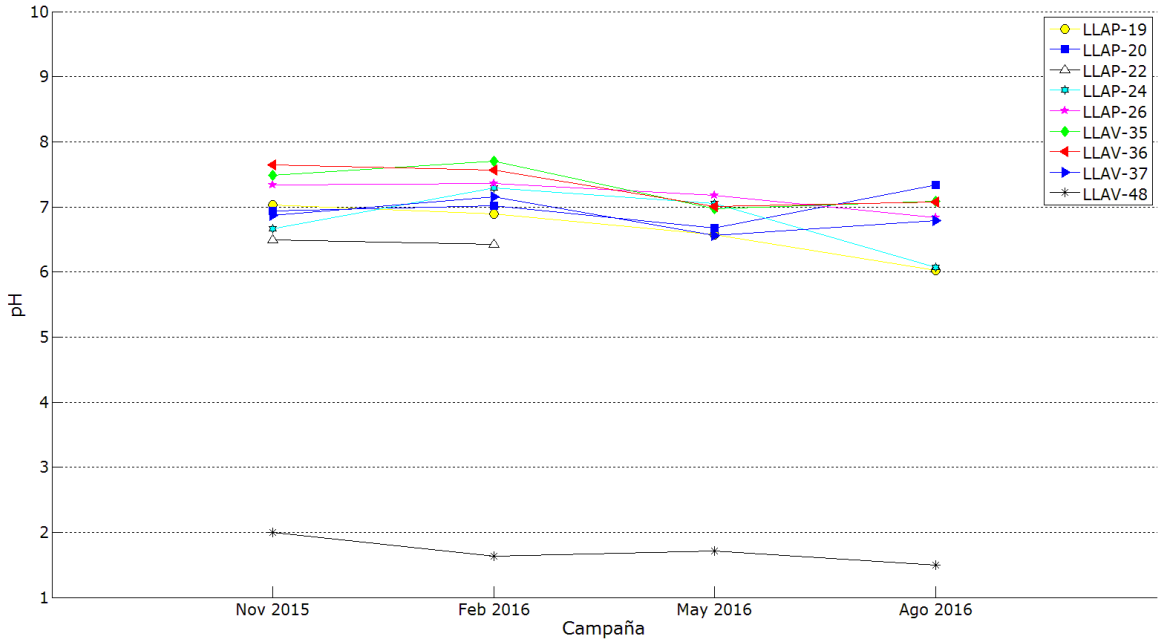


Figura 7.104 Valores de pH registrados en las aguas subterráneas en las campañas realizadas en la cuenca del río Lluta. Fuente: elaboración propia.

CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

La conductividad eléctrica (CE) oscila entre los 100 y 12.400 µS/cm en la cuenca del río Lluta, y en la Tabla 7.59 se resumen los valores máximos, mínimos y promedios de CE registrados en las cuatro campañas de muestreo realizadas en el presente informe. Para el análisis de la segunda y tercera campaña se consideraron los valores obtenidos en el laboratorio, debido a la poca fiabilidad de la medición en terreno.

Tabla 7.59 Valores máximos, mínimos y promedios de conductividad eléctrica registrados en cada campaña de muestreo en la cuenca del río Lluta. Fuente: elaboración propia.

CE (µS/cm)	1°Campaña Noviembre 2015	2°Campaña Febrero 2016 (laboratorio)	3°Campaña Mayo 2016 (laboratorio)	4°Campaña Agosto 2016
Máxima	7.530	7.700	7.942	5.220
Mínima	185	114	107	83
Promedio	2.321	1.528	1.928	1.500

En la Figura 7.105 se muestra que las aguas superficiales presentan una amplia variación de conductividad eléctrica, entre 8.000 y 100 µS/cm. Las aguas superficiales en el sector medio y alto de la cuenca son aguas con una conductividad eléctrica que varía entre 1.000 y 2.500 µS/cm. Estos valores de conductividad eléctrica son superados por las

aguas analizadas en el río Azufre (LLAS-49) con 7.700 µS/cm, en el río Colpitas antes de la confluencia con el río Lluta (LLAS-39) con 3.000 µS/cm y en una quebrada próxima a Putre (LLAS-34) con 6.000 µS/cm. Destacan por ser aguas frescas y dulces las muestras LLAS-46, LLAS-42, LLAS-43 en la quebrada Chuquiananta y una quebrada del volcán Taapacá (LLAS-38).

En el sector del valle del río Lluta las aguas superficiales presentan valores de conductividad eléctrica de 2.000 µS/cm en Chironta, aumentando progresivamente hacia la desembocadura al océano Pacífico hasta alcanzar los 5.600 µS/cm en noviembre 2015 y a los 3.000 µS/cm el resto del año.

Por otro lado, en la Figura 7.106 se observa la variación de la conductividad eléctrica en las aguas subterráneas analizadas. El máximo valor de conductividad eléctrica lo presenta la vertiente Aguas Calientes (LLAS-49) con 8.600 y 12.400 µS/cm. La vertiente Jurasi tiene una conductividad de 3.000 µS/cm, la vertiente hidrotermal ubicada en el sector de Las Cuevas (LLAV-37) varía entre 2.000 y 1.500 µS/cm, mientras que la vertiente fría del sector de Las Cuevas (LLAV-36) es agua fresca con 100 µS/cm.

Por otro lado, las aguas subterráneas tomadas en los pozos presentan conductividades que varían entre 2.000 µS/cm en el sector de Chironta hasta los 5.000 µS/cm en el pozo ubicado en Villa Frontera. Los valores de conductividad eléctrica se mantienen constantes en el tiempo, excepto el pozo LLAP-20 que muestra un valor bajo (636 µS/cm) respecto al resto de análisis (4.700 y 3.700 µS/cm).

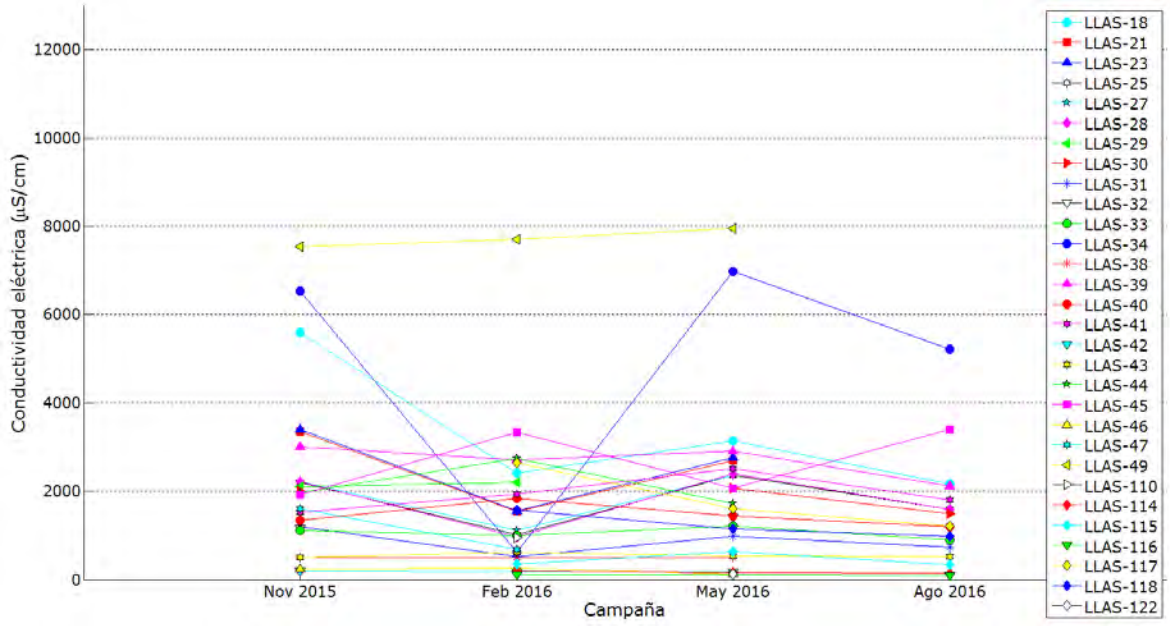


Figura 7.105 Valores de conductividad eléctrica registrados en las aguas superficiales en las campañas realizadas en la cuenca del río Lluta. Fuente: elaboración propia.

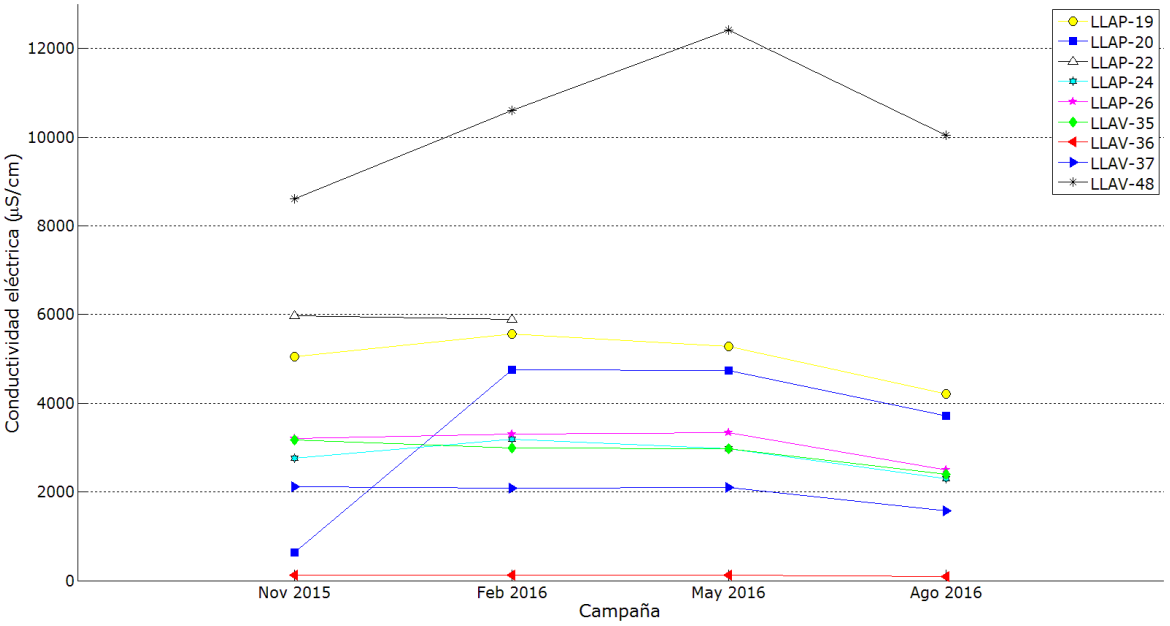


Figura 7.106 Valores de conductividad eléctrica registrados en las aguas subterráneas en las campañas realizadas en la cuenca del río Lluta. Fuente: elaboración propia.

SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES (TDS)

La Tabla 7.60 resume los valores máximos, mínimos y promedios de sólidos disueltos totales (TDS) registrados en las cuatro campañas de terreno realizadas en el presente informe. Los resultados considerados en la segunda campaña de muestreo, febrero de 2016, son los obtenidos en el laboratorio, ya que los registrados *in situ* fueron poco fiables.

Tabla 7.60 Valores máximos, mínimos y promedio de Sólidos disueltos totales (TDS) registrado en cada campaña de muestreo en la cuenca del río Lluta. Fuente: elaboración propia.

TDS (mg/L)	1°Campaña Noviembre 2015	2°Campaña Febrero 2016 (laboratorio)	3°Campaña Mayo 2016	4°Campaña Agosto 2016
Máxima	5.510	5.372	7.698	5.126
Mínima	76,3	138	65	53
Promedio	1.700	1.472	1.615	1.577

7.3.4.4 Modelo hidroquímico de las aguas

A continuación se analizan los resultados de la composición química de las aguas superficiales y subterráneas tomadas en pozos, vertientes y ríos en cada campaña de terreno realizada en el presente estudio en la cuenca del río Lluta.

CONTROL DE CALIDAD ANÁLISIS QUÍMICOS

Los valores máximos y mínimos del error del balance iónico de la composición química obtenida en el laboratorio se presentan en la Tabla 7.61. Se consideró que el valor del error del balance iónico fue aceptable en todas las campañas efectuadas, a excepción de algunas muestras que se comentan posteriormente.

Tabla 7.61 Resumen de los valores máximos y mínimos del error del balance iónico de la composición química de las muestras de las cuatro campañas de muestreo en la cuenca del río Lluta. Fuente: elaboración propia.

Error del balance iónico	1°Campaña Noviembre 2015	2°Campaña Febrero 2016	3°Campaña Mayo 2016	4°Campaña Agosto 2016
Máximo	9,8%	20,43%	8,98%	9,53%
Mínimo	-8,57%	-19,39%	-30,33%	-51,63%

Las muestras que superan el valor de error del balance iónico del 10% es debido a que son aguas ácidas o que tienen un alto contenido de partículas. Es destacable que las muestras tomadas en la terma Aguas Calientes y en el río Azufre presenta un pH ácido, lo cual provoca un desplazamiento en el equilibrio de los metales y un mayor error en el balance iónico. Por lo tanto, para estas muestras en concreto se utilizó el diagrama de Pourbaix-silicio, con el objetivo de trazar un equilibrio estable en las fases de un sistema electroquímico acuoso. En el Anexo VIII se presenta la metodología con mayor detalle del diagrama de Pourbaix-silicio.

En la segunda campaña se observa un alto error en el balance iónico debido a que se analizaron los cationes y aniones totales y las muestran presentaron un alto contenido en partículas coloidales y sedimentables. En el Anexo VIII se muestra que varias muestras fueron filtradas posteriormente en el laboratorio y que el error del balance iónico de los elementos disueltos fue generalmente inferior al 10%.

Por otro lado, se tomaron dos muestras de agua, LLAS-25 y LLAS-28, en el mismo momento y punto del río Lluta en Poconchile para comprobar la calidad de los resultados del laboratorio. Se obtuvieron valores similares del error del balance iónico de ambas muestras en cada campaña, lo cual verifica la calidad del análisis químico de laboratorio.

ANÁLISIS DE FACIES QUÍMICAS

En los diagramas de Piper y Schoeller-Berkaloff elaborados en esta sección y en el Anexo VIII se han representado de color azul las aguas superficiales del río Lluta, de color rojo las muestras tomadas en vertientes, de color naranjo las aguas subterráneas tomadas en pozos, de color negro las aguas superficiales del río Azufre, de color café las aguas superficiales del río Caracarani, de color verde las muestras tomadas en diferentes quebradas y de color morado las aguas del río Colpitas. En el Anexo VIII se muestran los diagramas de Piper y Schoeller-Berkaloff de las aguas superficiales y subterráneas analizadas en febrero, mayo y agosto de 2016.

El río Lluta se forma por la confluencia en Humapalca de los ríos Caracarani y Azufre, siendo el primero el más caudaloso. El río Azufre se forma por la confluencia de varias vertientes, de las cuales la quebrada Tacora es la principal y se caracteriza por el afloramiento de una vertiente hidrotermal, correspondiente a la vertiente de Aguas Calientes, de aguas ácidas sulfatadas sódico-cálcicas (LLAV-48) que aguas abajo de la

mina de azufre abandonada son aguas ácidas sulfatadas sódicas. Por otro lado, el río Caracarani se origina a los pies del portezuelo de la Laguna Blanca y recibe los aportes hídricos del faldeo oriental del volcán Tacora. Se observa una evolución en el río Caracarani, en el que una de las vertientes que dan origen al río Caracarani es agua bicarbonatada cálcica muy poco mineralizada, aguas abajo en el río son más clorurada-sulfatada cálcicas y antes de la confluencia con el río Azufre son sulfatadas cálcicas y presentan un mayor contenido en elementos mayoritarios, de 10 meq/L, similar al río Azufre, pero con un pH básico. Aguas abajo, las muestras LLAS-47 y LLAS-46 que alimentan al río Caracarani son sulfatadas sódico-cálcicas con alto contenido en magnesio. En febrero de 2016 la muestra LLAS-46, fueron aguas bicarbonatadas con un equilibrio entre el contenido de cationes, probablemente influenciado por el aporte de precipitaciones durante el invierno altiplánico.

Después de la confluencia de los ríos Azufre y Caracarani, en Humapalca nace el río Lluta. Las aguas del río son sulfatadas sódicas con un alto contenido de cloruros y calcio y van evolucionando aguas abajo, siendo cloruradas cálcicas en la desembocadura del valle del río Lluta.

El río Lluta en el sector de la cabecera recibe aguas de numerosas vertientes que tienen diferentes composiciones químicas. La muestra LLAS-42 tomada en Guancarane cuyas aguas son bicarbonatadas sódicas y muy poco mineralizadas, con un contenido menor a 1 meq/L de elementos mayoritarios. A menos de 3 km de la muestra LLAS-42, se tomó la muestra LLAS-43 en la quebrada Chuquiananta, cuyas aguas son sulfatadas cálcico-magnésicas y de mayor grado de mineralización que la muestra anterior. La composición química de ambas muestras se mantiene constante en el tiempo.

En cambio, la muestra LLAS-39 tomada en el río Colpitas antes de la confluencia con el río Lluta son aguas cloruradas sódicas con un contenido de elementos mayoritarios entorno al 10 meq/L. Las vertientes que dan origen al río Colpitas, aguas arriba de la boratera, son aguas sulfatadas cálcicas con bajo contenido en elementos mayoritarios, inferior al 1 meq/L. Paralelamente al río Colpitas fluye la quebrada Allane, sin embargo, estas aguas son bicarbonatadas-cloruradas cálcico-sódicas.

En el sector de Las Cuevas, la vertiente fría LLAV-36 es sulfatada sódica con una relativa abundancia de bicarbonatos y muy poco mineralizada, mientras que a pocos metros de ésta, la muestra de la vertiente caliente LLAV-37, es clorurada sódica con influencia de

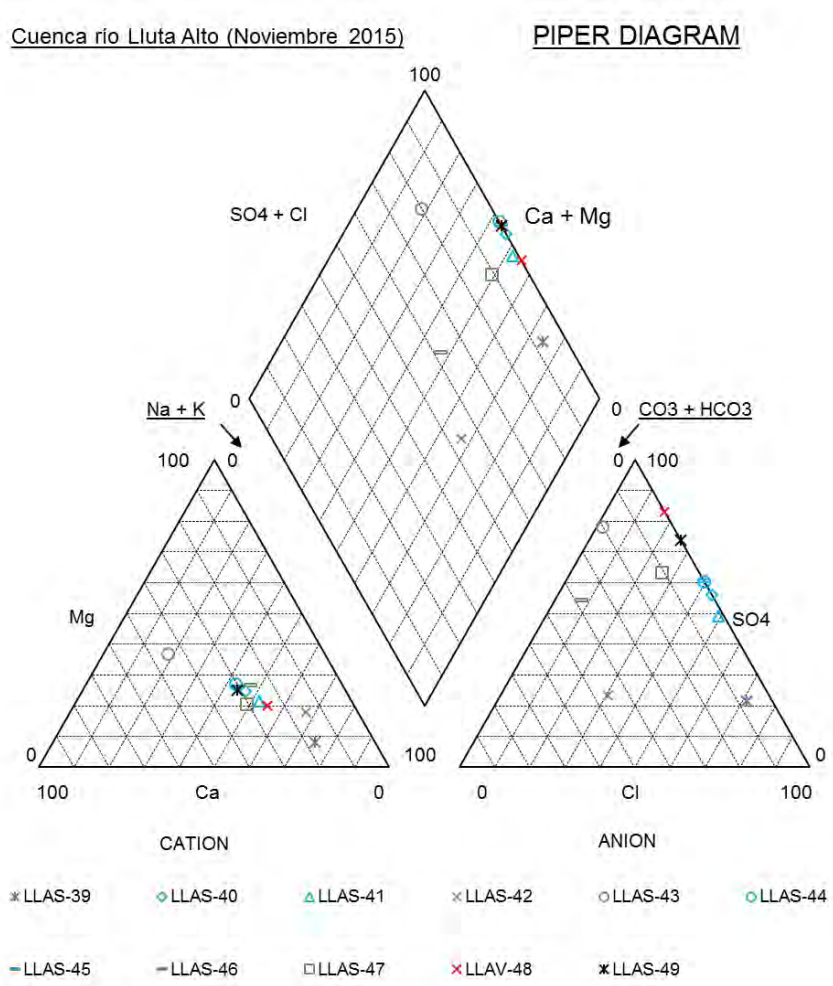
bicarbonatos. La fuente hidrotermal que da origen a la quebrada Jurasi (LLAV-35) es sulfatada sódico-cálcica y se alimenta aguas abajo por las aguas cloruradas sódicas de la quebrada donde se tomó la muestra LLAS-34. En una quebrada al norte del pueblo de Putre se obtuvieron aguas sulfatos-cloruradas sódicas, en la muestra LLAS-33. En cambio, en una de las quebradas del volcán Taapacá las aguas son sulfatadas cálcico-sódicas, en la muestra LLAS-38. Aguas abajo, en las quebradas Aroma (LLAS-32) y Socoroma (LLAS-31) las aguas son sulfatadas sódicas.

La composición química de las aguas subterráneas tomadas en los pozos del valle del río Lluta son cloruradas sódicas o sódico-cálcicas, constante en el tiempo y no hay una evolución clara en el contenido de elementos mayores. En el valle del río Lluta las aguas superficiales y subterráneas son cloruradas excepto en febrero, cuando las aguas superficiales son sulfatadas.

Destaca a nivel de cuenca que las aguas superficiales de los ríos Azufre y Lluta y las aguas subterráneas del acuífero del valle del río Lluta presentan un leve o nulo contenido de bicarbonatos.

En la Figura 7.109 se muestra el diagrama de Schoeller-Berkaloff de las muestras analizadas en el sector bajo de la cuenca del río Lluta, se observa que estas aguas superficiales y subterráneas tienen un grado de mineralización similar, sin embargo, se identificó un enriquecimiento de elementos mayoritarios a lo largo del cauce del río Lluta y del acuífero en el sector del valle del río Lluta. En los análisis desarrollados en febrero de 2016, las aguas subterráneas suelen presentar mayor grado de mineralización que las aguas superficiales, esto es debido a que las aguas subterráneas tienen menor velocidad y mayor tiempo de residencia que las aguas superficiales y por otro lado, las aguas superficiales están diluidas por las precipitaciones que se producen en la cabecera de la cuenca durante el invierno altiplánico.

La comparación de las facies obtenidas de los puntos muestreados en los estudios anteriores y con las diferentes campañas de muestreo muestra que éstas son iguales o muy similares, y no se identificó una evolución temporal importante.



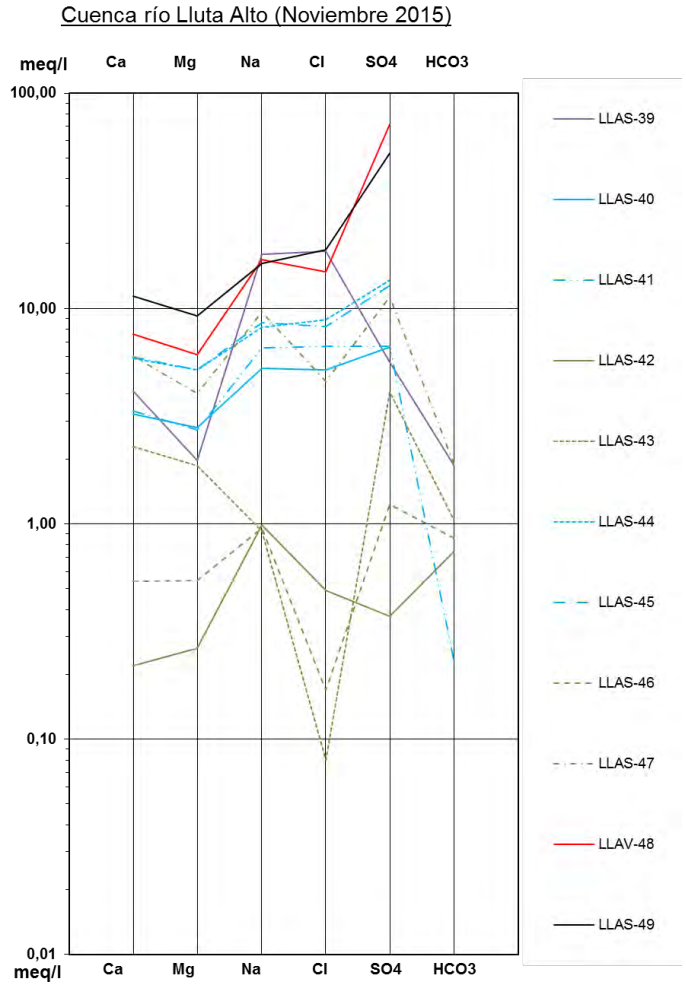


Figura 7.107 Diagramas de Piper y de Schoeller-Berkaloff de las muestras analizadas en el sector alto de la cuenca del río Lluta, campaña de noviembre de 2015. Fuente: elaboración propia.

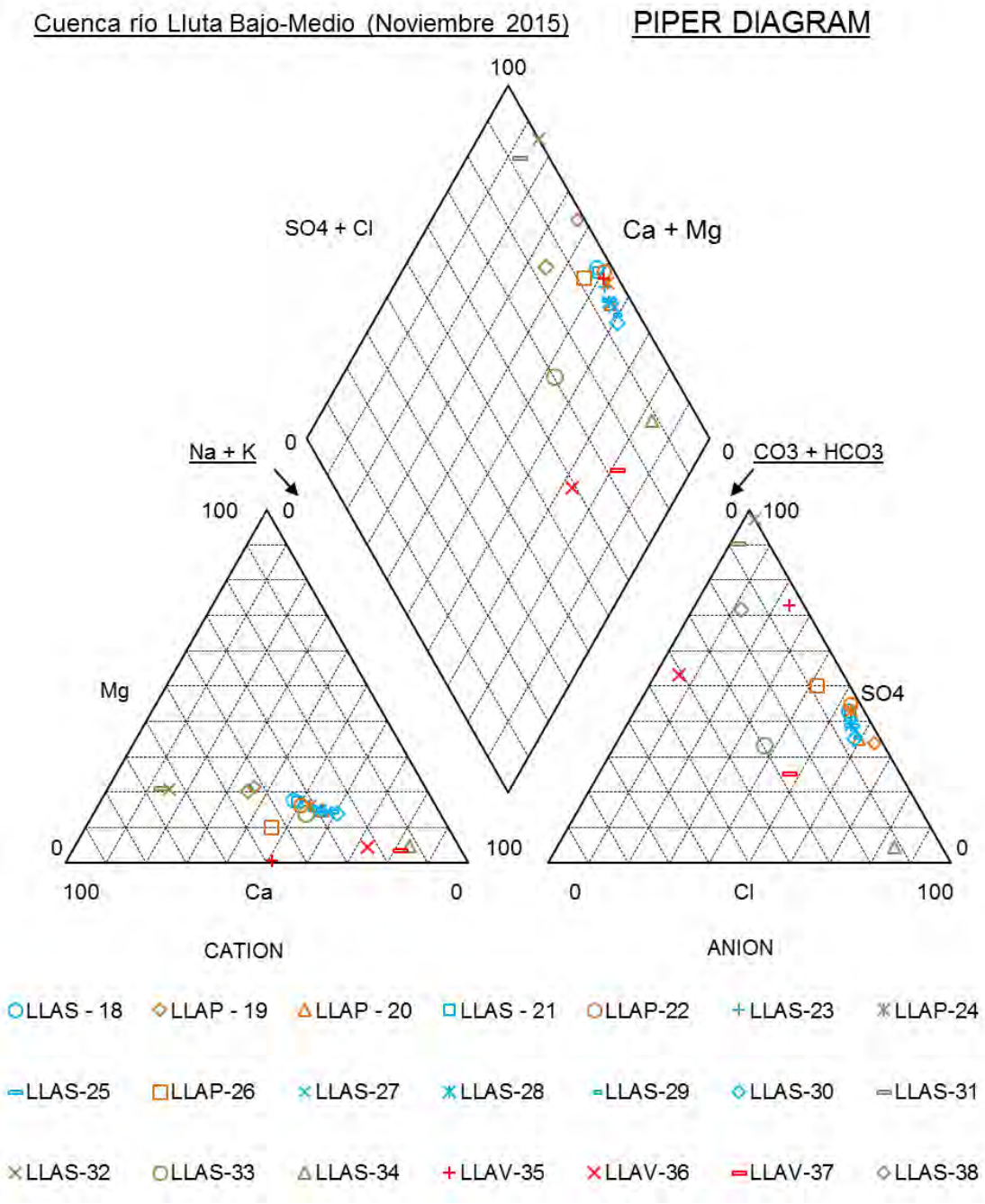


Figura 7.108 Diagrama de Piper de las muestras analizadas en el sector bajo y medio de la cuenca del río Lluta, campaña noviembre de 2015. Fuente: elaboración propia.

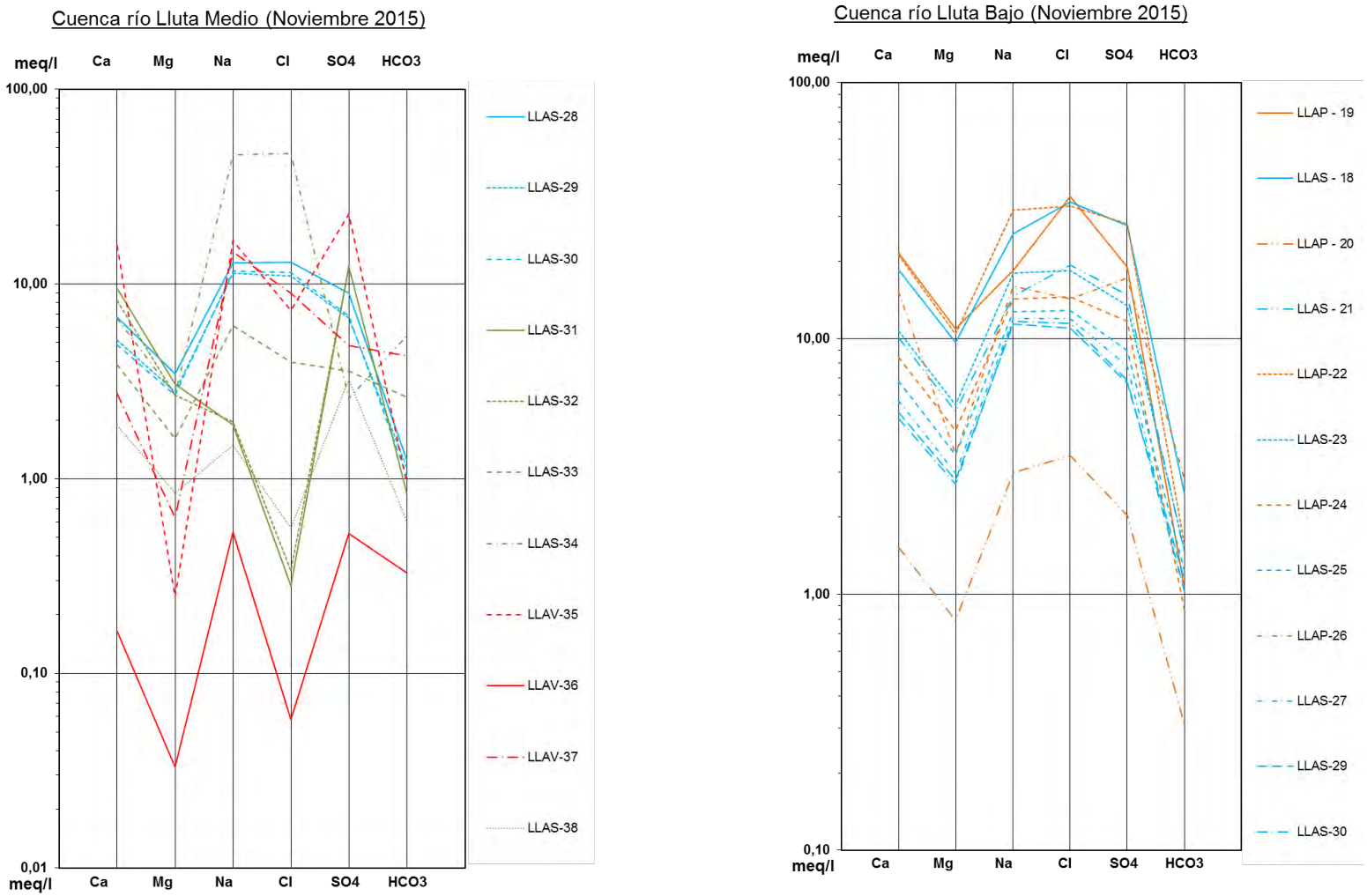


Figura 7.109 Diagramas de Schoeller-Berkaloff de las muestras analizadas en el sector medio y bajo de la cuenca del río Lluta, campaña noviembre de 2015. Fuente: elaboración propia.

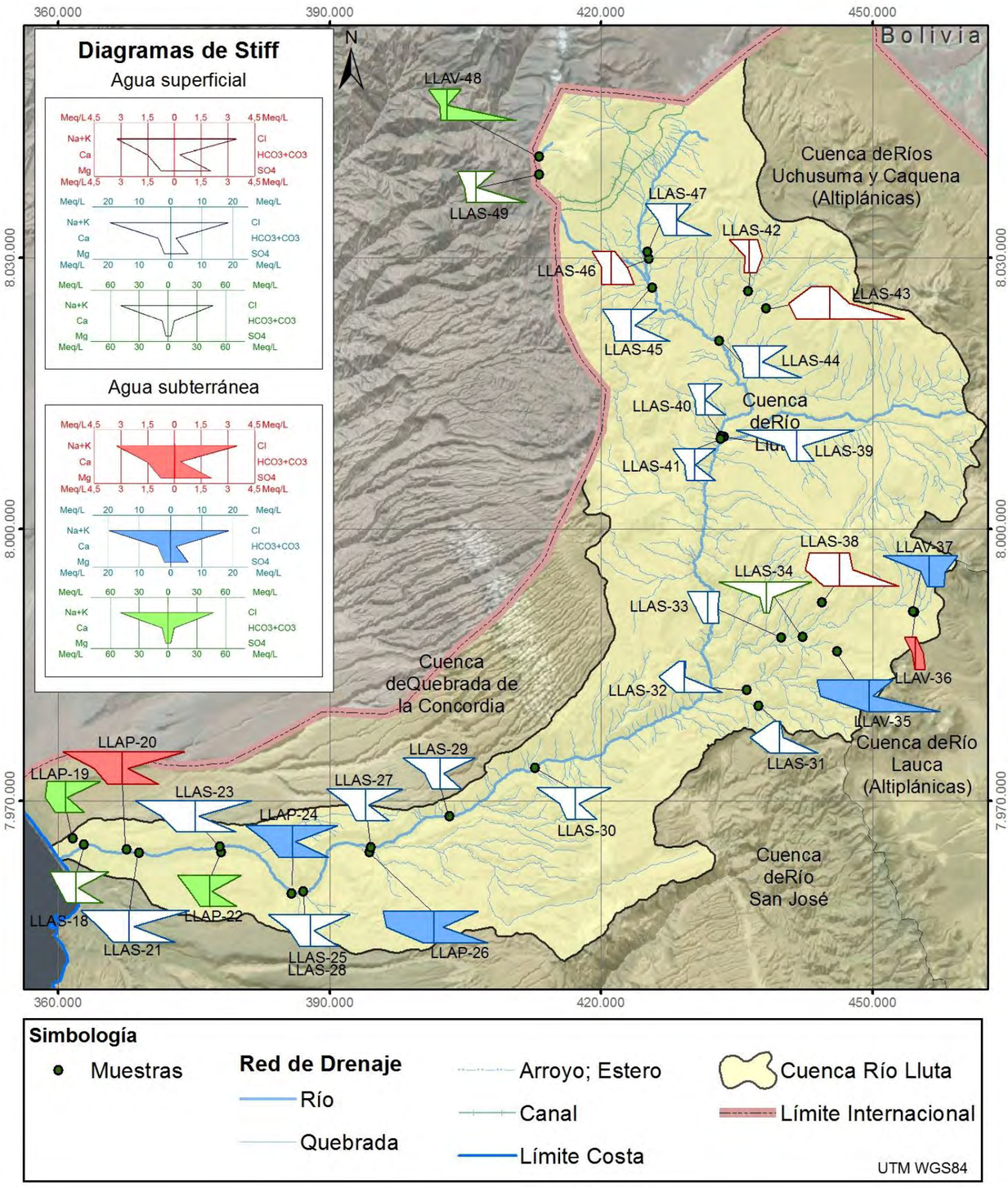


Figura 7.110 Diagrama de Stiff de las muestras analizadas en la cuenca del río Lluta, campaña noviembre de 2015. Fuente: elaboración propia.

En el Anexo VIII se presentan los gráficos del contenido de elementos mayoritarios y minoritarios obtenidos en las diferentes campañas. En estos gráficos se observa que la vertiente de Aguas Calientes y el río Azufre presentan un mayor nivel de bromuros, cadmio, aluminio, arsénico, potasio, sulfatos, silicio, zinc, plomo, fosfatos, hierro, fluoruros que el resto de muestras analizadas en la cuenca. Destaca el contenido de mercurio en noviembre de 2015 y selenio en agosto de 2016 en la vertiente Aguas Calientes.

El mayor contenido de elementos mayoritarios y minoritarios se detecta en el análisis efectuado en febrero de 2016, probablemente por el arrastre de sedimentos que producen las fuertes precipitaciones del invierno altiplánico. Es significativo el alto contenido de cadmio, arsénico, selenio, zinc, plomo, manganeso y mercurio en la muestra del río Lluta LLAS-18 analizada en febrero de 2016.

El contenido de boro tanto en aguas superficiales como subterráneas presentan entre 0 y 40 mg/l, excepto en la muestra tomada en una quebrada próxima a Putre (LLAS-34) que alcanza 85 y 95 mg/l en el análisis efectuado en mayo y agosto respectivamente. El contenido de bromuros suele ser inferior a 1 mg/l, sin embargo, las muestras de la vertiente Aguas Calientes (LLAV-48), aguas abajo en el río Azufre y en una quebrada próxima a Putre (LLAS-34) contienen entre 2 y 3 mg/l de bromuros.

El valor de nitratos registrado en los pozos del valle del río Lluta y en la vertiente hidrotermal Aguas Calientes es superior al resto de las aguas de la cuenca, variando entre 10 y 20 mg/l de nitratos mientras que el resto de las aguas es inferior a 5 mg/l. Esto indicaría que las fuentes hidrotermales y el uso de fertilizantes en el valle del río Lluta son las fuentes aportantes de nitratos en los diferentes sectores de la cuenca y que el acuífero presenta un mayor contenido de nitratos que las aguas superficiales del río Lluta.

El contenido de litio fluctúa entre 0,17 y 6,7 mg Li/L en las aguas analizadas en la primera campaña de terreno. En el sector alto y medio de la cuenca del río Lluta el contenido es inferior a 1 mg/L, exceptuando el río Colpitas (LLAS-39) y la terma Jurasi (LLAV-35) que presentan valores entre 1 y 3 mg/L, y la muestra LLAS-34 cercana a Putre que contiene 6 mg/L. A partir de Chironta las aguas superficiales y subterráneas

poseen concentraciones de Li entre 1 y 3 mg/L, menos los pozos LLAP-20 y LLAP-19, aguas abajo de la carretera Panamericana, que tienen menos de 1 mg/L.

EVOLUCIÓN DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS AGUAS

La calidad del agua de la cuenca del río Lluta está regulada por procesos naturales, asociados a características geológicas existentes en la cuenca. El río Lluta recibe contaminantes provenientes de dos fuentes, por un lado el río Azufre aporta aguas ácidas y ricas en arsénico, boro, azufre y metales como hierro, manganeso y zinc y, aguas abajo, el río Colpitas suministra aguas alcalinas y con alto contenido de boro.

El río Azufre se caracteriza por el afloramiento de la vertiente hidrotermal Aguas Calientes. Estas aguas presentan una temperatura mayor a 40°C, un pH ácido (pH inferior a 2), una conductividad eléctrica mayor a 5.000 µS/cm y una composición química sulfatadas sódicas. Aguas abajo de la mina de azufre abandonada, como se muestra en la Figura 7.111, las aguas son sulfatadas sódico-cálcicas. La vertiente hidrotermal Aguas Calientes constituye la mayor fuente contaminante natural de aluminio, arsénico, boro, bromuro, cadmio, cloruros, fluoruros, fosfatos, hierro, manganeso, mercurio, nitratos, plomo, sulfatos, sílice y zinc en el recurso hídrico de la cuenca del río Lluta.

Figura 7.111 Volcán Tacora y azufrera abandonada ubicada en el río Azufre. Fuente: elaboración propia.

Por otro lado, el río Caracarani presenta un pH alcalino y una conductividad eléctrica que va aumentando desde 115 µS/cm a 2.600 µS/cm desde una de las vertientes hasta el sector del pueblo de Tacora. La composición hidroquímica de las aguas evoluciona desde aguas bicarbonatadas cálcicas muy poco mineralizadas en una de las vertientes que dan origen al río Caracarani, aguas abajo son más sulfatos-cloruradas cálcicas y antes de la confluencia con el río Azufre son sulfatadas cálcicas y presentan un contenido en elementos mayoritarios, similar al río Azufre.

La confluencia del río Azufre con el río Caracarani da origen al río Lluta, resultando unas aguas ácidas (pH 4) y sulfatadas sódico-cálcicas que van evolucionando hacia cloruradas. Según la JICA (1995) el 33% del río Lluta corresponde al aporte del río Caracarani (394 l/s) y el 6% del río Azufre, sin embargo la composición química del río Azufre al ser más mineralizada condiciona al río Lluta desde el nacimiento. En el análisis efectuado en febrero de 2016 se ve reflejado una mayor influencia hidroquímica del río Azufre que el río Caracarani en el río Lluta que en el resto de campañas de muestreo, ya que son aguas más ácidas y sulfatadas desde Humapalca hasta después de la confluencia del río Colpitas. Esta situación es producto de la dilución y disolución de minerales por la escorrentía superficial durante tormentas

asociadas al invierno altiplano y/o debido a las abundantes precipitaciones del invierno altiplánico en el que se puede haber producido un desbordamiento del canal que desvía el río Azufre.

En el sector alto de la cuenca el río Lluta recibe el 29% del aporte del agua superficial a nivel de cuenca, en torno a 334 l/s según JICA (1995), desde diferentes quebradas originadas en los complejos volcánicos Caracarani, Chuquiananta y Churicagua. Son aguas frescas y básicas, cuya composición química varía entre bicarbonatadas a sulfatadas y el catión predominante oscila entre calcio y sodio. Estas aguas no presentan niveles altos de ningún metal ni elemento traza aunque existen zonas de alteración hidrotermal que proceden de las cumbres de los complejos volcánicos. Este aporte no influye relativamente en la composición hidroquímica del río Lluta por ser agua muy poco mineralizada.

En el sector de Alcérreca el río Lluta recibe las aguas del río Colpitas, que junto a la quebrada Allane constituyen el 19% del aporte superficial al río Lluta a nivel de cuenca. Una de las vertientes del complejo volcánico Copatanca, que da origen al río Colpitas, son aguas frescas, básicas, sulfatadas cálcico-sódicas y bajo o nulo contenido de metales o elementos traza. Antes de la confluencia del río Colpitas con el río Lluta, el río Colpitas recibe las aguas de la quebrada Allane, las cuales son de mejor calidad. Las aguas de la quebrada Allane son aguas frescas, básicas y bicarbonatadas-cloruradas cálcico-sódicas. Las aguas que aporta el río Colpitas al río Lluta son aguas básicas, con una conductividad eléctrica de 3.000 μS/cm y cloruradas sódicas. El río Colpitas constituye la segunda mayor fuente de contaminantes debido a la existencia de una boratera que está afectada por una fuente hidrotermal. Las aguas de las borateras provenientes desde la fuente hidrotermal están compuestas por productos de disolución de los minerales propios de las borateras, como boro, calcio y sodio que corresponden a la ulexita mientras que el resto de sodio y cloruro pertenecen a la halita. Por último, el arsénico, hierro, litio y zinc disuelto proceden de las aguas termales.

Aguas abajo, en el sector de Putre existen numerosas quebradas, que constituyen el 27% del aporte superficial al río Lluta a nivel de cuenca (JICA, 1995), las cuales algunas de ellas fueron muestreadas y analizadas. Las facies de estas aguas principalmente suelen ser sulfatadas, excepcionalmente clorurada, y el catión dominante varía entre calcio y sodio. Es importante mencionar que existen dos

vertientes hidrotermales en esta zona de la cuenca, una situada en la quebrada Jurasi y otra en el sector de Las Cuevas. La fuente hidrotermal de Jurasi se caracteriza por presentar una temperatura mayor a 50 °C, pH neutro, una conductividad alrededor de 3.000 µS/cm, facie de tipo sulfatada sódica-cálcica y alto contenido de fosfatos. En cambio, la vertiente de Las Cuevas posee 30°C de temperatura, pH neutro, una conductividad aproximadamente de 2.000 µS/cm, facies de tipo clorurada-sulfatada sódica y elevado nivel de fluoruros y manganeso. Ambas vertientes contienen alto nivel de arsénico, bromuro y litio. En una de las quebradas próximas al pueblo de Putre, se detectó una muestra (LLAS-34) de facies clorurada sódica anómala por su alto contenido en metales.

Por otro lado, la quebrada Aroma es sulfatada cálcica como la quebrada Socoroma, pero la quebrada Aroma presenta un pH ácido y alto contenido en aluminio disuelto, hierro, manganeso y mercurio disuelto. Este alto contenido de metales se debe al proceso de lixiviación de los minerales existentes en la zona de alteración hidrotermal que presenta en la cumbre del cerro donde nace dicha quebrada. Las quebradas Aroma y Socoroma representa el 3% y 1%, 33 l/s y 12 l/s, respectivamente del agua superficial que recibe el río Lluta a nivel de cuenca.

Las aguas superficiales del río Lluta en el sector del valle generalmente son aguas de pH neutro, salobre y de tipo cloruradas sódicas o sódico-cálcicas, pero en el análisis efectuado en febrero se obtuvieron aguas con valores de pH, conductividad eléctrica y cloruros más bajos, y facies sulfatadas cálcicas a sódico-cálcicas. Esto se produce por las precipitaciones del invierno altiplánico que aumentan la escorrentía en el río Azufre, las laderas del volcán Tacora y en las zonas de alteración hidrotermal que poseen aguas ácidas y un alto contenido de sulfatos.

En cambio, las aguas subterráneas del acuífero del valle del Lluta son aguas salobres, pH neutro y facies cloruradas sódicas o sódico-cálcicas. Los parámetros fisicoquímicos y composición química se mantienen constantes durante las campañas de muestreo. Contienen menos arsénico, aluminio, hierro, mercurio, plomo y manganeso que las aguas superficiales, pero más boro, nitratos, calcio, sodio, sulfatos y bromuro que el río Lluta. Los niveles de calcio son mayores en las aguas subterráneas que superficiales, aunque en ambas se observa un incremento de calcio hacia la costa. Las aguas subterráneas casi no tienen aluminio mientras que las aguas superficiales sí. Se

concluye que las aguas hacia la parte baja de la cuenca, aumenta el pH, la conductividad y la concentración de boro, bromuros y calcio.

Se concluye que la parte alta de la cuenca está influenciada fuertemente por los factores volcánicos, fuentes termales y los salares que adicionan contenido de metales. Mientras que la parte media y baja está influenciada por los efectos del suelo salino dado por la alta concentración de nitratos de sodio y otros compuestos en la cuenca, además el alto contenido de nitratos en las aguas subterráneas del valle del río Lluta se debe a la intensificación de las prácticas agrícolas y ganaderas y la sobreexplotación que sufre el acuífero, empeora la calidad de las aguas subterráneas.

7.3.4.5 Calidad de las aguas

La calidad de las aguas de la cuenca del río Lluta siempre ha sido estudiada y analizada debido a que abastece parte de la ciudad Arica. En la primera campaña de terreno, noviembre de 2015, se analizaron los contenidos de elementos mayoritarios y minoritarios disueltos en las aguas superficiales y subterráneas para poder comparar con el contenido de elementos mayoritarios y minoritarios totales analizados en el resto de campañas de muestreo. En el Anexo VIII se presentan los resultados de las mediciones de parámetros *in situ* y análisis de laboratorio, y dentro de cada tabla se remarcaron en rojo aquellos valores que sobrepasan la norma chilena para uso de agua potable NCh 409 y en verde los resultados de aluminio y boro que superen los límites establecidos en la norma de riego NCh 1.333.

A partir de los resultados de la composición química de las aguas muestreadas durante la primera campaña de terreno se concluyó que ninguna de las muestras de agua superficial o subterránea es apta para el consumo humano. Las aguas superan el límite de arsénico, cadmio, cloruro, fluoruros, hierro, magnesio, manganeso, mercurio, plomo, sulfatos, sólidos totales disueltos, zinc y/ pH. Destaca el alto contenido de metales que presentan las muestras ubicadas en la terma Aguas Calientes (LLAV-48) y la ubicada después de la azufrera en el río Azufre (LLAV-49) y en menor magnitud la muestra tomada en el río Colpitas (LLAS-39). Por otro lado, de las 32 muestras de agua 7 de ellas no excedieron el límite de arsénico, estas se ubican en el sector de Socoroma (LLAS-31 y LLAS-32), pero sobrepasan el límite de al menos

manganeso y sulfatos, la quebrada Chuquiananta (LLAS-43) que excede el contenido de plomo, y el tramo alto del río Lluta (LLAS-46, LLAS-45, LLAS-44, LLAS-43 y LLAS-40) que superan el contenido de plomo, hierro, manganeso, sulfatos, sólidos disueltos totales y/o pH. Las muestras que no son aptas para el consumo humano únicamente por el alto contenido de arsénico son LLAS-42, LLAS-38, LLAS-36, LLAS-33 y LLAP-20.

En el resto de las campañas de muestreo las aguas superaron el nivel de arsénico, cadmio, cloruros, cobre, cromo, fluoruros, hierro, manganeso, magnesio, mercurio, nitrito, plomo, selenio, sulfatos, sólidos totales disueltos, zinc y/o pH que indica la norma NCh 409, por lo que ninguna muestra es apta para el consumo humano. Por otro lado, las aguas suelen superan los límites de aluminio y boro que determina la norma de riego NCh 1.333. Las muestras analizadas en febrero presentaron mayor contenido de elementos mayoritarios y minoritarios, probablemente por el arrastre de sedimentos que provocan las precipitaciones durante el invierno altiplánico.

7.3.4.6 Isotopía de las aguas

En la cuenca del río Lluta, nunca se ha desarrollado un estudio isotópico en la cuenca completa, sólo se habían tomado muestras de agua para el análisis isotópico en la subcuenca del río Colpitas por Navarrete (2012) y por AMEC (2014).

En el presente estudio se tomaron muestras distribuidas en toda la cuenca para el análisis isotópico en 4 campañas durante un año. En la Figura 7.112 se muestra la ubicación de los puntos de aguas superficiales y subterráneas que se analizaron en cada campaña de muestreo.

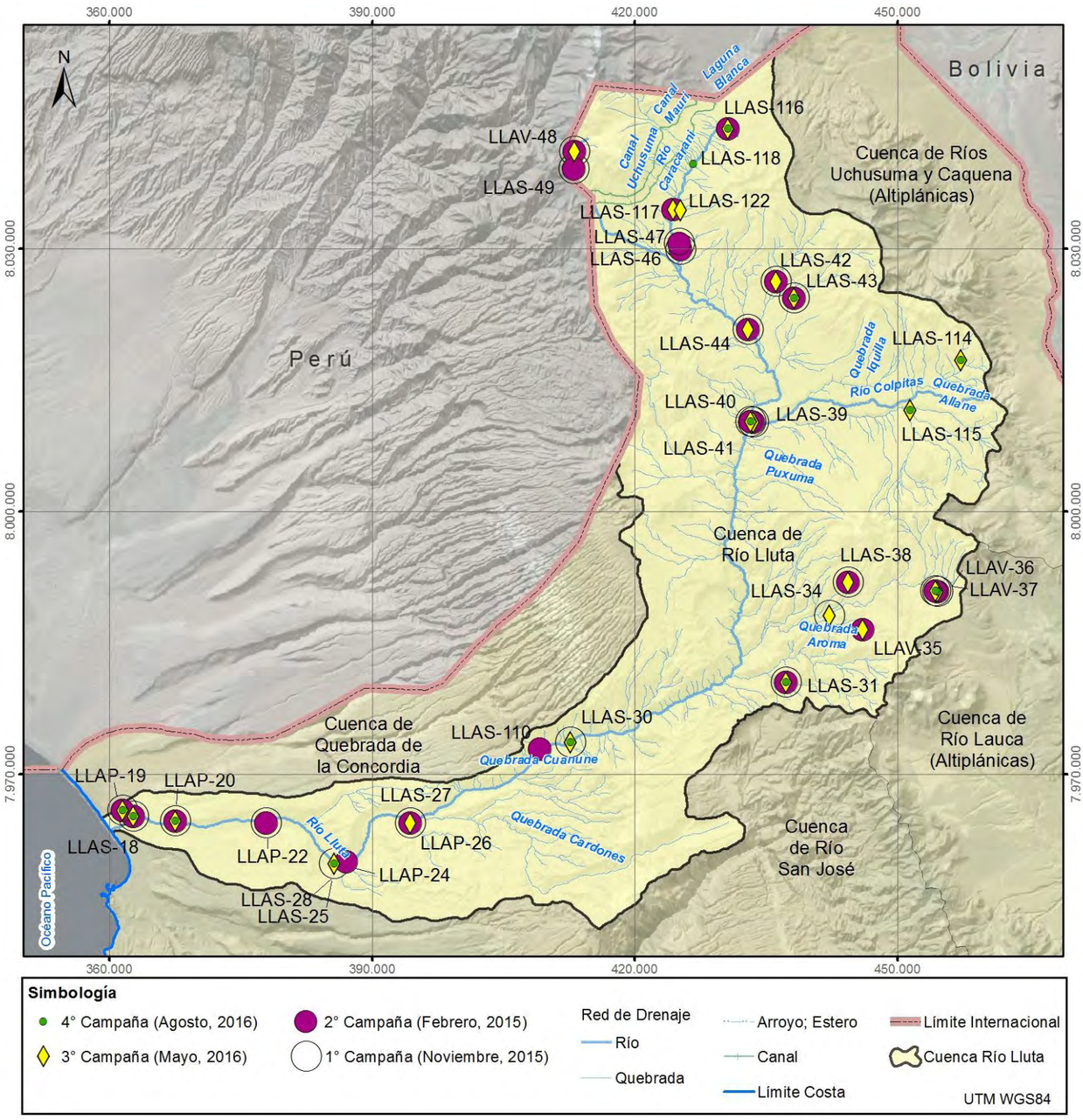


Figura 7.112 Ubicación de los puntos de aguas superficiales y subterráneas que se analizaron en cada campaña de muestreo isotópico en la cuenca del río Lluta. Fuente: elaboración propia.

A continuación se interpretó la composición isotópica de las aguas superficiales y subterráneas recogidas en las cuatro campañas mediante la relación entre $\delta^{18}O$ y δD. En la Tabla 7.62 se indican los valores máximos y mínimos de oxígeno y deuterio obtenidos en cada campaña de muestreo.

Tabla 7.62 Resumen de los valores máximos y mínimos de oxígeno y deuterio obtenidos en las cuatro campañas de muestreo en la cuenca del río Lluta. Fuente: elaboración propia.

		1°Campaña Noviembre 2015	2°Campaña Febrero 2016	3°Campaña Mayo 2016	4°Campaña Agosto 2016
$\delta^{18}O$‰ SMOW	Máximo	-8,95	-10,29	-10,13	-10,33
	Mínimo	-15,27	-14,80	-14,90	-16,11
δD‰ SMOW	Máximo	-70,40	-77,46	-77,67	-77,34
	Mínimo	-111,54	-111,45	-110,35	-116,55

En la Figura 7.113 se presenta la composición isotópica de las aguas superficiales y en la Figura 7.114 se muestran las aguas subterráneas analizadas en las diferentes campañas de muestreo, de color azul se muestran las aguas analizadas en noviembre de 2015, de color naranjo las muestras obtenidas en febrero, de color verde las aguas tomadas en mayo y de color rojo las muestras analizadas en agosto de 2016.

Las aguas superficiales reflejan un amplio rango de variación de los valores de deuterio y ^{18}O. En la Figura 7.113 se observa, de un modo general, que las aguas tomadas en la parte alta de la cuenca son aguas más livianas (ligeras) que las aguas muestreadas en cotas más bajas. Las muestras que se alinean o aproximan en la RMM son las aguas tomadas en las quebradas de los volcanes Caracarani (LLAS-116) y Chuquiananta (LLAS-42 y LLAS-43), el río Colpitas (LLAS-39) y una quebrada del volcán Taapacá (LLAS-38), indicando que son aguas meteóricas. En el resto de muestras se alinean en rectas con pendiente 5, indicando que han sufrido diferente grado de evaporación.

Las aguas superficiales del río Lluta muestreadas en febrero de 2016 en el sector del valle se ajustan a la RMM indicando que han recibido el aporte de aguas de precipitación que no han sufrido evaporación, esto es debido a que durante el muestreo se estaban produciendo precipitaciones correspondientes al invierno altiplánico en cotas más altas.

En la Figura 7.114 se muestra la composición isotópica de las aguas subterráneas analizadas en la cuenca. Las aguas de las vertientes ubicadas en el sector de Las Cuevas (LLAV-37 y LLAV-36) se alinean o aproximan en la RMM y corresponden a las aguas más livianas de la cuenca, indicando que su zona de recarga se ubica en cotas altas. En cambio, las aguas subterráneas tomadas en los pozos se alinean en rectas con pendiente 5, indicando una disminución del contenido de deuterio y ^{18}O producto de la evaporación.

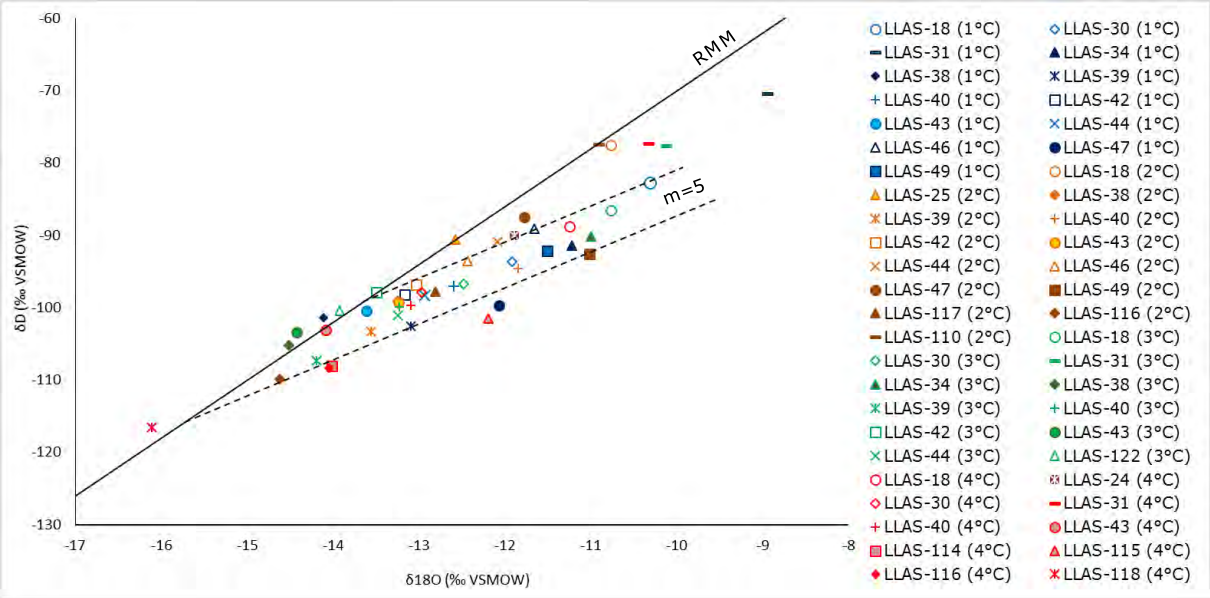


Figura 7.113 **Relación $\delta^{18}O/\delta D$ de las** aguas superficiales analizadas en la cuenca del río Lluta en las diferentes campañas. Fuente: elaboración propia.

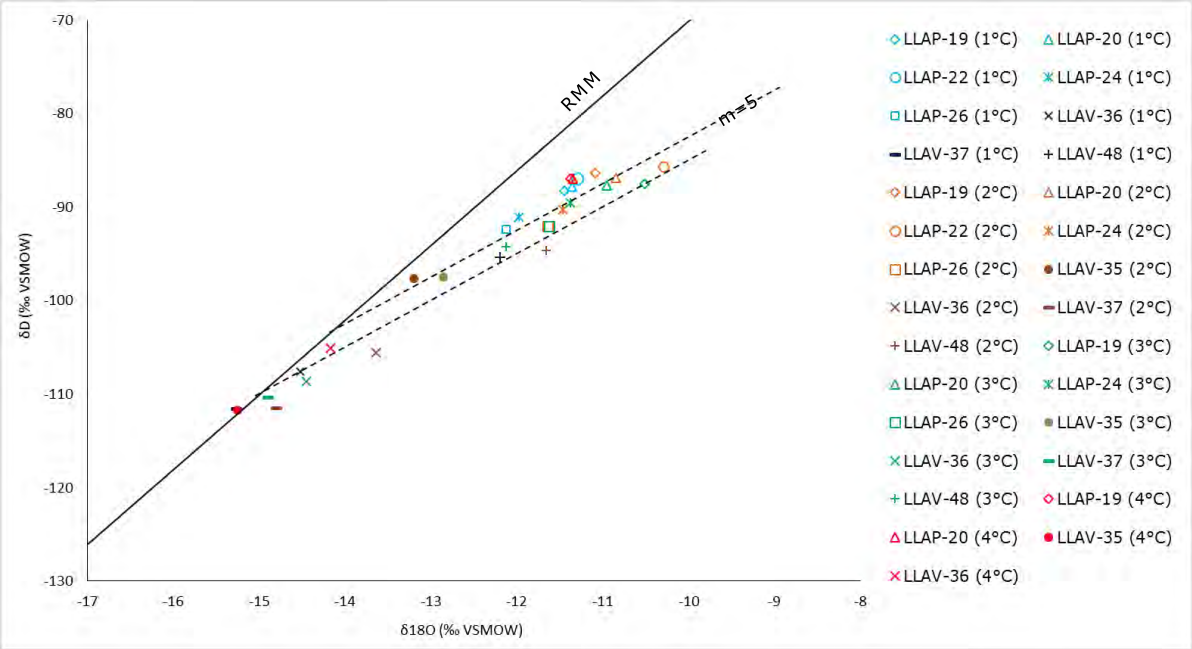


Figura 7.114 **Relación $\delta^{18}O/\delta D$ de las aguas** subterráneas analizadas en la cuenca del río Lluta en las diferentes campañas. Fuente: elaboración propia.

7.3.5 Modelo Conceptual

La cuenca del río Lluta comprende una superficie de 3.479 km^2 y limita al norte con la cuenca de la quebrada La Concordia y la frontera con Perú, al este con la cuenca del río Caquena, al sur con la cuenca del río San José y al oeste con el océano Pacífico. El río Lluta nace de la confluencia de los ríos Azufre y Caracarani en Humapalca.

Los principales usos del suelo en la cuenca del río Lluta son praderas matorrales (65%), áreas sin vegetación (30%) y terrenos agrícolas (5%), por lo tanto es válido considerar que una porción de la precipitación es interceptada por la vegetación, así mismo la evapotranspiración desde el suelo juega un papel importante como principales pérdidas naturales de la precipitación antes de llegar a la superficie.

Las mayores precipitaciones registradas en la cuenca se presentan en la parte alta y disminuyen con el gradiente altitudinal hacia la costa. La precipitación media anual en la cuenca, estimada a partir del método de las isoyetas es de 190,2 mm/año, siendo la cuenca del río Lluta una de las cuencas de la región de Arica y Parinacota que mayor precipitación recibe en el año.

El río Lluta se forma por la confluencia de los ríos Caracarani y Azufre en Humapalca, siendo el primero el más caudaloso, y cuyo caudal medio anual es de 350 l/s en río Caracarani en Humapalca. Posteriormente drena las quebradas Cascavillane, Teleschuño, Guancarane, Chuquiananta y Colpitas. Este último aporta un caudal medio anual importante de 520 l/s en río Colpitas en Alcérreca, y drena las quebradas de Iquilla y Allane. Aguas abajo de la confluencia del río Lluta con el río Colpitas, el río Lluta presenta un caudal medio anual de 1.970 l/s en Alcérreca. Aguas abajo drena las quebradas de Puxuma, Jurase, Aroma y Socoroma. La estación del río Lluta en Tocontasi controla la subcuenca del Lluta Alto, que es donde se produce casi el total del caudal de la cuenca que presenta un medio anual de 3.240 l/s. Y finalmente el río Lluta en la desembocadura presenta un caudal medio anual de 1.270 l/s en la estación río Lluta en Panamericana.

Las unidades hidrogeológicas de la subcuenca del río Lluta Alto se recargan de las aguas infiltradas de la precipitación que se almacenan en los Complejos Volcánico Caracarani, Chuquiananta, Churicagua y Copatanca y en el volcán Tacora. Estos acuíferos fracturados presentan sistemas de fracturas conectadas que pueden crear acuíferos colgados, cuyas aguas afloran en vertientes, creando bofedales, quebradas y ríos, y/o recargan los depósitos glaciales y a la Formación Visviri en las faldas de los conos volcánicos. Sin embargo, la unidad acuífera principal está compuesta por depósitos aluviales y fluviales del Holoceno, siendo el resto de unidades hidrogeológicas acuitardos o acuícludos. En el acuífero detrítico existente en el valle del río Lluta, JICA-DGA (1995) definió la existencia de una capa fina de toba confinante hasta Chacabuco, que divide los depósitos fluviales en la unidad superior de carácter libre y la inferior de carácter confinado. A partir de las pruebas de bombeo efectuadas en el acuífero detrítico del valle del río Lluta los antecedentes determinaron una transmisividad de 20 a 600 m^2/día, una conductividad hidráulica de 0,1 a 10 m/día y un coeficiente de almacenamiento de 1 a 8%.

En la subcuenca del río Lluta Alto, las líneas de flujo subterráneo circulan desde los complejos volcánicos que delimitan la cuenca hacia las cotas más bajas, cuya dirección principal de flujo es de norte a sur. En la cabecera de la cuenca se observan como las unidades con mayor importancia hidrogeológica alimentan a los cauces superficiales. Después de la confluencia del río Lluta con el río Colpitas, los recursos hídricos fluyen superficialmente por el río Lluta sobre unidades hidrogeológicas de baja conductividad

hidráulica con una dirección principal de norte a sur. Después de la confluencia del río Lluta con la quebrada Aroma, presenta una dirección de este a oeste hasta la desembocadura al océano Pacífico.

El río Lluta recibe contaminantes naturales provenientes de dos fuentes, por un lado el río Azufre aporta aguas ácidas y ricas en arsénico, boro, azufre y metales como hierro, manganeso y zinc y, aguas abajo, el río Colpitas suministra aguas alcalinas y con alto contenido de boro. La parte media y baja está influenciada por los efectos de los suelos salinos dados por la alta concentración de nitrato de sodio y otros compuestos en la cuenca, además el alto contenido de nitratos en las aguas subterráneas del valle del río Lluta se debe a la intensificación de las prácticas agrícolas y ganaderas y la sobreexplotación que sufre el acuífero, el que empeora la calidad de las aguas subterráneas.

Por otro lado, las aguas superan los niveles de varios elementos que indica la norma NCh 409, por lo que ninguna muestra analizada es apta para el consumo humano. Por otro lado, las aguas suelen superar los límites de aluminio y boro que determina la norma de riego NCh 1.333.

En la Figura 7.115 se muestra el esquema del modelo conceptual de la cuenca del río Lluta, cuyas entradas principales estarían dadas por las precipitaciones y recargas al acuífero. En ésta se observa que la recarga principal se produce por la infiltración de las precipitaciones en la subcuenca del Lluta Alto, mientras que en la subcuenca del río Lluta Bajo el acuífero se recarga por el aporte del río Lluta al acuífero, principalmente por las crecidas del cauce durante el invierno altiplánico, y por la infiltración de las aguas de riego en los campos de cultivo. La descarga de mayor caudal se produce por las derivaciones de los canales de riego de las Comunidades de Agua para el riego de cultivos, por la explotación de norias y pozos de extracción de agua para riego y ganado y para el abastecimiento de agua potable rural y de la ciudad de Arica, y por la evapotranspiración de las zonas de cultivos y pastizales. Además, existe un flujo subterráneo hacia el océano Pacífico y un aporte lateral subterráneo desde el acuífero del río Lluta hacia el acuífero de La Concordia. En menor magnitud, existen vertientes de aguas frías e hidrotermales, generalmente en la subcuenca del río Lluta Alto.

Las principales demandas de aguas superficiales de la subcuenca del Lluta Alto corresponden a los consumos agrícolas y pecuarios, y en la subcuenca Lluta Bajo

también a consumos agrícolas y pecuarios. Sin embargo, en el Lluta Bajo se extraen aguas subterráneas para consumos agrícolas, pecuarios, pero principalmente para la producción minera y de agua potable.

Figura 7.115 Esquema del modelo conceptual hidrogeológico de la cuenca del río Lluta. Fuente: modificado de la capa uso del suelo tomada del portal web del SINIA http://ide.mma.gob.cl/.

7.4 Cuenca del Río San José

La cuenca del río San José o quebrada de Azapa se desarrolla inmediatamente al sur de la cuenca del río Lluta y drena una superficie de 3.104 km^2. Dado que carece de cabecera en la cordillera alta, se puede considerar como cuenca preandina. Nace de la confluencia de dos tributarios principales, los ríos Seco y Tignamar, éste último es el mayor aportante, sin embargo los recursos propios son escasos. En cercanía de la ciudad de Arica, el San José recibe como afluente a la quebrada de Acha o La Higuera.

Los recursos hídricos superficiales del valle de Azapa provienen principalmente de la cuenca del río Lauca, siendo transportados hacia las zonas de riego a través del canal Lauca que entró en funcionamiento en abril de 1962. De acuerdo al documento "Plan de acción estratégico para el desarrollo hídrico de la región de Arica y Parinacota" liderado por la DGA (2010), el agua desviada del río Lauca es en promedio histórico aproximadamente de 600 l/s.

Por otra parte, en el estudio "Modelo de simulación hidrológico operacional de la cuenca del río San José" desarrollado por Arrau (1997), se menciona que el canal Lauca tiene un recorrido de canal revestido de aprox. 28 km y un túnel de 4500 m. El canal conduce las aguas entregadas por la laguna Cotacotani y las ciénagas de Parinacota hasta la central hidroeléctrica Chapiquiña, aguas abajo de la cual se descargan, manteniendo un caudal constante a través del estanque de compensación al cauce natural de la quebrada Cosapilla, para alcanzar el rio Seco y posteriormente al río San José. Poco aguas abajo se juntan con eventuales excedentes de las cuencas prealtiplánicas, quebradas Tignamar y Zapahuira o río Seco, para luego proseguir hasta la zona de la bocatoma del canal de Azapa donde es captado para el regadío del valle.

En la parte superior de la cuenca, el río San José es muy angosto y a partir de Ausipar hasta su desembocadura al mar, la caja de río se ensancha gradualmente hasta alcanzar un ancho superior a los 2 km. El escurrimiento del río San José tiene carácter permanente desde la parte Alta de la cuenca hasta el tramo comprendido entre las cabeceras Livilcar y Umagata, luego este escurrimiento se vuelve de carácter efímero hasta su desembocadura al mar.

En la Figura 7.116 se presenta la ubicación de la cuenca del río San José y su red de drenaje.

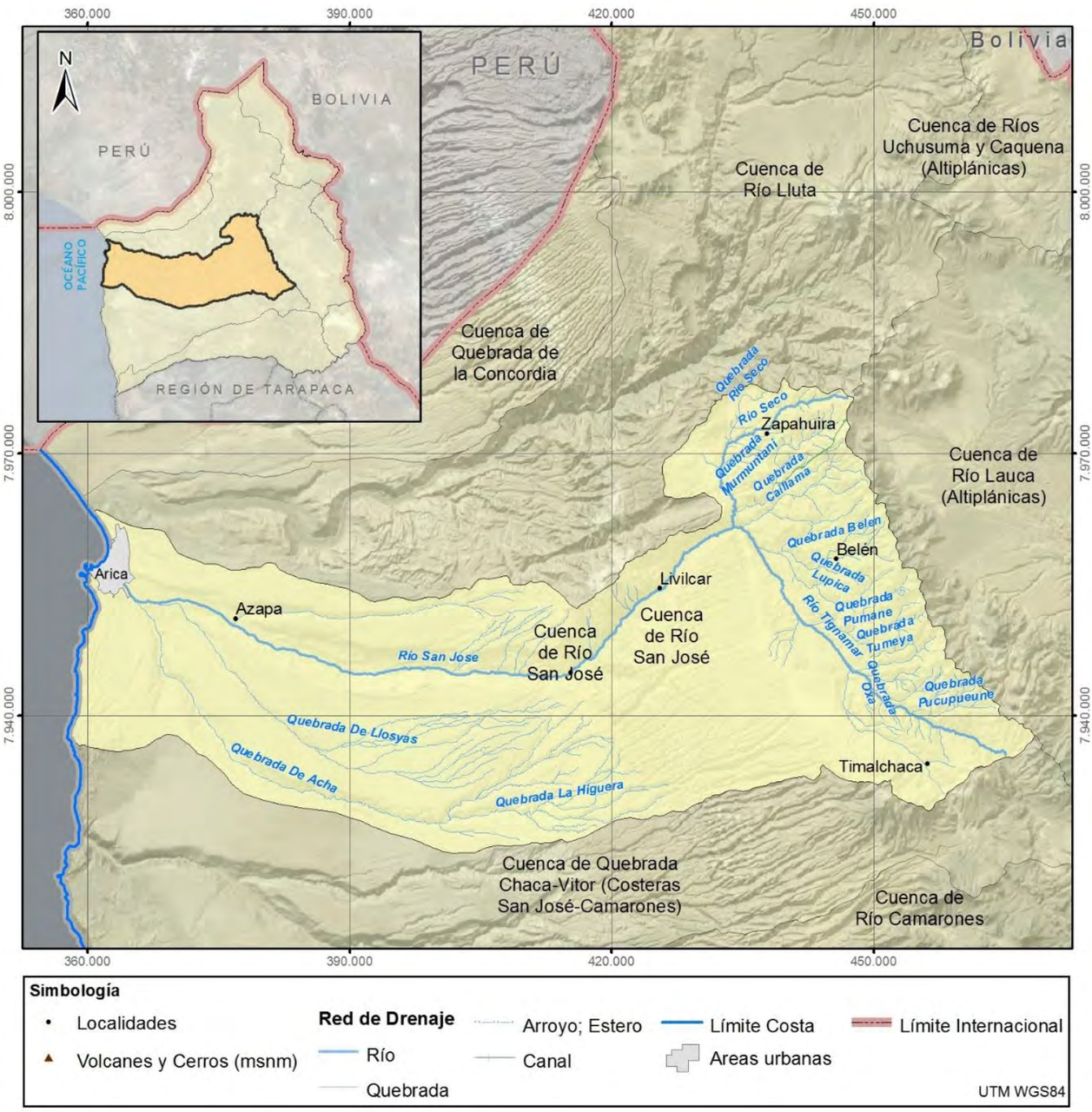


Figura 7.116 Ubicación de la cuenca del río San José. Fuente: elaboración propia.

7.4.1 Caracterización Hidrológica

7.4.1.1 Definición y caracterización de la cuenca del río San José

DELIMITACIÓN DE LA CUENCA

En la Figura 7.116 se muestra la delimitación y red de drenaje de la cuenca del río San José. El criterio utilizado para la delimitación se explicó en el apartado "Definición y Caracterización de las Cuencas de la Región" en el capítulo de "Análisis Regional". De manera resumida el criterio es básicamente topográfico.

CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS DE LA CUENCA

La morfología de la cuenca del río San José es un referente para establecer la dinámica esperada de la escorrentía superficial y se caracteriza por el análisis de tres parámetros, los relativos a la forma, al relieve y a la red de drenaje. Éstos se calcularon con el uso de SIG, además de utilizar expresiones matemáticas para este fin. La metodología se muestra en detalle en el Anexo VI.

En relación a la forma, la cuenca tiene un coeficiente de compacidad (K_G) de 1,70, por tanto su forma es oblonga. La densidad del drenaje de la cuenca del río San José definida como la longitud total de los cauces sobre el área de la cuenca, es en este caso de 0,19 km/km^2 que corresponde a una densidad de drenaje pobre, normalmente asociada a cuencas con materiales del suelo resistentes a la erosión, muy permeables y de baja pendiente.

Es necesario destacar que este parámetro representa la densidad de drenaje promedio en la cuenca, lo cual no excluye que existan cauces o quebradas al interior de la cuenca que dispongan de un drenaje muy desarrollado y por tanto, ocurra una respuesta rápida de transformación lluvia-escorrentía.

Para construir la curva hipsométrica de la cuenca fue necesario reclasificar las bandas del DEM y calcular las áreas acumuladas intermedias. Según la curva hipsométrica (Figura 7.117), la cuenca tiene un topografía variable iniciando desde la cota mínima de 0 msnm hasta la máxima de 5.261 msnm. Sin embargo, el 50% de la cuenca tiene una altura sobre los 2.200 msnm.

De acuerdo a la metodología presentada en el Anexo VI, esta curva hipsométrica se clasifica de tipo B y corresponde a una cuenca en equilibrio que está en la fase de madurez.

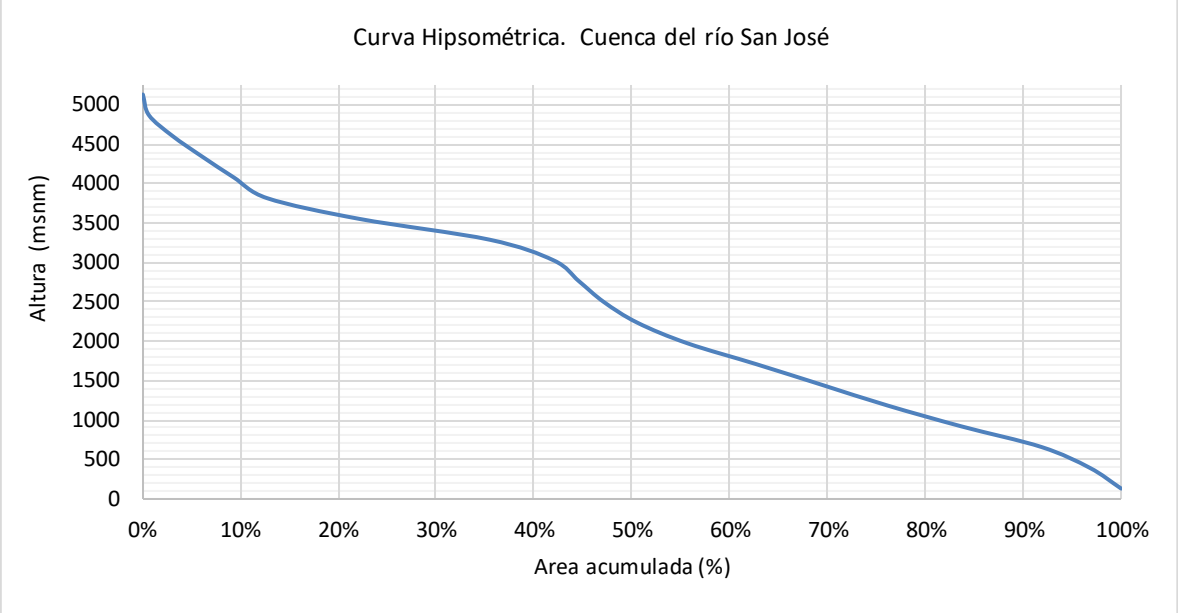


Figura 7.117 Curva hipsométrica de la cuenca del río San José. Fuente: elaboración propia.

7.4.1.2 Caracterización de la red de drenaje

El diagrama Unifilar del río San José se indica en la Figura 7.118. En este se incluye los canales, los ríos y las quebradas aportantes de mayor interés. Allí se referencia el caudal medio anual medido en las estaciones fluviométricas administradas por la DGA. Entre las cuatro estaciones presentadas se encuentra la estación Tignamar en Tignamar, la cual se encuentra suspendida a la fecha. Sin embargo, se ha optado por entregar este valor a modo referencial dado que tiene un mejor registro de datos que la estación Tignamar en Angostura, ubicada hacia aguas abajo, luego de la Quebrada Oxa, la cual tiene registro desde el año 2006, pero con sólo dos años con registro completo.

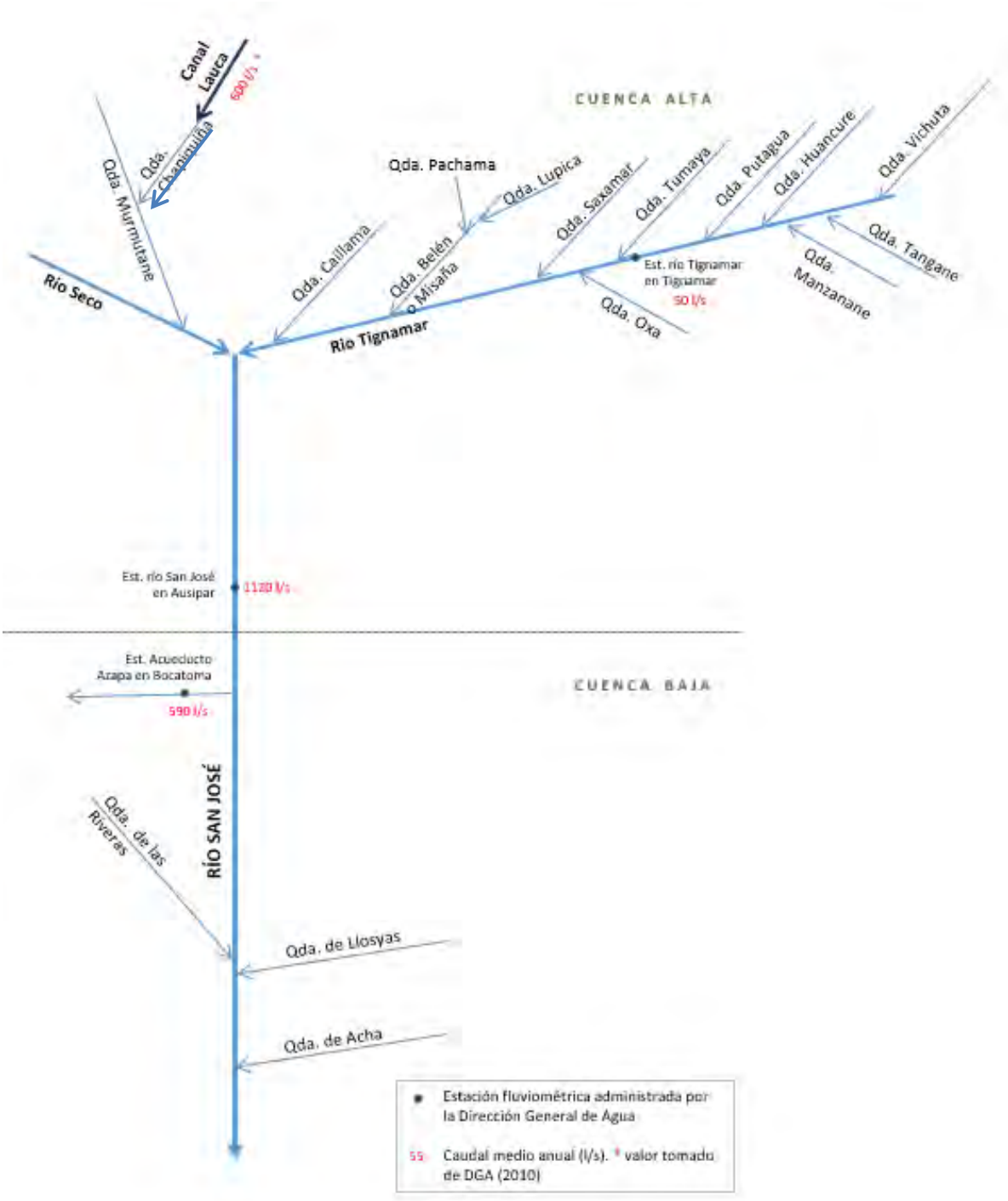


Figura 7.118 Diagrama unifilar del río San José. Fuente: elaboración propia.

7.4.1.3 Hidrometeorología

La cuenca del río San José cuenta con una red de monitoreo administrada por la DGA de 7 estaciones meteorológicas activas, dos de ellas, Azapa y Aeródromo El Buitre cuentan con registros históricos diarios y mensuales de las variables climatológicas: temperatura, humedad relativa y evaporación. Las coordenadas y periodos de información disponible de las estaciones se presentan en la Tabla 7.63 y su ubicación se muestra en la Figura 7.119.

Tabla 7.63 Coordenadas y periodo de información de las estaciones meteorológicas en la cuenca. Fuente: elaboración propia.

Estación Meteorológica DGA	Código BNA	UTM Este	UTM Norte	Altitud	Periodo	Años	Estado
Central Chapiquiña	01300006-9	442.104	7.968.545	3.350	1962-2014	53	V
Belén	01300007-7	445.449	7.958.074	3.240	1937-2014	78	V
Tignamar	01300008-5	447.889	7.945.449	3.230	1967-2014	48	V
Río Tignamar En Angostura	01300009-3	440.304	7.952.926	3.010	2006-2014	9	V
Arica Oficina	01310018-7	362.304	7.956.488	20	1974-2014	41	V
Azapa	01310019-5	375.384	7.952.366	365	1966-2014	49	V
Aeródromo El Buitre	01310022-5	364.443	7.952.691	110	1985-2014	30	V

V: Vigente.

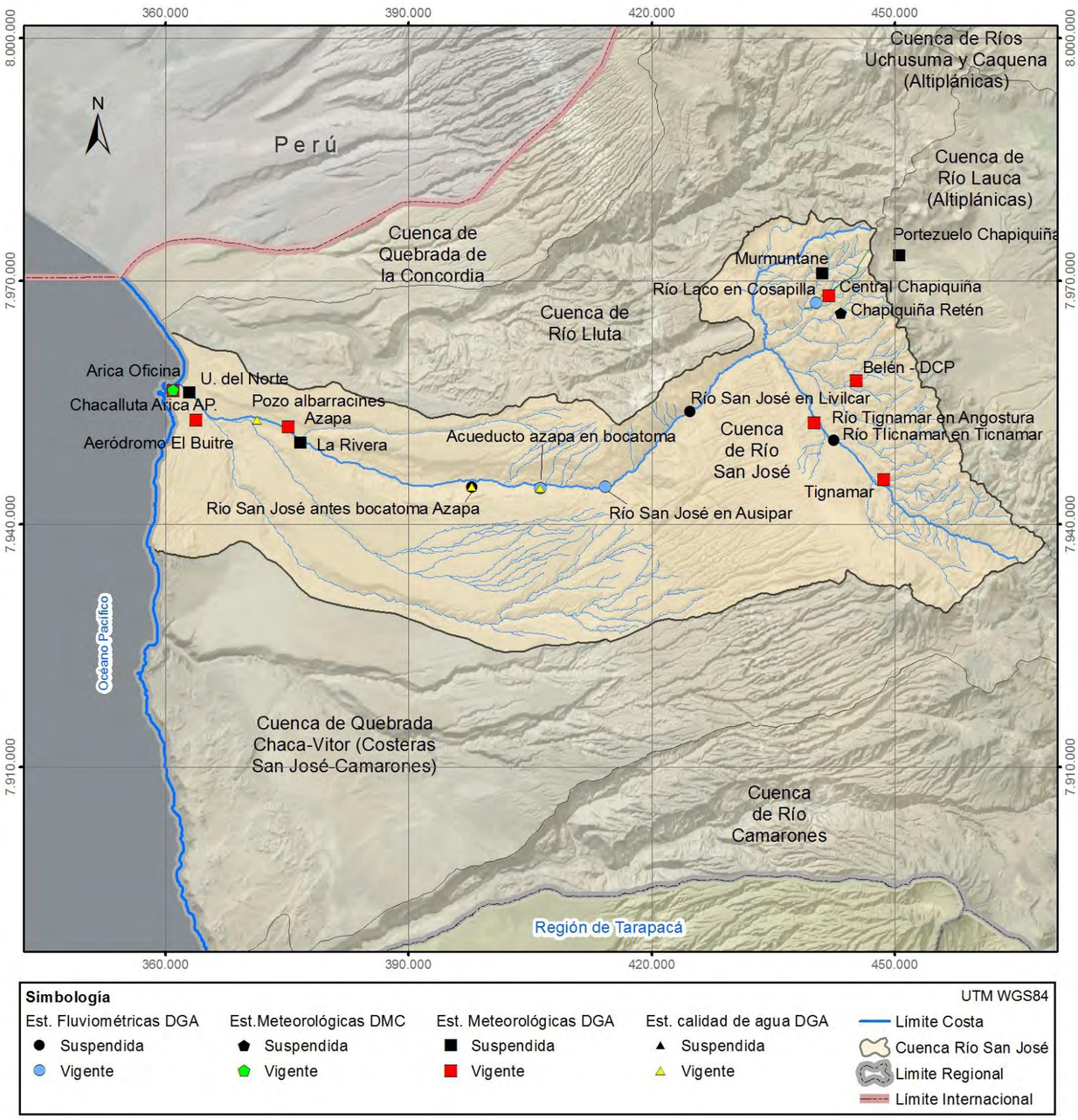


Figura 7.119 Ubicación estaciones de calidad, fluviométricas y meteorológicas en la cuenca del río San José. Fuente: elaboración propia.

PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL Y MEDIA MENSUAL

Para el análisis de la precipitación media anual y media mensual se tomaron los registros de 30 años (periodo 1985 al 2014) de las estaciones pluviométricas existentes, que permiten analizar las variaciones de la precipitación. En la Figura 7.120 se presentan los registros de precipitación media anual de dos estaciones, ubicadas en la parte alta de la cuenca, Central Chapiquiña [3.350 msnm] y Belén DCP [3.240 msnm]. Allí se observa los años húmedos, secos y promedio que se han presentado en la cuenca. Los años más húmedos en el periodo analizado, han sido 1997, 1999, 2001 y 2012. Por el contrario, el más año más seco en los últimos 30 años, fue el 2010.

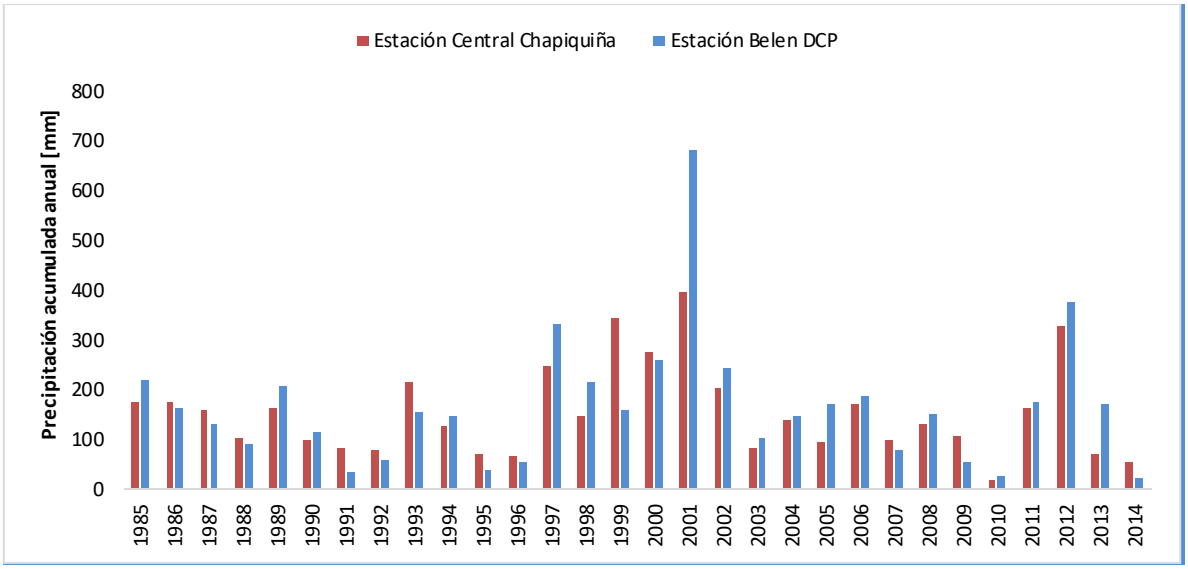


Figura 7.120 Precipitación media anual registrada en estaciones de la cuenca del río San José. Fuente: elaboración propia.

A nivel regional se trazaron las isoyetas de precipitación media anual, construidas a partir de los datos registrados en 28 estaciones meteorológicas, 24 de ellas ubicadas en la XV Región de Arica y Parinacota y las 4 restantes en la I Región de Tarapacá. La información utilizada de las estaciones fue previamente completada y analizada, como se explicó en el subcapítulo "Análisis de las variables espacial y temporal" del capítulo "Análisis Regional".

De esta manera, haciendo un zoom en la cuenca del río San José, las isoyetas de precipitación se presentan en la Figura 7.121. Se observa que la precipitación media anual en la cuenca del río San José aumenta gradualmente desde 0 mm/año en el

sector bajo (ciudad de Azapa), a partir de los 1.500 msnm se registran 10 mm/año y aumenta en relación a la altitud. En el sector alto (3.500 msnm) la precipitación media anual es cercana a los 170 mm/año. En la Tabla 7.64 se especifica la precipitación ponderada de acuerdo al área de influencia entre isoyetas, obteniendo que la precipitación media anual en la cuenca es del orden de los 83,7 mm.

Tabla 7.64 Ponderación de la precipitación según área de influencia entre isoyetas en la cuenca del río San José. Fuente: elaboración propia.

Isoyetas de Precipitación (mm)		Área entre isoyetas (km^2)	Precipitación media multianual 1985-2014 (mm)
0		59,8	0
0	10	776,9	3.884
10	20	160,1	2.402
20	50	209,4	7.328
50	100	129,8	9.731
100	150	612,3	76.535
150	200	380,2	66.537
> 200		244,3	48.856
			83,7 Precipitación media anual en la cuenca

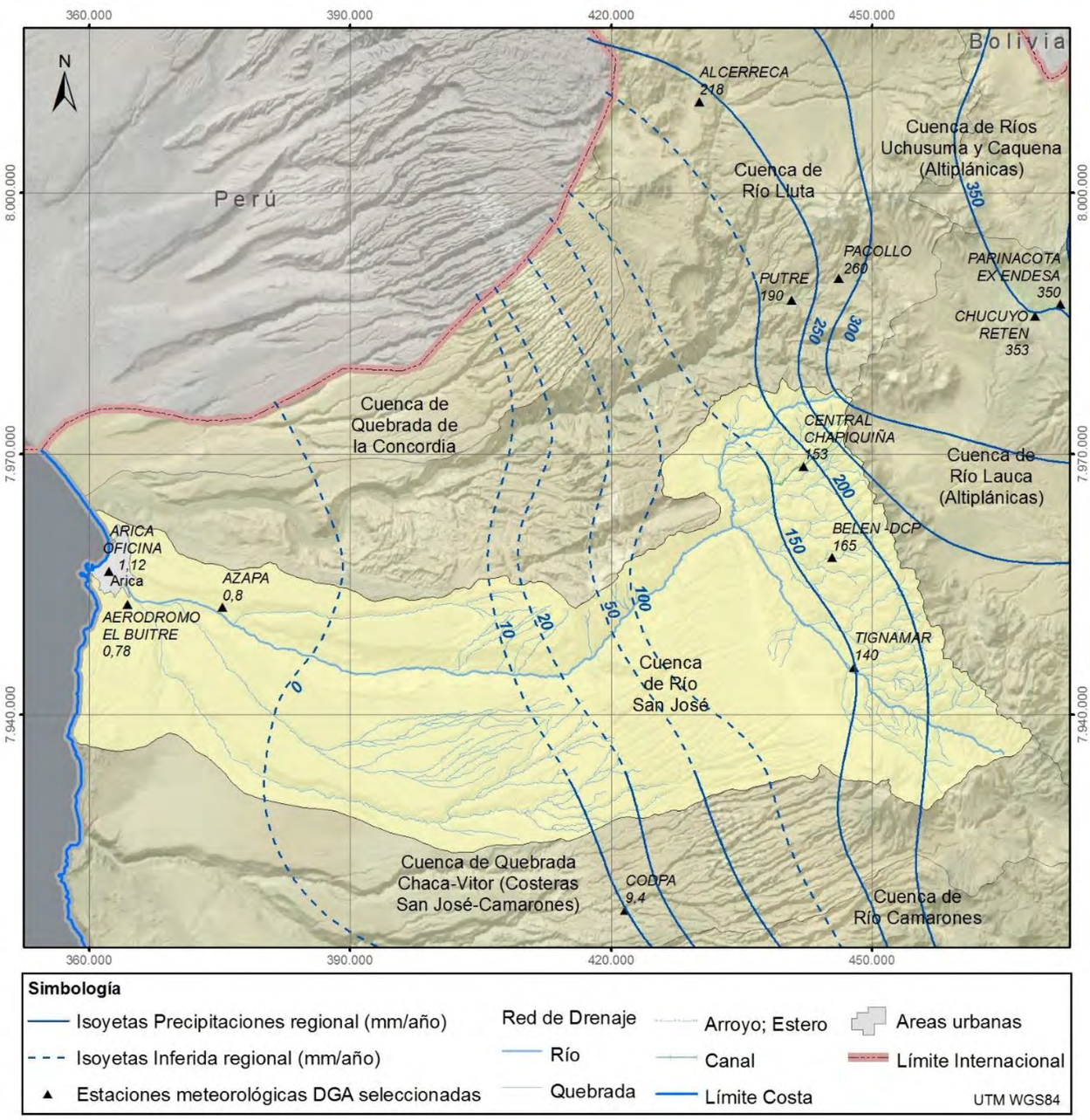


Figura 7.121 Isoyetas de precipitación media anual regional en la cuenca del río San José. Fuente: elaboración propia.

En la Tabla 7.65 se agrupa la precipitación media anual de la cuenca del río San José en dos periodos (verano - invierno), incluyendo estaciones de la parte baja y media-alta. Considerando las estaciones de la parte media-alta, se distinguen claramente un periodo lluvioso de diciembre a marzo en donde se presenta mayor al 90% de la precipitación anual y un periodo seco de abril a noviembre donde ocurren precipitaciones menores. Sin embargo, en la parte baja de la cuenca (celdas sombreadas en la Tabla 7.65) no se diferencian estos periodos, dado las bajas o nulas lluvias registradas en las estaciones.

La precipitación anual promedio en la ciudad de Arica es de 0,4 mm/año, destacándose que la temperatura media anual oscila entre los 16°C y los 22°C. En Arica llueve el 42% del año, básicamente en los meses de invierno (Julio-Agosto) y meses de verano (Enero-Marzo) con precipitaciones en general suaves y de duración entre 3 a 5 horas.

Tabla 7.65 Precipitación media anual en la cuenca del río San José. Fuente: elaboración propia.

Estación pluviométrica DGA	PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL PERIODO 1985-2014				
	DIC-MAR		ABR-NOV		TOTAL
	Pp [mm]	Pp [%]	Pp [mm]	Pp [%]	Pp [mm]
Central Chapiquiña	146	96%	7	4%	153
Belén -Dcp	157	95%	8	5%	165
Tignamar	132	94%	8	6%	140
Azapa *	0,4	51%	0,4	49%	0,8
Aeródromo El Buitre *	0,5	66%	0,3	34%	0,8
Arica Oficina *	0,7	58%	0,5	42%	1,1

* Estaciones ubicadas en la parte baja de la cuenca.

La magnitud de la precipitación media mensual en la cuenca se presenta en la Tabla 7.66 y de manera gráfica en la Figura 7.122 se observa la variación temporal. Las lluvias se concentran en los meses de enero y febrero, del orden de los 43 mm a 57 mm. Los meses más secos son de abril a noviembre, registrándose precipitaciones del orden de los 0 mm a 2 mm.

Tabla 7.66 Precipitación media mensual en la cuenca del río San José. Fuente: elaboración propia.

Estación pluviométrica DGA	Altitud [msnm]	Precipitación media mensual [mm] periodo 1985-2014												
		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Pp ACUM
Central Chapiquiña	3.350	52	53	25	1,6	0,1	0,6	1,2	1,8	0,6	0,2	0,5	15,5	153
Belén -Dcp	3.240	57	55	30	0,9	0,6	0,7	1,4	2,9	0,4	0,5	0,8	15,7	165
Tignamar	3.230	52	43	21	1,4	0,7	0,5	1,3	1,8	1,5	0,2	0,5	16,1	140
Azapa	365	0,2	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8
Aeródromo El Buitre	110	0,1	0,1	0,2	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8
Arica Oficina	20	0,3	0,2	0,2	0,0	0,0	0,0	0,3	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	1,1

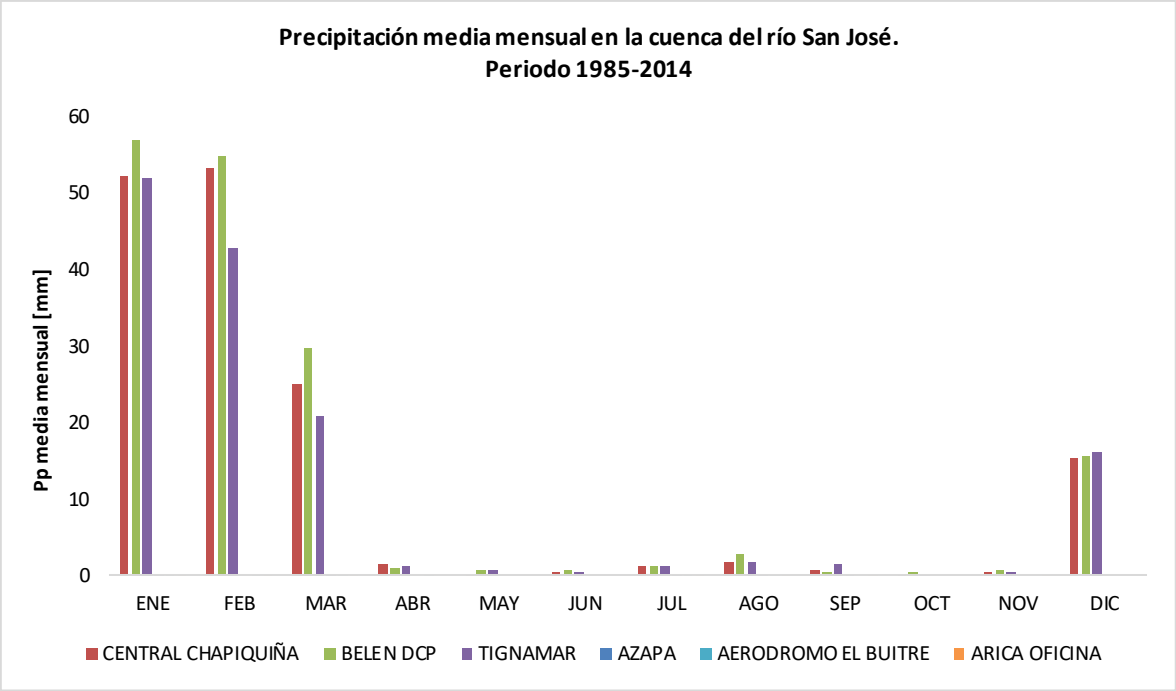


Figura 7.122 Variación temporal mensual de la precipitación media en la cuenca del río San José. Fuente: elaboración propia.

EVAPORACIÓN MEDIA ANUAL Y MEDIA MENSUAL

En la cuenca del valle de Azapa, el valor promedio de evaporación potencial registrado en la estación Azapa [365 msnm], anualmente alcanza los 2572 mm, equivalente a una tasa de evaporación de 6,9 mm/día. En la Figura 7.123 se presenta la evaporación media mensual. Se observa una variación entre 153 mm en el mes de julio hasta 293 mm en el mes de enero.

En el subcapítulo "Evapotranspiración" del componente "Análisis Regional", se presentan todas las estaciones meteorológicas de la XV Región que miden evaporación potencial del tanque tipo A. Se realiza un análisis más detallado a nivel regional.

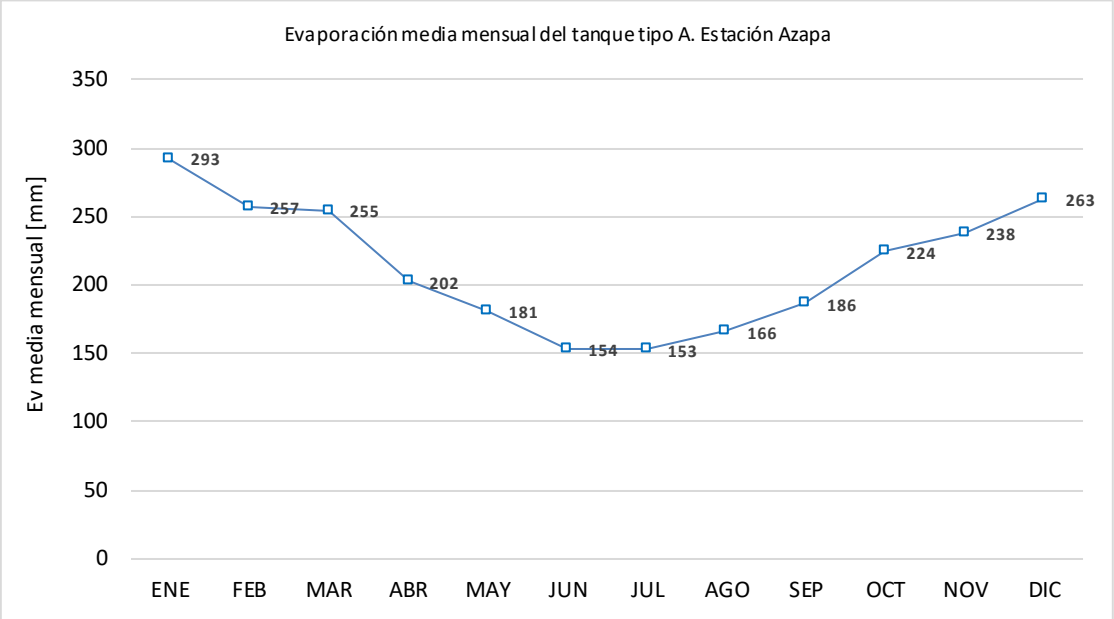


Figura 7.123 Evaporación media mensual potencial en Estación Azapa [365 msnm]. Fuente: elaboración propia.

EVAPOTRANSPIRACIÓN MEDIA ANUAL Y MEDIA MENSUAL

Para el análisis de la evapotranspiración en la cuenca del río San José se analizaron los valores obtenidos en las estaciones presentes en la cuenca, calculados utilizando la fórmula de Turc. Estos valores se incluyen en la Tabla 7.67. De acuerdo a dichos resultados, la evapotranspiración de la cuenca oscila entre los 0,8 y los 155,0 [mm/año].

Tabla 7.67 Estaciones consideradas y valor estimado de la evapotranspiración en la cuenca. Fuente: elaboración propia.

Est. Meteorológica DGA	Altitud [msnm]	Pp	T	Precipitación media anual [mm/año]	Temperatura media anual [°C]	ETP [mm/año] estimación método Turc
Central Chapiquiña	3.350	x		152,6	9,5*	155,0
Belén-DCP	3.240	x		165,4	10,1*	167,5
Tignamar	3.230	x		139,8	10,2*	143,3
Azapa	365	x	x	0,8	18,8	0,9
Aeródromo El Buitre	110	x	x	0,8	19,5	0,8
Arica Oficina	20	x		1,1	19,6*	1,2

* Valor estimado a partir de la relación obtenida de la temperatura y la altitud en la Región.

Adicionalmente, a partir de la información disponible en el producto satelital MODIS 16, y siguiendo la metodología detallada en el Anexo VI, se estimó la evapotranspiración de la cuenca. MODIS 16 incluye información de evapotranspiración y flujo de calor latente real, estimado a partir de información satelital remota y utilizando como método de cálculo, para el caso de la evapotranspiración, la ecuación de Penman-Monteith. El valor medio anual estimado para la cuenca, considerando datos entre 2000 y 2014 es de 99,8 [mm/año].

7.4.1.4 Fluviometría

La hidrología del río San José depende principalmente de las lluvias estivales altiplánicas, siendo ésta la principal causa en los aumentos de caudal durante los meses de verano. Entre los meses de diciembre y marzo, el caudal es suficiente y sobrepasa el Valle desembocando en el Océano Pacífico.

La cuenca del río San José cuenta con una red de monitoreo de 6 estaciones fluviométricas administradas por la DGA. Las coordenadas y periodos de información disponible de las estaciones se presentan en la Tabla 7.68. Sobre el cauce del río San José sólo una estación está activa. La ubicación de las estaciones de presenta en la Figura 7.119

Tabla 7.68 Coordenadas y periodo de información de las estaciones fluviométricas en la cuenca del río San José. Fuente: elaboración propia.

Estación Fluviométrica DGA	Código BNA	DATUM WGS84 H19S		Altitud [msnm]	Periodo	Años	Estado
		UTM Este	UTM Norte				
Rio Laco en Cosapilla	01300002-6	544.009	7.965.416	3.000	1991-2014	24	V
Rio Tignamar en Tignamar	01300001-8	442.656	7.950.813	3.800	1992-2005	9	S
Rio Tignamar en Angostura	01300009-3	440.304	7.952.926	3.010	2006-2014	7	V
Rio San José en Ausipar	01310002-0	414.389	7.944.959	1.300	1969-2014	46	V
Acueducto Azapa en Bocatoma	01310004-7	406.447	7.944.798	960	1970-2014	45	V
Rio San José Antes Bocatoma Azapa	01310003-9	398.004	7.945.001	960	1967-1989	23	S

V: Vigente, S: Suspendida.

CAUDAL MEDIO ANUAL Y MEDIO MENSUAL

La escorrentía superficial media anual registrada en la cuenca corresponde, en promedio, a 1,12 m^3/s en el sector medio del valle de Azapa a la altura de la localidad de Achuelo. Por otro lado, en uno de los afluentes de la parte alta, el río Laco (3.000 msnm) se registra un caudal medio anual de 0,58 m^3/s.

El río Tignamar ubicado sobre la precordillera, es uno de los principales aportantes al valle del río San José. En este desembocan excedentes de quebradas menores que son aprovechadas por regantes de las poblaciones de Belén, Pachama, Chapiquiña, entre otras. Sin embargo, se cuenta con muy poco registro sobre el cauce que permita cuantificar los recursos hídricos en la precordillera de la cuenca.

Tabla 7.69 Caudal medio anual para el año hidrológico en la cuenca del río San José. Fuente: elaboración propia.

Estación Fluviométrica	Altitud [msnm]	Periodo		CAUDAL MEDIO ANUAL [m^3/s]			
		1985-2014	otro [años]	Min	Max	Prom	Desv est
Rio Laco en Cosapilla	3.000		19	0,47	0,73	0,58	0,08
Rio Tignamar en Tignamar	3.800		8	0,01	0,11	0,05	0,03
Rio San José en Ausipar	1.300		22	0,45	5,23	1,12	0,96
Acueducto Azapa en Bocatoma	960	x		0,36	0,79	0,59	0,12
Rio San José antes bocatoma Azapa	960		30 *	0,33	2,99	1,10	0,72

* Registro histórico 1967-1993 tomado de Arrau (1997)

En referencia a los antecedentes de la cuenca, el estudio de JICA (1995) determina los caudales promedio anuales en el valle de Azapa, los cuales se mencionan a continuación:

- Caudal desviado del Lauca : 796 l/s
- Caudal en Ausipar y Antes de Bocatoma : 1101 l/s
- Caudal natural : 305 l/s

Comparativamente se observa que en la estación Ausipar, el caudal promedio anual del río San José se mantiene.

De acuerdo al análisis de la variación temporal a nivel mensual de los escurrimientos (Tabla 7.70), durante los meses de enero, febrero y marzo se registran los caudales medios más altos del año hidrológico, presentándose caudales sobre el río San José en el mes de febrero del orden de los 2,25 m^3/s en la estación Ausipar. Cabe mencionar que esta estación registra tanto el caudal natural que fluye por el río San José como el caudal del transvase del canal Lauca.

En la Figura 7.124 se observa con mayor claridad la variación de los caudales medios mensuales y su respuesta a la precipitación media mensual.

Tabla 7.70 Caudal medio mensual en la cuenca del río San José. Fuente: elaboración propia.

Estación Fluviométrica	CAUDAL MEDIO MENSUAL [m^3/s]												
	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	PROM
Rio Laco en Cosapilla	0,54	0,58	0,62	0,68	0,68	0,61	0,55	0,55	0,55	0,53	0,52	0,53	0,58
Rio Tignamar en Tignamar	0,04	0,03	0,03	0,07	0,07	0,06	0,05	0,05	0,05	0,10	0,07	0,05	0,05
Rio San José en Ausipar	0,77	0,77	0,78	1,10	2,25	2,08	1,00	0,98	1,15	0,95	0,88	0,79	1,12
Acueducto Azapa en Bocatoma	0,58	0,61	0,59	0,56	0,48	0,56	0,60	0,66	0,64	0,63	0,61	0,59	0,59

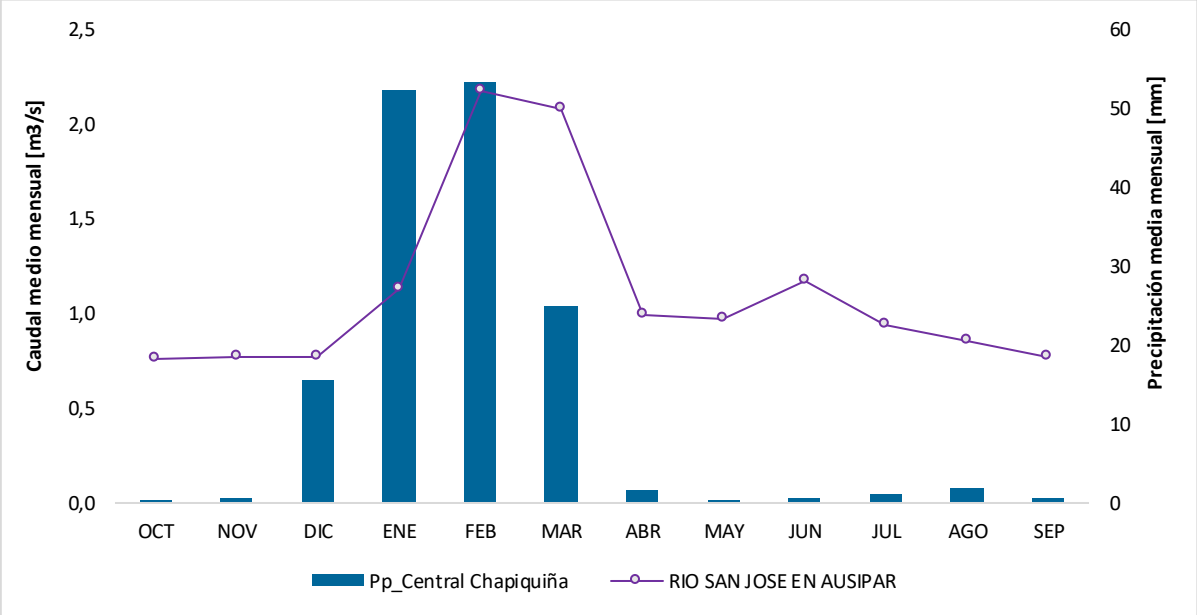


Figura 7.124 Caudal medio mensual en el río San José y su relación con la precipitación media. Fuente: elaboración propia.

ANÁLISIS DE FRECUENCIA DE LOS CAUDALES

Mediante el análisis de frecuencia de las series de caudales mensuales, se determinó si los años secos y los años lluviosos mantienen el mismo comportamiento que el año hidrológico medio. En el Anexo VI se detalla la metodología. Para ello se graficaron curvas de variación estacional definidas para distintas probabilidades de excedencia.

En la Tabla 7.71 y Figura 7.125, se presentan los caudales mensuales para las probabilidades de excedencia del 15% (año muy húmedo), 85% (año muy seco) y caudal medio. Se seleccionó una estación fluviométrica ubicada sobre el río San José y dos estaciones de afluentes de importancia en la cuenca. Allí se observa la distribución típica de los valores estadísticos representativos de la disponibilidad del recurso en puntos significativos de la cuenca del río San José.

Tabla 7.71 Caudales mensuales asociados a probabilidad de excedencia. Fuente: elaboración propia.

Estación: RIO SAN JOSÉ EN AUSIPAR													
Pexc (%)	T (años)	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep
15	6,7	1,00	1,00	1,00	1,50	2,40	2,70	1,30	1,20	1,70	1,20	1,10	1,10
85	1,2	0,50	0,50	0,50	0,60	0,60	0,60	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,60
Promedio		0,77	0,77	0,78	1,10	2,25	2,08	1,00	0,98	1,15	0,95	0,88	0,79
Estación: RIO LACO EN COSAPILLA													
Pexc (%)	T (años)	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep
15	6,7	0,60	0,70	0,70	0,80	0,80	0,80	0,70	0,70	0,70	0,60	0,60	0,60
85	1,2	0,40	0,40	0,50	0,60	0,60	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,30	0,40
Promedio		0,54	0,58	0,62	0,68	0,68	0,61	0,55	0,55	0,55	0,53	0,52	0,53
Estación: RIO TIGNAMAR EN TIGNAMAR													
Pexc (%)	T (años)	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep
20	5,0	0,07	0,05	0,05	0,09	0,14	0,1	0,05	0,05	0,05	0,23	0,15	0,08
80	1,3	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,04	0,05	0,04	0,01	0,01	0,01
Promedio		0,04	0,03	0,03	0,10	0,07	0,08	0,05	0,05	0,06	0,12	0,07	0,04

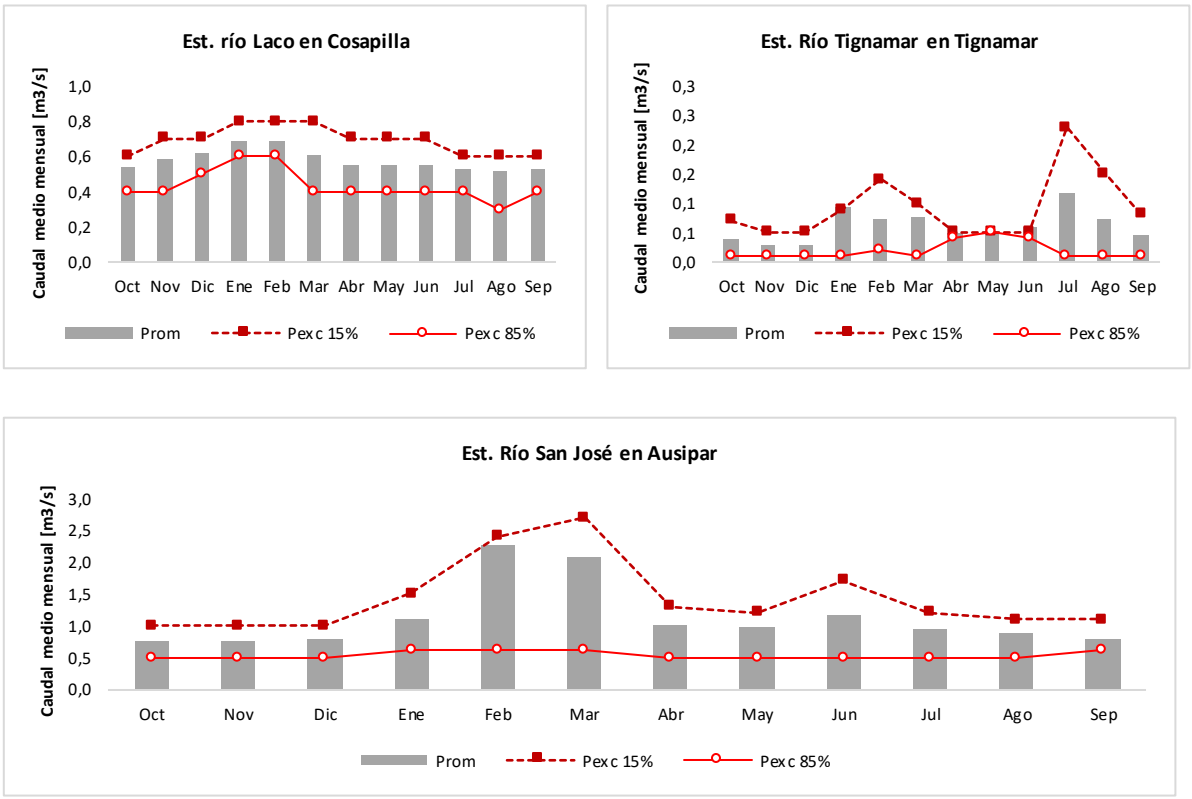


Figura 7.125 Curvas de variación estacional asociadas a probabilidad de excedencia de 15% y 85% y caudal medio mensual en las estaciones fluviométricas de la cuenca del río San José. Fuente: elaboración propia.

Analizando la Figura 7.125, se observa que en dos de las estaciones fluviométricas, río Tignamar en Tignamar y río San José en Ausipar, hay poca variación de los caudales en los meses del año seco (Pexc 85%). La primera podría explicarse porque el río Tignamar en ocasiones se seca y no es frecuente que escurran caudales constantes por éste.

En la estación río San José en Ausipar, ubicada en la parte media de la cuenca, se observa muy poca diferencia entre los caudales de un año medio con los caudales de un año húmedo (Pexc 15%), lo que se podría justificar considerando que esta estación registra no sólo el caudal natural del río San José sino que además el caudal del transvase del canal Lauca. Por lo tanto, no es una condición natural con los recursos propios de la cuenca.

7.4.1.5 Levantamiento Hidrológico

Para el presente estudio se realizaron cuatro campañas de terreno, en donde se seleccionaron 15 puntos de medición, incluyendo el río San José como cauce principal y afluentes de importancia para la escorrentía de la cuenca. Los métodos de aforo utilizados fueron el molinete y de forma manual.

Por otra parte, existen registros históricos de aforos, los cuales se tuvieron en cuenta para caracterizar de mejor forma la hidrología de la cuenca en corrientes sin control fluviométrico por parte de la DGA.

En la Tabla 7.72 se especifican las coordenadas de los puntos aforados tanto históricos como recientes y en las Figura 7.126 y Figura 7.127 se muestra su localización en la cuenca. Los resultados de las campañas hidrométricas de los puntos aforados, se presentan en las Tabla 7.73 y Tabla 7.74.

Tabla 7.72 Coordenadas de los puntos aforados en estudios de referencia y campaña reciente. Fuente: elaboración propia.

Sitio de Aforo	ID	DATUM WGS84 H19S		Año	Estudio de referencia
		UTM Este	UTM Norte		
R. San José en Tignamar	JIC1	442.656	7.950.813	1993	JICA-DGA (1995)
R. San José en Ausipar	JIC2	414.389	7.944.959		
Acueducto Azapa	JIC3	406.447	7.944.798		
Bocatoma	JIC4	398.004	7.945.001		
R. San José en santuario Las Peñas	ARR1	419.342,87	7.948.775	1996	Arrau (1997) *
R. San José en Baden	ARR2	362.658,17	7.956.409		
R. San José en Livilcar	ARR3	425.147,07	7.954.187		
Q. Laco	ARR9	434.559,05	7.963.788		
R. Seco después junta Q. Laco	ARR10	434.248,74	7.963.599		
R. San José antes 1er canal Livilcar	ARR13	425.904,95	7.954.555		
Canal Azapa en bocatoma	ARR14	406.914,08	7.945.040		
Canal Lauca en Q. Laco	ARR15	441.201,71	7.968.366		
-	SJAS-77	413.544	7.944.483	2015-2016	ICASS (2016)
-	SJAS-78	441.696	7.971.458		
-	SJAS-79	425.472	7.954.319		
-	SJAS-80	442.918	7.966.465		
-	SJAS-82	448.454	7.959.122		
-	SJAS-83	446.186	7.952.789		
-	SJAS-84	444.234	7.957.754		
-	SJAS-85	447.384	7.949.116		
-	SJAS-86	447.940	7.945.080		
-	SJAS-87	443.528	7.949.626		
-	SJAS-88	455.315	7.934.904		
-	SJAS-89	456.968	7.932.528		
-	SJAS-101	383.566	7.947.507		
-	SJAS-102	439.683	7.966.500		
	SJAS-124	446.633	7.958.580		

* Las coordenadas son estimadas de acuerdo a la descripción del sitio de aforo, dado que el informe de ARRAU (1997) no indica la localización de estos puntos.

Tabla 7.73 Caudales obtenidos de las campañas de aforos en la cuenca del río San José. Fuente: elaboración propia.

No	Sitio de aforo	CAUDAL AFORADO							
		Campaña I 24-26 Nov 2015		Campaña II 18-20 Feb 2016		Campaña III 10-14 May 2016		Campaña IV 02-03 Ago 2016	
		Método	Q [l/s]	Método	Q [l/s]	Método	Q [l/s]	Método	Q [l/s]
1	SJAS-77	Molinete	342,4	Molinete	1.429,2	Molinete	822,3	Molinete	611,3
2	SJAS-78	Manual	25,0	Manual	56,0	Manual	3,7		
3	SJAS-79	Molinete	392,0						
4	SJAS-80	Manual	3,0	Manual	70,1	Manual	49		
5	SJAS-82	Manual	20,0			Manual	46,7		
6	SJAS-83	Manual	12,0			Manual	27,7	Manual	8,6
7	SJAS-84	Molinete	13,0			Manual	50,9	Molinete	24,5
8	SJAS-85	Manual	20,0	Manual	159,9	Manual	25,6	Manual	16,8
9	SJAS-86			Manual	143,5	Manual	38,4	Manual	6
10	SJAS-87	Manual	29,0	Molinete	874,4	Manual	98,8		
11	SJAS-88	Manual	20,0	Manual	28,0	Manual	16,2		
12	SJAS-89	Manual	3,0			Manual	2,47	Manual	3,7
13	SJAS-101	Molinete	342,4	Molinete	1.317,3				
14	SJAS-102					Molinete	364,6	Molinete	926,6
15	SJAS-124					Manual	7,4		

Tabla 7.74 Registro de los aforos históricos en la cuenca del río San José. Fuente: elaboración propia.

ID Sitio Aforado	Año	CAUDAL AFORADO [l/s]											
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
JIC1	1993						30						
JIC2							554				717	780	
JIC3							549				562	668	
JIC4							0				0	4	
ARR1	1996			468		-	-						
ARR2				436		359	453						
ARR3				673		0	502						
ARR4				723		442	461						
ARR5				190		165	224						
ARR6				289		266	327						
ARR7				378		380	517						
ARR8				446		421	665						
ARR9				536		0	490						
ARR10				458		508	0						
ARR11				468		570	549						
ARR12						15	19						
ARR13						506	-						
ARR14						400	-						
ARR15						589	-						
ARR16						10	10						

Como se observa en las Figura 7.126 y Figura 7.127, existe similitud en la localización de algunos aforos históricos con aforos recientes realizados en la cuenca. Sin embargo, cabe mencionar que los aforos realizados sólo representan un instante específico del río. A continuación se comenta en detalle.

El punto SJAS-77 se ubica en el río San José en Ausipar y coincide con el aforo histórico JIC2 (JICA-DGA, 1995). A nivel mensual ambos registros se realizan el mes de noviembre, para el año 1993 se aforó un caudal de 780 l/s y en el año 2015 el caudal fue de 342,4 l/s. Se podría decir que el caudal pasante en este punto del río San José ha disminuido aproximadamente un 56%, sin embargo esta medición sólo representa un instante específico del río específico y está fuertemente influenciado por las actividades que ocurren aguas arriba.

Otro aforo coincide en localización pero difiere en los meses aforados. Este es el aforo SJAS-79 y el aforo histórico ARR3 (Arrau, 1997).

Los aforos SJAS-82 y SJAS-84, ambos sobre la quebrada Belén, el primero aguas arriba del otro a una distancia aproximada de 4,5 km. Al comparar los caudales aforados en la III Campaña (mayo 2016), existe una diferencia de 4,2 l/s que podrían atribuirse a aportes de afluentes intermedios.

En el aforo SJAS-89 realizado sobre la quebrada Oxa, se obtuvo un caudal similar durante las tres campañas (Nov/2015, May y Ago/2016) realizadas en este punto. Siendo este de 3 a 4 l/s, lo que podría deberse al caudal base constante de su nacimiento.

Comparando los aforos SJAS-86 y SJAS-87 realizados en las campañas Mar/2016 y May/2016, ambos sobre el río Tignamar, el primero aguas arriba del otro a una distancia aproximada de 4,8 km. Se logra ver el gran aumento del caudal en el río (de 3 a 6 veces), una vez recibe los aportes de las quebradas Oxa y Tumeya, además de las precipitaciones registradas de diciembre a marzo.

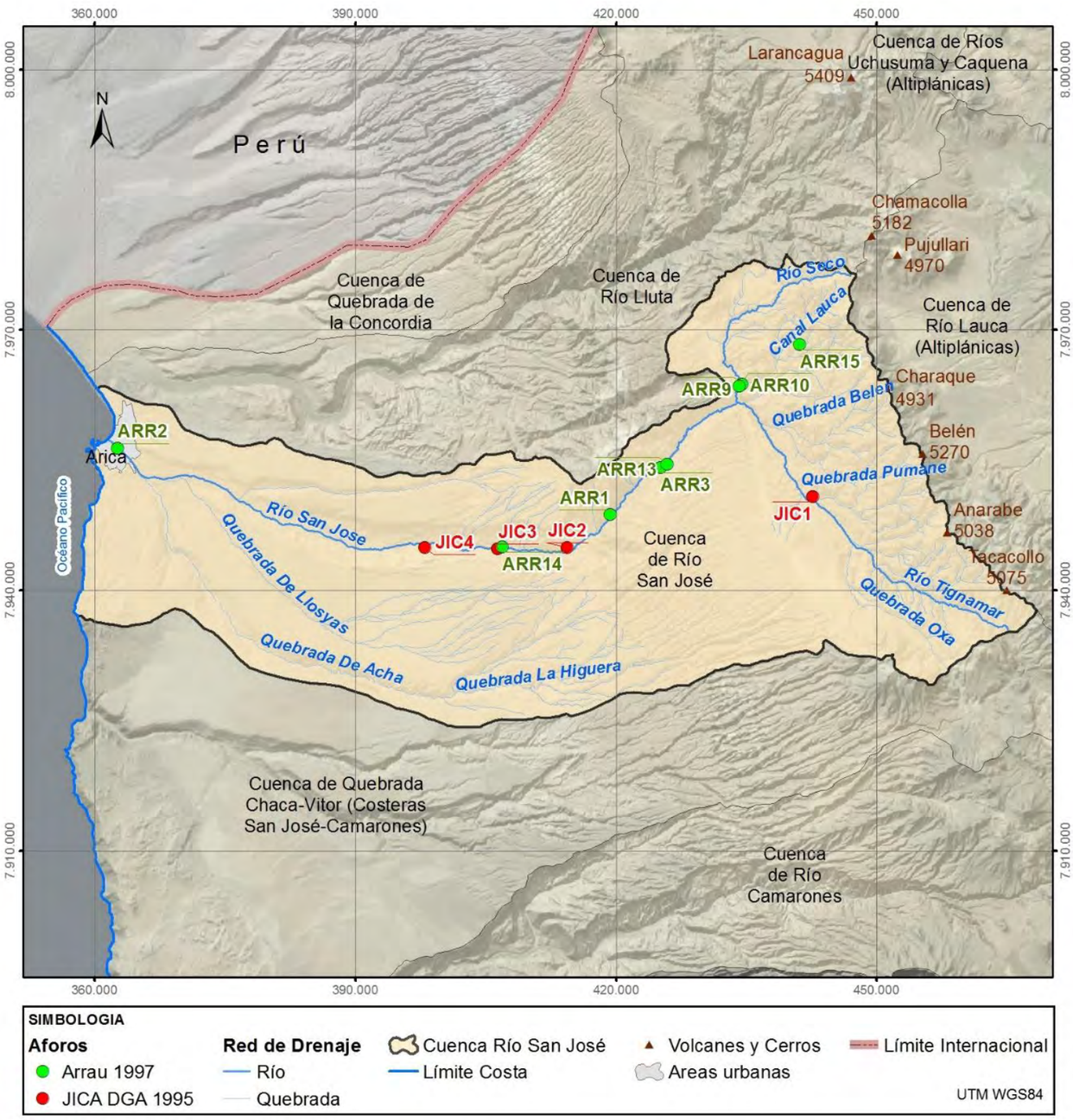


Figura 7.126 Localización de los aforos históricos encontrados en la cuenca del río San José. Fuente: elaboración propia.

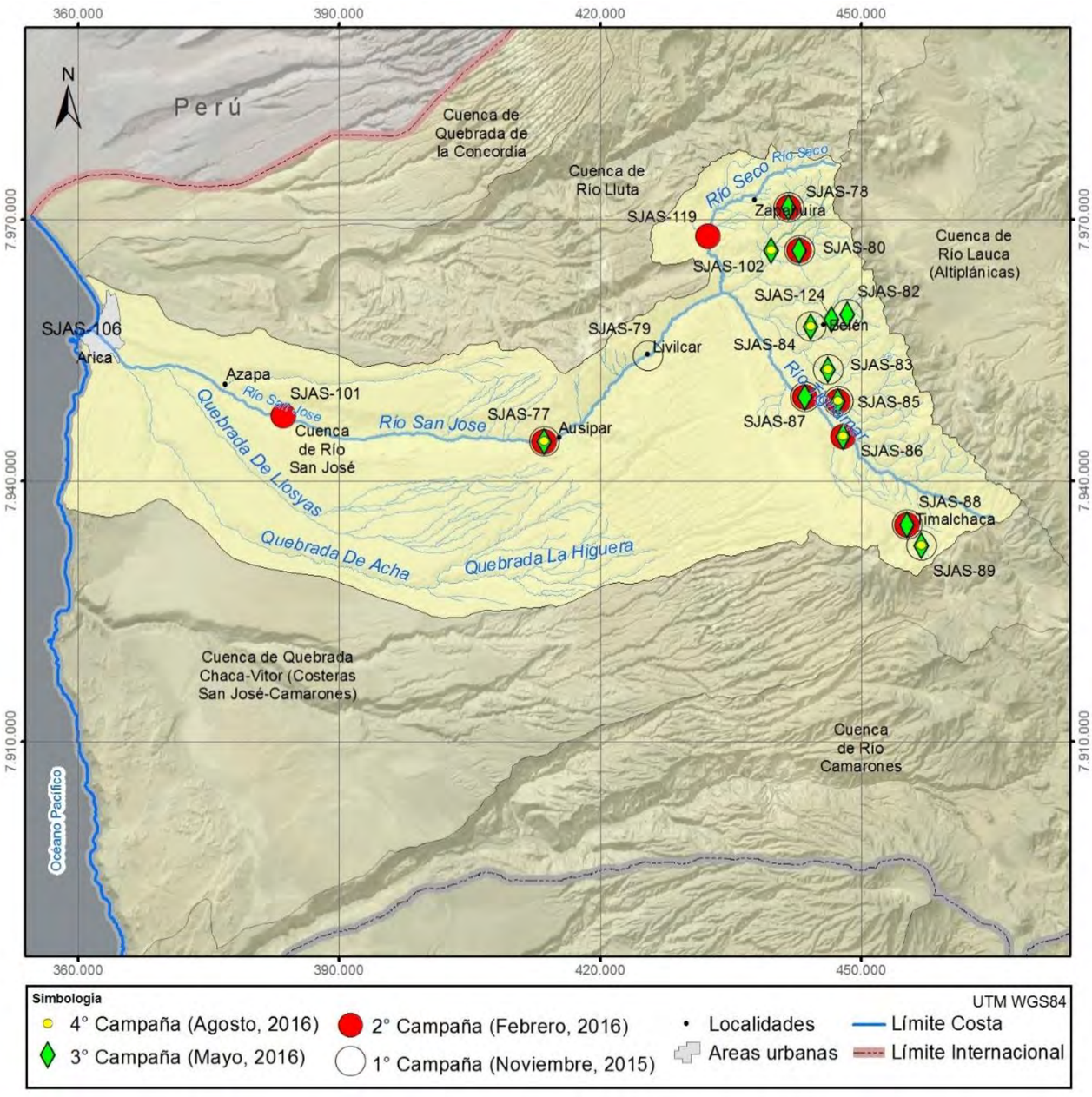


Figura 7.127 Localización de los aforos en las cuatro campañas de este estudio en la cuenca del río San José. Fuente: elaboración propia.

7.4.1.6 Modelación hidrológica

Las generalidades del modelo hidrológico HEC-HMS utilizado para la modelación hidrológica de la cuenca se describen en el Anexo VI. A continuación se detalla el planteamiento concebido, información base, parámetros calibrados y resultados obtenidos del modelo.

PLANTEAMIENTO DEL MODELO

MODELO DE CUENCA

De la cuenca del río San José se delimitó una subcuenca de la parte alta (San José Alto), a partir de la estación fluviométrica río San José en Ausipar. Se decidió no modelar la parte media-baja de la cuenca, por tener esta mayor intervención antrópica y además por no contar con estación de control fluviométrico a la salida de la cuenca.

Para representar el movimiento del agua en la subcuenca se utilizó un conector "Reach" que sirve para calcular el tránsito del hidrograma a medida que circula por el cauce, para las extracciones de agua superficial se utilizó el elemento "diversion", para el aporte del canal de transvase Lauca se utilizó el elemento "source" y a la salida de la cuenca se utilizó un sumidero o "Sink". Ver esquema de la cuenca en Figura 7.128.

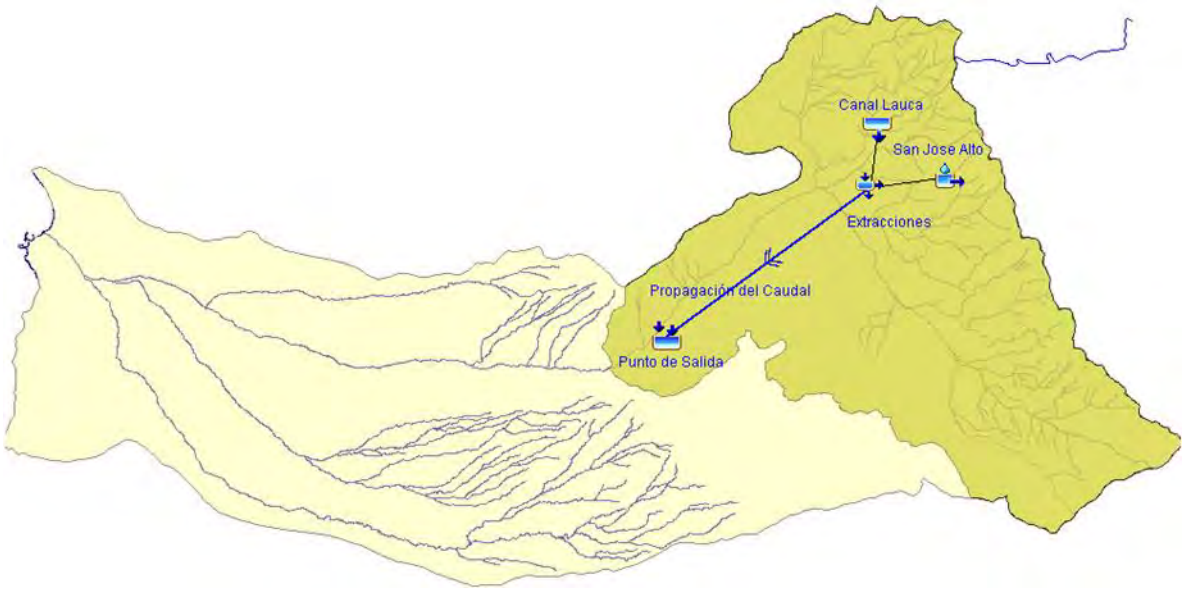


Figura 7.128 Esquema en el modelo hidrológico HEC-HMS de la cuenca del río San José. Fuente: elaboración propia.

MODELO METEOROLÓGICO

Las series meteorológicas utilizadas en cada subcuenca se describen a continuación:

- Precipitación diaria: Los registros corresponden a la estación meteorológica BELEN.
- Evaporación media mensual: Los registros corresponden a la estación meteorológica PUTRE.

ESPECIFICACIONES DE CONTROL

El intervalo del tiempo modelado es diario, la fecha de inicio es el 01-ene-1985 y la fecha de finalización el 31-dic-2014.

INFORMACIÓN BASE

Se requiere ingresar parámetros físicos de la cuenca definidos por el modelo continuo seleccionado, así como información antrópica que eventualmente modifica las condiciones naturales del agua en la cuenca y registros fluviométricos para la posterior calibración. Las series de tiempo utilizadas se describen a continuación:

- El tiempo de retardo se determinó para cada subcuenca como el 60% del tiempo de concentración, aplicando la ecuación de California Highways en base a la longitud del cauce y al delta altitudinal.
- Caudal de extracción: se utilizó el registro de concesiones de agua superficial de la DGA otorgadas en la cuenca, considerando que este caudal es constante y de uso consuntivo, además de que no fuera mayor al disponible en el río.
- Caudal diario observado: para la calibración del modelo se utilizaron series de caudales diarios para el mismo periodo de la simulación de la estación Río San José en Ausipar.

Dado que no se cuenta con mediciones directas de todos los parámetros físicos requeridos para representar adecuadamente el comportamiento hidrológico de la cuenca, estos fueron objeto de calibración y los escogidos finalmente fueron los que mejor representaron los caudales simulados al comparar con los observados. En la Tabla x se presentan los parámetros físicos definidos para el modelo SMA.

El análisis estadístico de dicha comparación fue basado en los resultados del coeficiente Nash-Sutcliffe, ampliamente utilizado en la calibración de modelos hidrológicos para el chequeo de la bondad de ajuste. En la subcuenca San José Alto este valor fue 0,5, siendo un ajuste bueno ≥0,4.

Tabla 7.75 Parámetros utilizados para el modelo SMA en la cuenca del río San José. Fuente: elaboración propia.

Zonas definidas en el modelo hidrológico	Parámetro	Unidad	Subcuenca San José alto
Intercepción vegetación	Almacenamiento inicial en vegetación	[%]	2
	Capacidad almacenada por intercepción de vegetación	[mm]	5
Acumulación en depresiones del terreno	Almacenamiento inicial en depresiones	[%]	2
	Capacidad almacenada en depresiones	[mm]	10
	Infiltración máxima	[mm/h]	8
Zona no saturada (Matriz de Suelo)	Almacenamiento inicial en matriz de suelo	[%]	2
	Capacidad almacenada en el suelo	[mm]	30
	Capacidad almacenada en la zona de tensión del suelo	[mm]	12
	Percolación máxima del suelo hacia acuífero libre	[mm/h]	4
Zona saturada (acuífero superficial)	Almacenamiento inicial en acuífero superficial	[%]	2
	Capacidad almacenada en acuífero superficial	[mm]	20
	Percolación máxima del acuífero superficial hacia el acuífero profundo	[mm/h]	4
	Coeficiente de almacenamiento del acuífero superficial	[h]	300
Zona saturada (acuífero profundo)	Almacenamiento inicial en acuífero profundo	[%]	2
	Capacidad almacenada en acuífero profundo	[mm]	40
	Percolación máxima del acuífero profundo	[mm/h]	2
	Coeficiente de almacenamiento del acuífero profundo	[h]	500

RESULTADOS DEL MODELO HIDROLÓGICO

Se compararon a nivel diario los caudales observados con los caudales simulados, existiendo similitud en algunos y diferencias en otros para todo el periodo analizado. Sintetizando dicha información, se calculó el caudal medio anual en los años con más de 9 meses de información en el caso de los datos observados. Los registros de la estación Río San José en Ausipar (subcuenca San José alto) estaban incompletos del año 1985 al 1989 y los años 2011 y 2013.

Los resultados del caudal observado y caudal simulado a nivel medio anual se muestran en la Figura 7.129. Allí se observa que la mayor diferencia se presenta en el año 2001, en donde ocurrió una crecida que superó los eventos anteriores. Según estudio SDT N° 306 (DEP-DGA,2010), durante el mes de febrero del año 2001, la crecida máxima de 160 m^3/s asociada a un período de retorno aproximado de 50 años, fue precedida en los días siguientes con máximos instantáneos cercanos a los 80 m^3/s, equivalentes a periodos de retorno aproximados de 25 años. Así mismo, se observa que los caudales simulados en el periodo 1990-1998 estarían sobreestimados en comparación con los caudales observados, situación que podría atribuirse a un mayor uso del recurso que no fue incluido en el modelo.

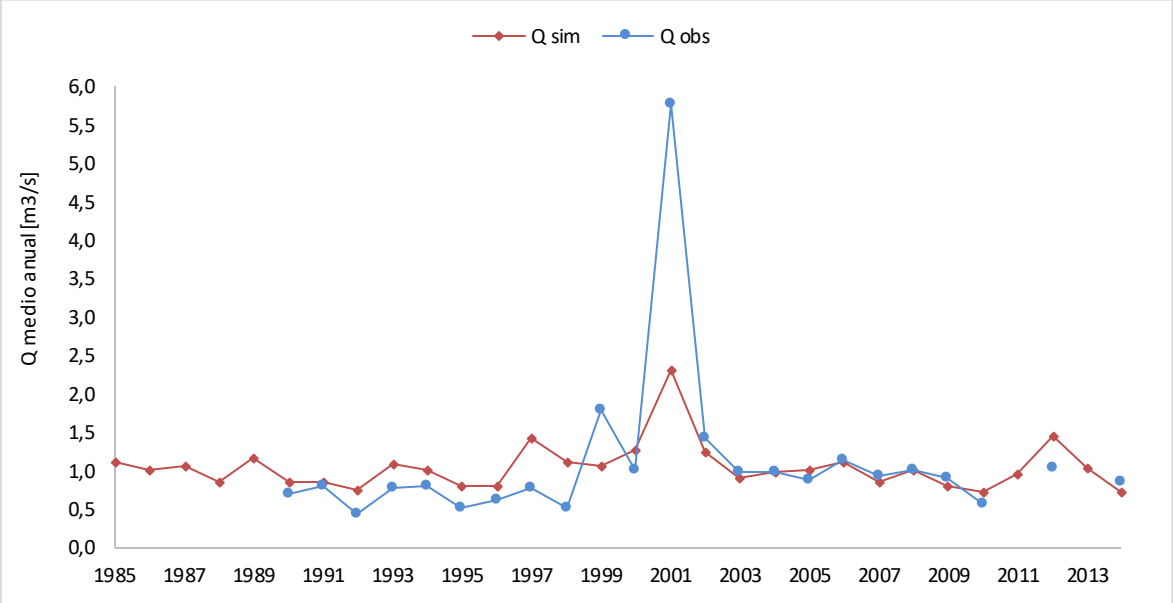


Figura 7.129 Comparación caudales medios anuales observados y simulados en la subcuenca San José Alto. Fuente: elaboración propia.

7.4.1.7 Estimación de la recarga de aguas subterráneas

Las principales fuentes de recarga del acuífero del río San José, proviene de las crecidas veraniegas del río, de la infiltración de las aguas transvasadas desde el río Lauca, que en el valle de Azapa se incorporan a la infraestructura de distribución de las zonas de riego (en especial canales no revestidos), y en menor escala, por las pérdidas de la red de distribución de agua potable en la ciudad de Arica.

ANTECEDENTES

De acuerdo a Ayala, Cabrera & Asociados Ltda. (1989), en el canal Azapa se presenta altas velocidades lo cual dificulta la realización de un buen aforo, el error podría ser incluso superior al 10% en la medición. Por lo tanto, en la estimación de las pérdidas resulta válido aplicar tasas de infiltración observadas en otros canales y formulaciones empíricas. En este caso, se consideraron tasas de infiltración que fluctúan entre los 0,061 $m^3/m^2/d$ y los 0,115 $m^3/m^2/d$, así el valor medio es de 0,088 $m^3/m^2/d$.

Según JICA-DGA (1995), el caudal medido en la estación Río san José en Ausipar correspondería al total del recurso hídrico entrante al valle de Azapa, tanto superficial como subterráneo, ya que el lecho de la estación estaría formada por rocas del basamento impermeable. Esto genera que el agua subterránea aguas arriba de la estación Ausipar aflore como agua superficial antes de llegar a esta, y parte de ella volvería a infiltrarse aguas abajo antes de llegar a la estación Bocatoma Azapa, por lo tanto al calcular la disponibilidad real del valle faltaría descontarle esta infiltración.

En el mismo estudio, se estimó que el 76% del agua superficial infiltra recargando al acuífero del valle de Azapa, principalmente desde el lecho del cauce. La recarga anual se estimó del orden de los 465 l/s.

De acuerdo al estudio de Arrau-DGA (1997), la percolación total en el valle de Azapa equivale al 20% del caudal que ingresa por el río San José. Los valores obtenidos para los periodos evaluados, 1963-1993 y 1988-1993, fueron de 260 l/s y de 160 l/s, respectivamente. Además, se consideró una distribución de las recargas por percolación desde el río, entre la bocatoma y la desembocadura en el mar. Los porcentajes utilizados por tramos del valle fueron, del 58% en el tramo bocatoma-Cabuza, del 17% en el tramo Cabuza-Albarracines y del 25% en el tramo Albarracines-Saucache.

Con relación a la recarga desde los cauces y zonas de riego, Arrau-DGA (1997) consideró porcentajes de agua recibida en cada sector para el periodo 1989-1996. En efecto, se determinó que en el año 1989 la recarga al acuífero era del orden del 26% del caudal a nivel de bocatoma, el cual disminuyó a un 18% para el año 1996.

Con relación la recarga local en la ciudad de Arica, AC-DGA (1989) estableció que un 15% de la pérdida total o diferencia entre la producción real y el consumo facturado

por ESSAT S.A., percola y contribuye como recarga al acuífero desde la superficie. En base a ello, Arrau-DGA (1997) estimó la recarga neta sobre el área urbana atribuible a las pérdidas de la red de agua potable para el periodo entre los años 1988 y 1995, en un valor de 32 l/s, cifra que al asignar como recarga areal media representa aproximadamente 67 mm/año.

Por otro lado, AC Ingenieros Consultores Ltda. (2002), menciona que en el sector urbano de Arica se presenta una recarga local correspondiente a la red de agua potable, y que el valor depende de la producción y del consumo facturado. En este estudio la recarga se estimó en 36 l/s.

El estudio SIT nº 201, "Definición de estrategias de manejo sustentable para el acuífero de Azapa, xv región" liderado por AC Ingenieros Consultores Ltda. (2009), desarrollo una metodología para estimar la infiltración asociada a zonas de relleno fluvial en la cuenca. Se utilizaron coeficientes de escorrentía distintos para cada zona, determinados a través de aproximaciones sucesivas, para ajustar el caudal de salida en Saucache, al valor medio anual y así mantener el porcentaje medio de infiltración observado durante los aforos simultáneos en puntos de control, realizados durante la crecida del año 2001. El sistema acuífero fue representado a través de un modelo de flujo elaborado con el programa *Visual Modflow*, posteriormente calibrado para el periodo 1960-2008 y obteniéndose que la entrada neta (crecidas, riego, pérdidas de alcantarillado de agua potable y flujo propio) al acuífero es de 725 l/s. Esta recarga ha posibilitado la explotación histórica (567 l/s) y los afloramientos de las vertientes (199 l/s).

Además de ello, en el estudio se concluye que el acuífero del valle de Azapa se ha mantenido, en promedio, en un pseudo equilibrio. Si bien, se han producido grande descensos de los niveles freáticos en algunos sectores, como lo ocurrido el año 1996, éstos se han recuperado en los periodos de recarga por sobre el promedio. Sin embargo, también se hace hincapié, que la demanda histórica en la cuenca es satisfecha con la recarga una vez cada 5 años, por lo tanto parte de los caudales de extracción provienen del volumen almacenado en el acuífero, generando descensos progresivos en los niveles freáticos del valle.

La DEP-DGA (2010) en el estudio "Plan de acción estratégico para el desarrollo hídrico de la región de Arica y Parinacota", señala que durante el siglo pasado se registraron al

menos una veintena de eventos de crecidas, y en lo transcurrido de este siglo al menos dos eventos menores ($q \leq 15 m^3/s$), equivalentes a esperar una crecida entre 4 y 5 años. También en el presente siglo se han desencadenado crecidas de mayor magnitud ($q \geq 30\ m^3/s$), que han provocado daños sobre la infraestructura pública, viviendas y zonas agrícolas.

En el mismo estudio, se menciona que el volumen almacenado en el acuífero del valle de Azapa es de aproximadamente 300 a 350 millones m^3 y que la recarga media anual alcanza los 750 l/s. Además destacan que este caudal sustentable es un valor estimado de largo plazo, sin perjuicio de lo cual, existen periodos alternados de mayor y menor disponibilidad, sujeta a la variabilidad hidrológica de la recarga.

ANÁLISIS DE LA RECARGA: RELACIÓN PRECIPITACIÓN - ESCORRENTÍA

Para la estimación de la recarga media anual, se implementó una metodología regional ampliamente desarrollada para las cuencas altiplánicas y precordilleranas de vertiente pacífica, como referencia principal se contó con el estudio SDT n° 317 liderado por DEP-DGA (2011). Adicionalmente, para distribuir la recarga a nivel mensual, en este proyecto se plantea una metodología simplificada basada en los procesos hidrológicos que predominan en la región. Los detalles del procedimiento realizado en las cuencas de la región de Arica y Parinacota se presenta en el anexo VI.

Con relación a la cuenca del río San José, en la Tabla 7.76 se presenta la información base utilizada. Cabe mencionar que el cálculo de la precipitación media anual se realizó utilizando el método de las isoyetas, descrito en el capítulo "Hidrometeorología" del Análisis Regional y para el caudal medio anual se contó con la información de las estación fluviométrica río San José en Ausipar.

Tabla 7.76 Información base utilizada de cada subcuenca del río San José. Fuente: elaboración propia.

Subcuencas	Coord. UTM N del Centroide	Altitud media [msnm]	Área [km^2]	Pp media anual [mm/año]	Pp media anual [l/s]	Q medio anual [l/s]
Río San José alto	795.3055	3.244	1.246	133	5.254,9	520*

* El caudal medio anual registrado en la estación es 1120 l/s, sin embargo aguas arriba de ésta, la cuenca recibe un caudal promedio histórico de 600 l/s de la cuenca del río Lauca, tal como se cita en el estudio "Plan de acción estratégico para el desarrollo hídrico de la región de Arica y Parinacota", DGA (2010).

Para la estimación de la recarga neta, se estableció una relación entre el promedio de los caudales mínimos decadales (meses de junio, julio y agosto) y los caudales medios observados, y lo mismo pero con los caudales calculados. Lo anterior se adoptó siguiendo las hipótesis y conceptos hidrológicos del estudio SIT N° 317, a continuación se describen:

- Los flujos subterráneos son despreciables y los caudales superficiales controlados a la salida de la cuenca representan la escorrentía total.
- Se entenderá como "recarga neta de la cuenca", aquella parte de la escorrentía total de salida de una cuenca, compuesta por el agua que ha infiltrado al menos una vez y que ha transitado subterráneamente en algún momento, tal que su permanencia dentro de la cuenca es superior a la de un año hidrológico.
- Esta recarga neta o caudal base interanual de salida de la cuenca puede ser estimada, como el promedio de los mínimos decadales observados entre los meses de junio, julio y agosto. Existe consenso en interpretar las series hidrológicas del norte de Chile, bajo la perspectiva de ciclos hidrológicos decadales, a partir de los cual es razonable estimar el flujo base como el promedio de los 4 mínimos decadales observados históricamente.

De acuerdo a las correlaciones obtenidas, es factible asumir que la recarga neta en las cuencas altiplánicas de la XV Región, corresponde entre el 43% y el 46% de la escorrentía total. Adicionalmente, Aquaterra Ingenieros Ltda. (2011) en el estudio SIT N° 251, menciona que en la subcuenca del río San José Alto, el flujo subterráneo representa cerca del 10% del caudal de salida, de acuerdo al valor obtenido de la permeabilidad equivalente (15,94 m/d) en la sección de escurrimiento. Situación que a su vez se respalda con la permeabilidad final obtenida del modelo del valle de Azapa (estudio "Definición de Estrategias de Manejo Sustentable para el Acuífero de Azapa, XV Región" DGA, 2010), en donde ésta fue de 17,28 m/d, y con ello obteniéndose un caudal subterráneo de entrada a la cuenca de 100 l/s. Aun considerando las simplificaciones del método y los errores cometidos en la subcuencas, se llegó a un valor estimado de recarga neta, el cual se presenta en la Tabla 7.77.

Tabla 7.77 Caudales considerados en la correlación y estimación de la recarga neta. Fuente: elaboración propia.

Subcuencas	Q obs [l/s]	Q cal [l/s]	Q min decadal prom [l/s]	Recarga neta [l/s] (40% - Estudio SDT 137)	Recarga neta [l/s] (43% - Propuesto Actual)
Río San José alto	1.120*	384	396,7	448	482

* Valores registrados que consideran el transvase del Canal Lauca aguas arriba de la estación fluviométrica.

SÍNTESIS DE LA ESTIMACIÓN DE LAS PRINCIPALES RECARGAS

Una vez revisados los antecedentes de la cuenca del río San José, relacionados con la estimación de la recarga y de analizar conceptualmente las componentes que condicionan el tránsito del agua hasta llegar al acuífero, fue adoptada la metodología regional propuesta por el estudio SIT N° 317 para la parte alta y en la parte baja se adoptó los resultados obtenidos del modelo del valle de Azapa (estudio SDT N° 201-AC Ingenieros Consultores, 2009). Cabe mencionar que el valor obtenido de la recarga media anual en la cuenca, es un referente que consideró varias hipótesis y simplificaciones, anteriormente descritas. Sin duda la principal limitante en el análisis es la cantidad de información disponible, alguna de esta desconocida y/o no controlada. En la Tabla 7.78 se presenta de manera resumida las principales fuentes de recarga, el método utilizado y los valores estimados a nivel anual. Seguidamente en la Tabla 7.79 se presenta la distribución de la recarga estimada a nivel mensual, concentrándose esta en los meses con mayor registro precipitación, de enero a marzo.

Tabla 7.78 Síntesis de las principales estimaciones de recarga al acuífero en la cuenca del río San José. Fuente: elaboración propia.

Principales fuentes de recarga al acuífero	Método de estimación	Valor Estimado Anual [l/s]	
		Río San José Alto	Río San José Bajo
Percolación de la PRECIPITACIÓN que a su vez contribuye a la escorrentía	Relación precipitación-escorrentía. Metodología adoptada del estudio SIT N° 317- DEP-DGA (2011)	482	
Recarga neta anual del FLUJO BASE en la caja del río San José en la parte alta			
Aporte de FLUJO SUBTERRÁNEO pasante desde la parte alta del valle, recarga por infiltración de EXCEDENTES DE RIEGO y PERDIDAS DE LA RED DE AGUA POTABLE, y recarga potencial durante los periodos de CRECIDAS	Se adoptó los resultados del modelo del valle de Azapa, presentados en el estudio SDT N° 201 -AC Ingenieros Consultores (2009)		725

Tabla 7.79 Valores de la recarga media mensual estimada en la cuenca del río San José. Fuente: elaboración propia.

Subcuencas	Distribución mensual de la recarga estimada [l/s]											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Río San José alto	186	198	97	0	0	0	0	0	0	0	0	0

7.4.2 Marco geológico

La cuenca del río San José se extiende por la Cordillera de la Costa, la Depresión Central, la Precordillera y, en el extremo este de la cuenca, la Cordillera Occidental.

GEOLOGÍA

Es la única cuenca que presenta afloramientos del basamento, compuesto por el Complejo Metamórfico de Belén (Ppb) y los Estratos Quichoco (CPq). Estos afloran cerca de la localidad de Belén.

En la Cordillera de la Costa se observan las rocas del arco jurásico, correspondientes a los Intrusivos del Jurásico Medio-Superior (Jmsi). Las rocas asociadas al trasarco, que evidencian una transgresión-regresión marina son, de base a techo, la Formación Camaraca (Jmc), que aflora al sur de Arica; la Formación Los Tarros (Jst) que aflora únicamente en la quebrada Los Tarros, al sureste de Arica; la Formación Livilcar (JKil),

que aflora en las cercanías de la localidad de Livilcar, en el curso superior del valle de Azapa. Luego, y en discordancia angular, se deposita la Formación Atajaña (JsKia), que aflora en el sector del cerro Atajaña, en la Cordillera de la Costa.

El periodo Cretácico se expresa como intrusivos, entre los que se cuentan los de Azapa (Ki(a)) y Acha (Ki (b)), que afloran en las quebradas homónimas. Los Intrusivos del Cretácico Superior – Paleoceno que afloran en esta cuenca son los de Lluta (KPi(a)), ubicados en la quebrada de Azapa.

Las rocas del Oligoceno-Holoceno en la Depresión Central y la Precordillera son la Formación Azapa (Oa), que aflora en el curso medio de la quebrada del mismo nombre; la Formación Oxaya (OMo) en la Precordillera y en la Depresión Central; la Formación El Diablo (Mimd) se expone en la confluencia de las quebradas El Diablo y Azapa, y en varios sectores de la Depresión Central, y; la Formación Huaylas (Msh) que se expone en la quebrada Copaquilla. Por su parte, en la Cordillera Occidental afloran la Formación Lupica (OMl), principalmente en el sector oriental de la Cordillera Occidental; la Formación Joracane (Mij) aflora de manera restringida en la quebrada Joracane, en el borde occidental de la Cordillera Occidental. La Ignimbrita Lauca (Pll) se ubica discontinuamente en el sector de la Cordillera Occidental, en la Precordillera y en la Depresión Central. Los Intrusivos del Mioceno Medio (Mmi) afloran en el límite occidental de la Cordillera Occidental.

Los volcanes y remanentes de volcanes del Mioceno Inferior, Medio y Superior (Miv, Mmv y Msv) afloran en la Precordillera, en los sectores norte, central y sur respectivamente.

Los depósitos no consolidados en la cuenca del río San José son: los depósitos aluviales de la Cordillera de la Costa (OMma, MsPla), que se encuentran rellenando depresiones; los depósitos salinos de la Depresión Central (Qsdc), ubicados en el sector occidental de la misma; los depósitos eólicos (Qe) se localizan en gran parte de la zona occidental de la Depresión Central. Los depósitos litorales (Ql), ubicados a lo largo de la zona costera, predominantemente al norte de Arica. En la Depresión Central y la Precordillera se pueden encontrar: los depósitos de remoción en masa y los depósitos coluviales (PlQr y Qc), los que se observan principalmente a lo largo de la quebrada de Azapa. Los depósitos aluviales (Pa, Ha) se disponen esencialmente como mantos, en las zonas de la Depresión Central y en las laderas de los volcanes, o en las

depresiones y/o quebradas anchas de la Precordillera. Los depósitos fluviales (Plf, Pf, Hf) se observan a lo largo de los cauces. En la Cordillera Occidental se ubican los depósitos glaciales (Qg, PlHg), ubicados en los flancos del Cordón Belén y de los edificios volcánicos del Mioceno.

TECTÓNICA Y ESTRUCTURAS

De las tres etapas tectónicas en las que se formó esta región, la primera (Jurásico Medio-Cretácico Inferior), que contempla el desarrollo del trasarco Jurásico se evidencia en la quebrada Azapa con la Formación Livilcar, estratigráficamente continua, con evidencia de regresión marina después del periodo Oxfordiano y se encuentra plegada en anticlinales y sinclinales, de rumbo NW-SE a NNE-SSW.

La segunda etapa (Cretácico Superior- Eoceno) no tiene más evidencia que la de algunos intrusivos cretácicos. Sin embargo, durante la tercera etapa (Oligoceno-Holoceno) se producen los mayores cambios en el relieve. En la localidad de Livilcar se presenta un par anticlinal-sinclinal de vergencia este, que provocó el alzamiento del Miembro Inferior de la Formación Livilcar al oeste la localidad homónima. La geometría de estos pliegues indica acortamiento en la dirección este-oeste, con una posible componente menor de deformación transpresiva y de edad Cretácico Superior - Oligoceno Inferior, la misma edad que tendría el plegamiento suave de la Formación Suca. En el sector de la quebrada Azapa, la falla Ausipar tiene una proyección en superficie de rumbo N5W y se estiman unos 60°E de manteo, la que se proyectaría en profundidad como una estructura subvertical a inclinada al este, que formó parte de un sistema de fallas de rumbo. Durante el Oligoceno, su desplazamiento habría sido inverso con una componente menor de rumbo, lento, continuo y sinsedimentario a la depositación de la Formación Azapa. El anticlinal Oxaya es un pliegue amplio y suave de 50 km de largo, vergencia oeste, y se habría formado por la reactivación inversa y ciega más reciente de la falla Ausipar. En la charnela del anticlinal Oxaya se observan fallas normales y *grabens*, orientados paralelos al eje del pliegue y producidos por el abombamiento de la charnela. Se estima una edad para el plegamiento miocena media-superior. Al sureste de Arica, la propagación de la falla Mal Paso en el Mioceno-Holoceno provoca en superficie (OMma) una flexura suave con desplazamiento vertical del bloque septentrional.

En la Cordillera Occidental las estructuras se presentan como cabalgamientos, pliegues y fallas inversas y de rumbo, principalmente del Oligoceno. En la parte occidental de la cordillera, entre Putre y Tignámar, se expone un sistema de cabalgamientos y pliegues de vergencia oeste, que marca el mayor cambio de altitud en la región, de edad miocena-holocena. En esta zona se expone restringidamente la falla Nacientes Quebrada Belén. Tiene un rumbo N-S a NNW-SSE y manteo subvertical y pone en contacto rocas del Complejo Metamórfico de Belén con capas inclinadas (60°E) inferiores de la Formación Lupica. Es probable que, durante el Oligoceno Superior, haya tenido un movimiento de rumbo dextral y/o normal, con una reactivación inversa de menor importancia en el Mioceno y que haya funcionado, al menos durante una parte del Mioceno Inferior, como una estructura de borde de caldera.

En el área entre Zapahuira y Tignámar, la deformación miocena-holocena está caracterizada por el anticlinal Belén, en cuyo núcleo se encuentran los dos bloques más septentrionales del basamento Proterozoico (Ppb), los que están limitados al oeste por la falla inversa Chapiquiña-Belén, de rumbo NNW-SSE y manteo 40-60°E. Al oeste del Anticlinal Belén, en la localidad de Lupica, se expone un sinclinal de vergencia oeste, de unos 5 km de largo, que se habría transportado hacia el oeste sobre un nivel de despegue local en la parte media de la Formación Lupica. Más al oeste, dos cabalgamientos de vergencia oeste (Belén-Tignámar y Copaquilla-Tignámar) cortan el bloque de basamento más meridional y las rocas de las formaciones Lupica, Joracane y Huaylas así como las lavas del Mioceno Medio. La edad de la deformación del sistema general es esencialmente miocena.

Al sur de Arica, al sur de la quebrada Acha, fallas subverticales dextrales de rumbo N60-80E cortan los Intrusivos del Cretácico. Más al sur, la falla Mal Paso, de rumbo N60-85W y manteo 50 a 70°N, pone en contacto las Formaciones Camaraca y Atajaña. Fue normal en el Cretácico Inferior- Cenozoico Inferior y se reactivó de manera inversa en el Mioceno Medio-Holoceno.

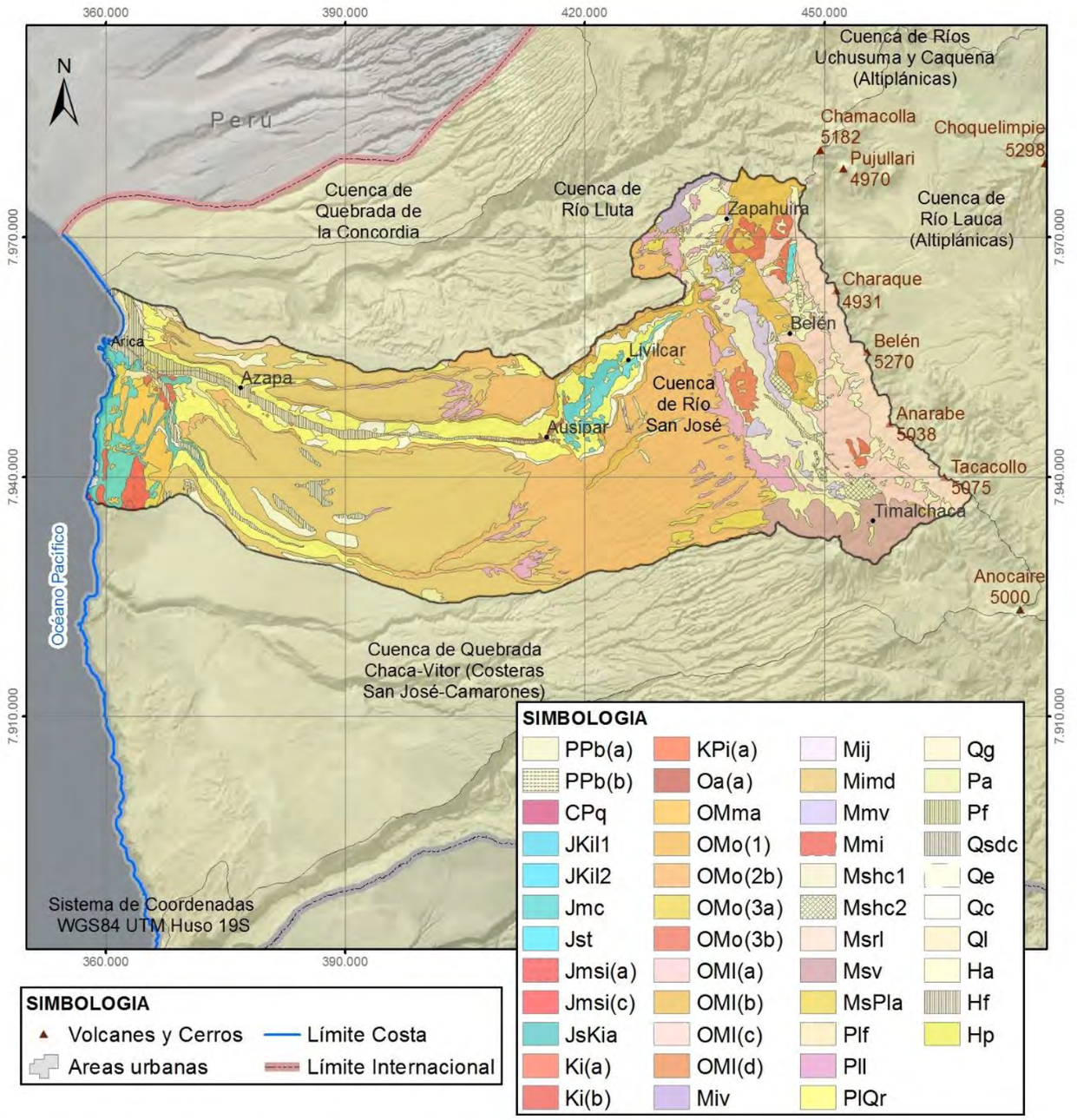


Figura 7.130 Mapa geológico de la cuenca del río San José. Fuente: modificado de García *et al.* (2004).

7.4.3 Caracterización Hidrogeológica

7.4.3.1 Estudios existentes

En la cuenca del río San José existen numerosos informes relacionados con la caracterización hidrogeológica del acuífero cuaternario del valle de Azapa, sin embargo no existe información hidrogeológica del resto de la cuenca. En la Figura 7.131 se presenta la cuenca del río San José y en el recuadro rojo se indica la ubicación del valle de Azapa, zona donde se emplaza el más importante acuífero de la región.

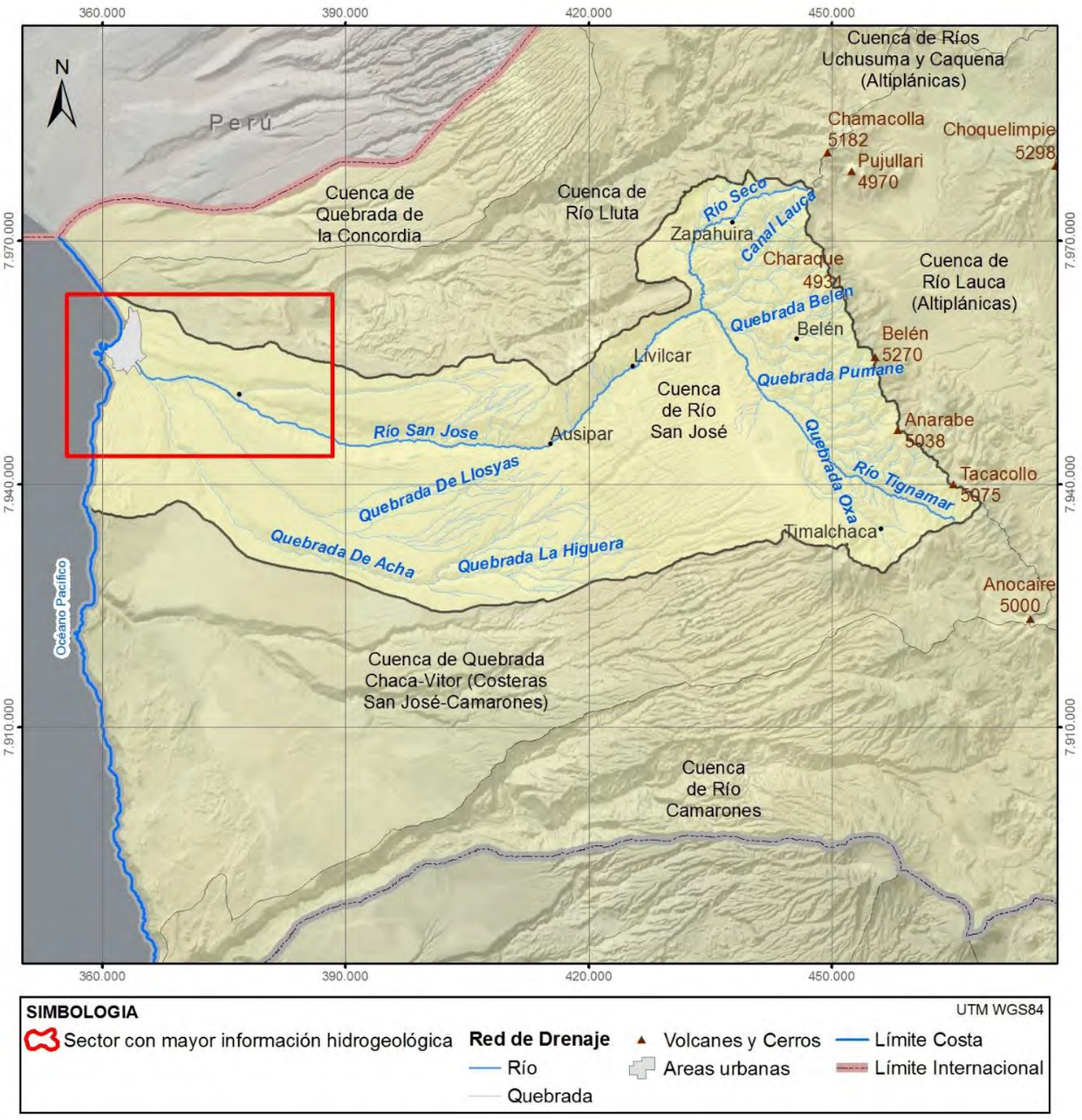


Figura 7.131 Destacada en rectángulo rojo, la ubicación del valle de Azapa, zona estudia hidrogeológicamente en detalle en los antecedentes. Fuente: elaboración propia.

En el informe de Díaz *et al.* (1972) se presenta el esquema estratigráfico y de habilitación de cada pozo en estudio, así como la interpretación de las pruebas de bombeo realizadas mediante la fórmula de Cooper-Jacob.

Posteriormente, REG y Karzulovic (1981) consideraron que la unidad con mayor importancia hidrogeológica son los depósitos cuaternarios y holocénicos asociados al río San José, ubicados bajo la cota 2.000 msnm hasta la costa. Determinaron que esta unidad varía en profundidad, pero que de 0 a 40 m de profundidad existe un acuífero productor importante, de 40 a 70 m un acuífero productor modesto, de 70 a 100 m un acuífero productor pobre y por debajo de los 100 m de profundidad no hay un acuífero aprovechable. Analizaron la evolución histórica del nivel freático del acuífero desde 1947 a 1979, observando una relación directa entre las crecidas y los niveles freáticos.

En el estudio de AYALA, CABRERA y ASOCIADOS (1989) elaboraron perfiles geológicos para definir la geometría de las unidades acuíferas en el sector comprendido entre Cabuza y la costa, estimaron los parámetros hidráulicos del acuífero a partir de algunas pruebas de bombeo y determinaron el efecto del transvase del río Lauca y de las crecidas del río San José en la recarga de las unidades acuíferas. Además, se detectó el problema de la intrusión marina derivada de la excesiva extracción de aguas subterráneas de los pozos cercanos a la costa. En la Figura 7.132 se muestra el mapa piezométrico confeccionado por AYALA, CABRERA y ASOCIADOS (1989) con los niveles medidos en junio de 1988.

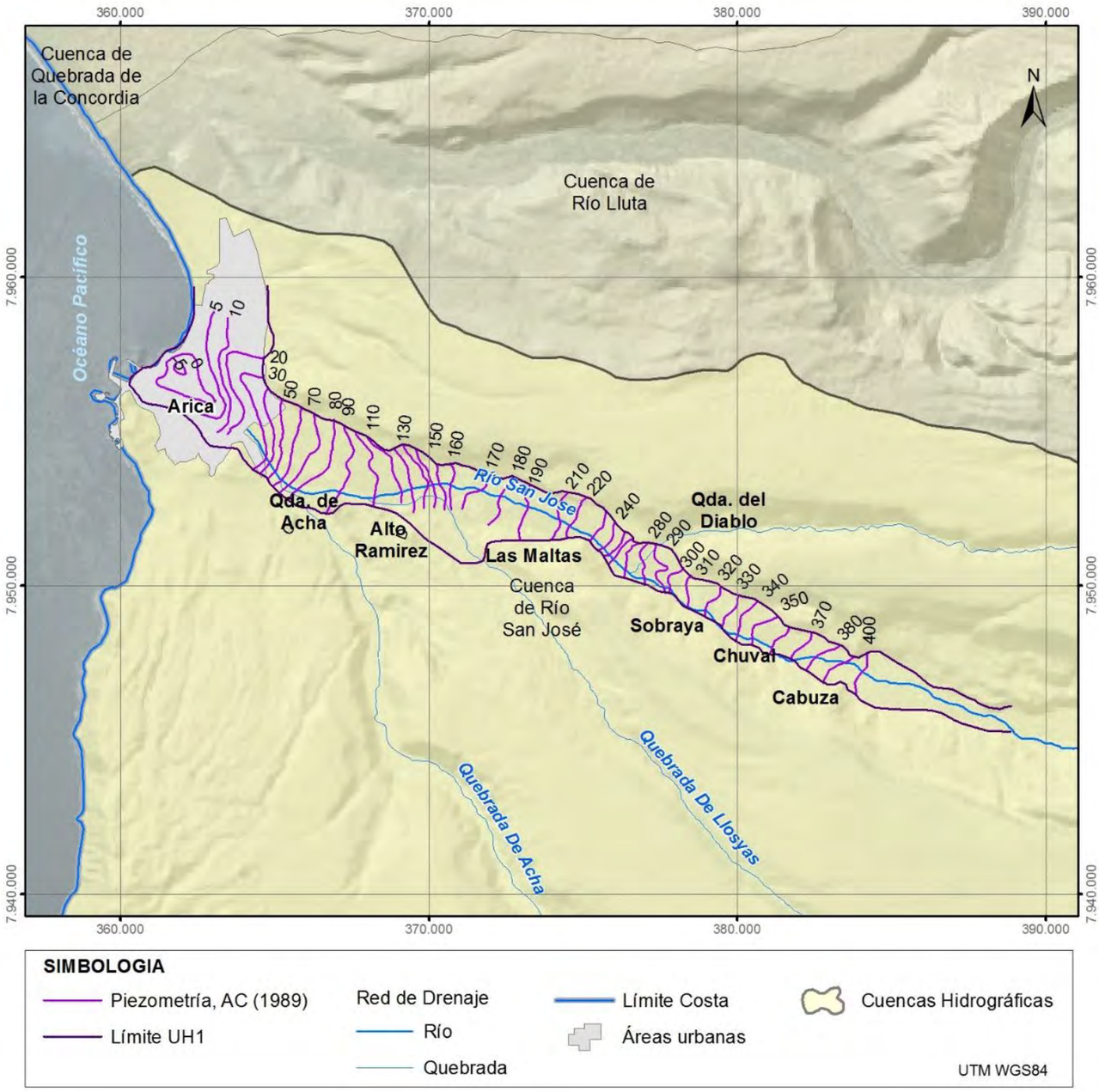


Figura 7.132 Mapa piezométrico del valle de Azapa de junio de 1988. Fuente: modificado de Ayala, Cabrera y Asociados (1989).

En el estudio de JICA (1995) se caracterizó hidrogeológicamente la Unidad Hidrogeológica I por sectores (Cabuza, San Miguel, Pago de Gómez, Saucache, área urbana de Arica). Este se definió como un acuífero compuesto por depósitos aluviales cuyo ancho varía entre 600 a 1.700 m, el espesor oscila entre 45 a 60 m, la permeabilidad promedio es de 28 m/d y una transmisividad promedio de 1.344 m^2/d. Analizaron la evolución histórica del nivel freático, observando un descenso paulatino desde 1977, consecuencia del aumento de extracción de agua en los pozos, en el que sólo ascendió el nivel en 1962 debido a la infiltración asociada al transvase del río Lauca. En el informe de AYALA, CABRERA y ASOCIADOS y AC ING (1995) se desarrolló una red de monitoreo constituida por vertientes, 17 norias y 57 sondajes ubicados a lo largo del valle de Azapa con el fin de analizar la evolución del nivel estático o dinámico del agua subterránea, el caudal, el contenido de cloruros y la conductividad eléctrica durante dos años, desde noviembre de 1993 a 1995. Una de las evidencias del descenso progresivo del nivel freático fue que durante el estudio se secaron las 5 vertientes que se monitoreaban. En éste se concluye que en todo el valle de Azapa se produce un descenso progresivo de los niveles estáticos, habiendo pequeñas variaciones en los sectores de Cabuza, Chuval, Arica Norte y Arica Costa mientras que en Las Riveras y Planta Azapa corresponden a descensos más notorios. Por otro lado, se detectó un descenso en el rendimiento de las fuentes, variando los caudales específicos. Posteriormente, se continuó el monitoreo hasta 1997. En la Figura 7.133 se muestra la ubicación de los puntos de monitoreo, los sectores y las isofreáticas elaboradas por AYALA, CABRERA y ASOCIADOS y AC ING en 1995 y en 1997.

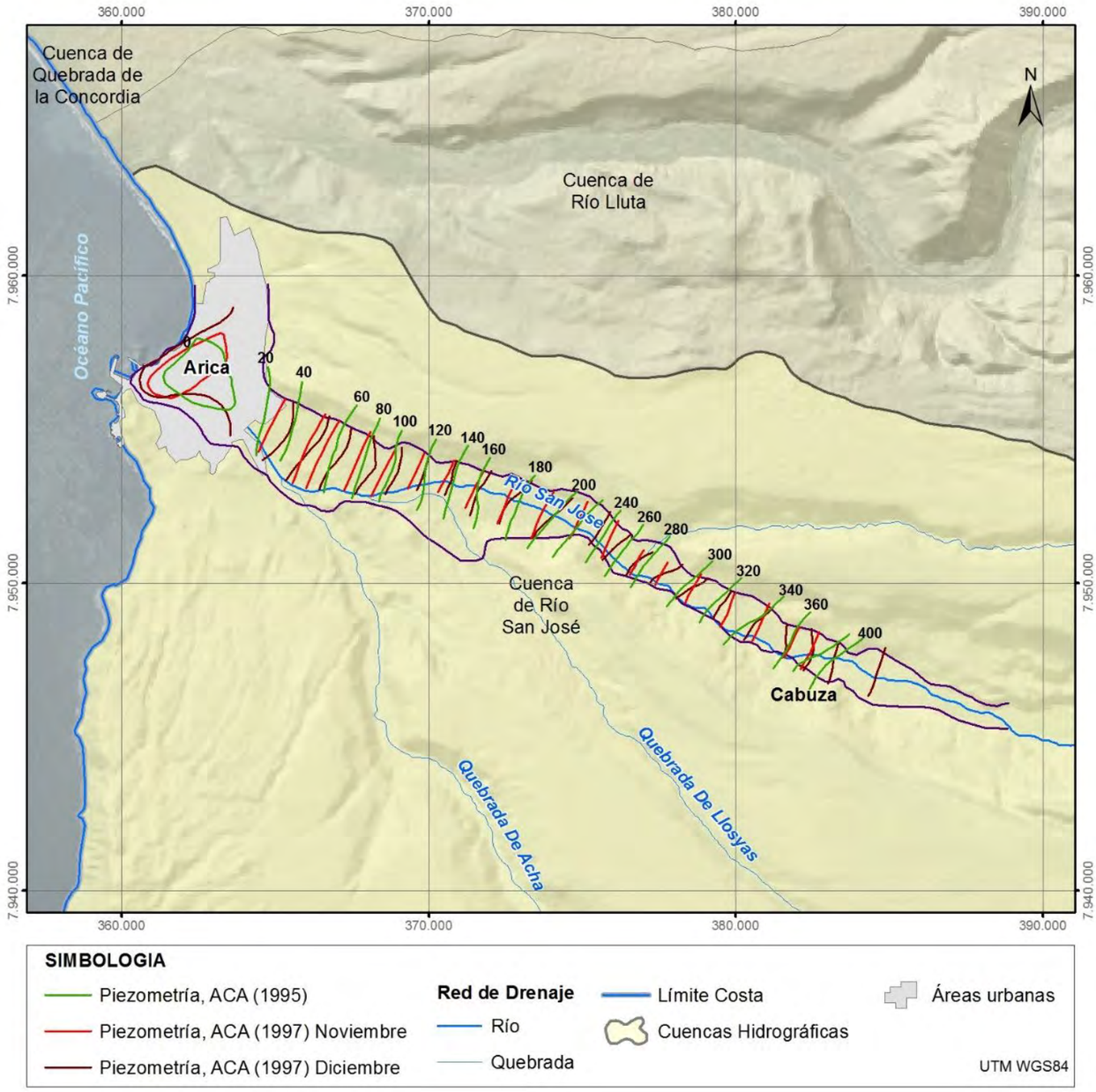


Figura 7.133 Mapa piezométrico del valle de Azapa del año 1995. Fuente: modificado de Ayala, Cabrera y Asociados y AC ING (1995) y Ayala, Cabrera y Asociados y AC ING (1997).

En el estudio de Peña *et al.* (1995) se consideró como unidad acuífera principal a los depósitos fluviales actuales y aterrazados con un espesor que varía entre 0 y 70 m. Este estaría en condiciones libre y localmente semiconfinado. A partir de otros estudios considera que el acuífero no es continuo, que existe discontinuidad en el flujo subterráneo debido al descenso local de la transmisividad. El acuífero se sectorizó en Cabuza-Albarracines, Albarracines-Alto Ramírez y Alto Ramírez-Desembocadura.

DHV (1995) describió las características hidrogeológicas de la Unidad Hidrogeológica I (depósitos aluviales y fluviales del cuaternario) por sectores desde Cabuza hacia la costa, y cuyas características se presentan en la Tabla 7.80.

Tabla 7.80 Resumen de las características hidrogeológicas por sectores del valle de Azapa. Fuente: DHV (1995).

Sector	Profundidad N.E. (m)	Descenso N.E. en últimos 20 años (m)	Transmisividad (m^2/d)
Cabuza-Las Riveras	35 a 10	0 a 5	3.000 a 10.000
Las Riveras-Albarracines	10 a 0	0	150 a 250
San Miguel-Las Ánimas	30 a 5	5 a10	1.500 a 2.000
Las Ánimas- Pago de Gómez	5 a 30	10 a 20	700 a 1.500
Saucache	40 a 45	10 a 25	300 a 1.500
Costero	25 a 10	0 a 10	50 a 800

En el informe de Captagua (1996) se describió el perfil estratigráfico de un sondaje, denominado sondaje 6a o pozo Captagua nº3197, el cual está ubicado en la ciudad de Arica. Se interpretaron las pruebas de bombeo de gasto variable y gasto constante mediante la fórmula de Jacob, obteniendo una transmisividad de 41 m^2/d, y si se considera que el espesor del acuífero es de 120 m se obtiene una permeabilidad de 0,01 m/d, y al no contar con pozos de observación consideraron que el coeficiente de almacenamiento para un acuífero libre compuesto de limos, arcillas, arenas y gravas varía entre 0,15 y 0,35.

En Araneda y Avendaño (1997) se desarrolló una prospección gravimétrica en la ciudad Arica, a partir de la cual se determinó la geometría del basamento. Sin embargo, la información de este informe es muy local y detallada de la ciudad de Arica para poder extrapolarlo al resto de la cuenca.

En el mismo año, Arrau (1997) caracterizó hidrogeológicamente la cuenca del río San José y del río Lauca. En él se definió la profundidad de la Unidad Hidrogeológica I mediante una prospección gravimétrica en la ciudad de Arica y en el valle de Azapa. La descripción hidrogeológica del río San José por sectores se basó en la información de la JICA (1995). Por último, se analizó la evolución histórica del nivel freático comparando los niveles medidos en 1988 por Ayala, Cabrera y Asociados (1989) y en 1995 por Ayala, Cabrera y Asociados y AC ING (1995). Del modelo de simulación efectuado por Arrau (1997) se obtuvo la variación temporal de niveles, de la depresión y de las zonas que se secarían en el año 2005.

AC ING y Ayala, Cabrera y Asociados (1998) cuantificaron los recursos hídricos tomando como base los anteriores antecedentes, obteniendo como resultado que el acuífero del valle de Azapa se encuentra en situación de sobreexplotación. AC ING y Ayala, Cabrera y Asociados (2002) presentaron valores de permeabilidades, coeficientes de rendimiento, piezometría y balance hídrico de las unidades acuíferas del valle de Azapa, basándose también en los antecedentes preexistentes. En la Figura 7.134 se presenta la piezometría con los niveles medidos en los años 1988, 1993, 1994 y 1995.

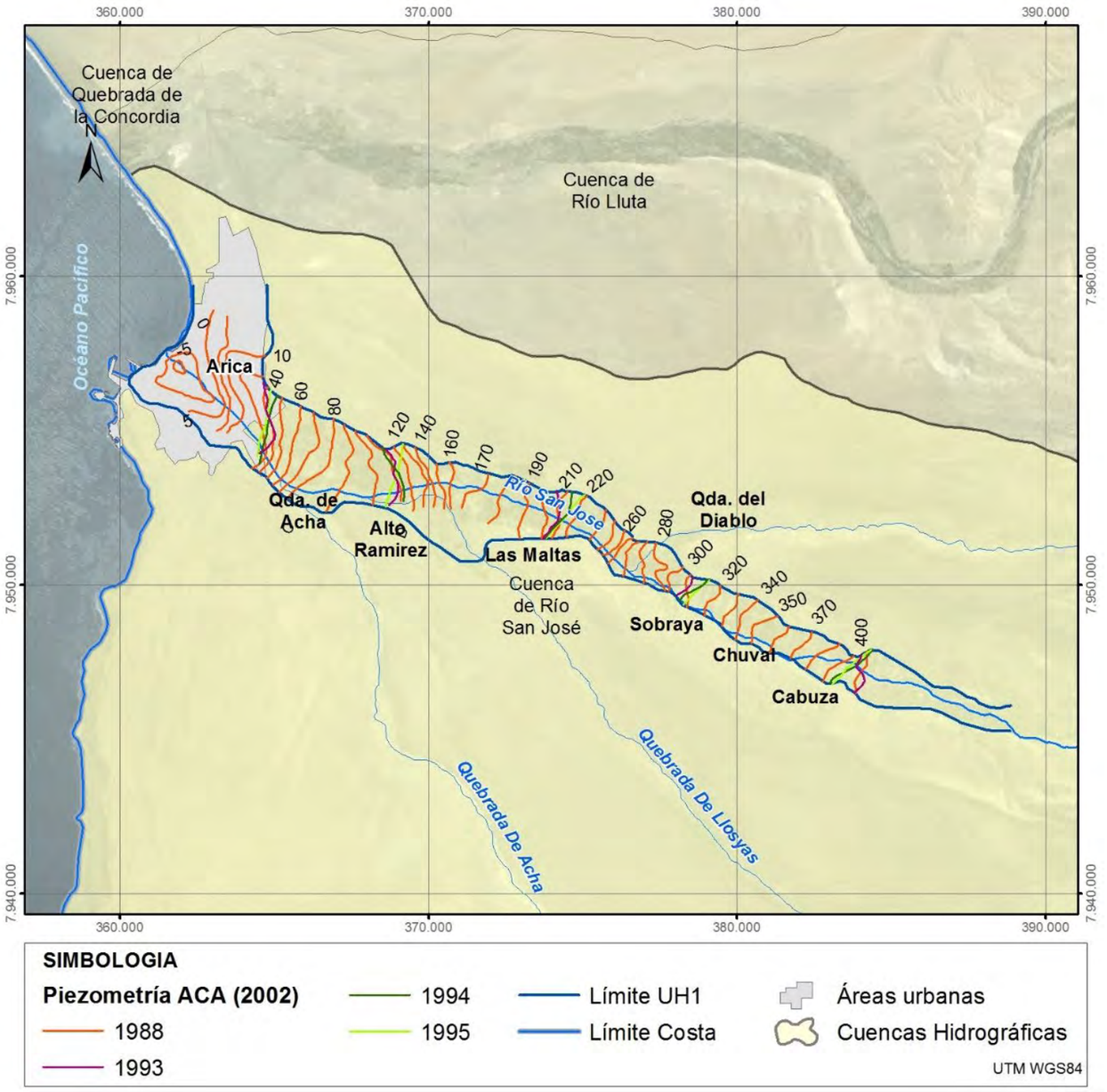


Figura 7.134 Mapa piezométrico valle de Azapa con las curvas isofreáticas de 1988, 1993, 1994 y 1995. Fuente: AC ING y Ayala, Cabrera y Asociados (2002).

AC ING (2009) elaboró un modelo de flujo subterráneo basándose en las unidades hidrogeológicas y los parámetros hidráulicos descritos por la JICA (1995), Arrau (1997), y por el "Estudio de simulación operacional cuenca del río Lauca, aguas arriba de bocatoma Canal Lauca" realizado por la Dirección de Riego en el año 1989 y de una prospección geofísica que constaba de 31 estaciones TEM efectuada por AC ING (2009).Además se analizó la evolución histórica de los niveles medidos por la DGA. En la Figura 7.135 se muestra la ubicación de los puntos TEM medidos en el estudio de AC ING (2009).

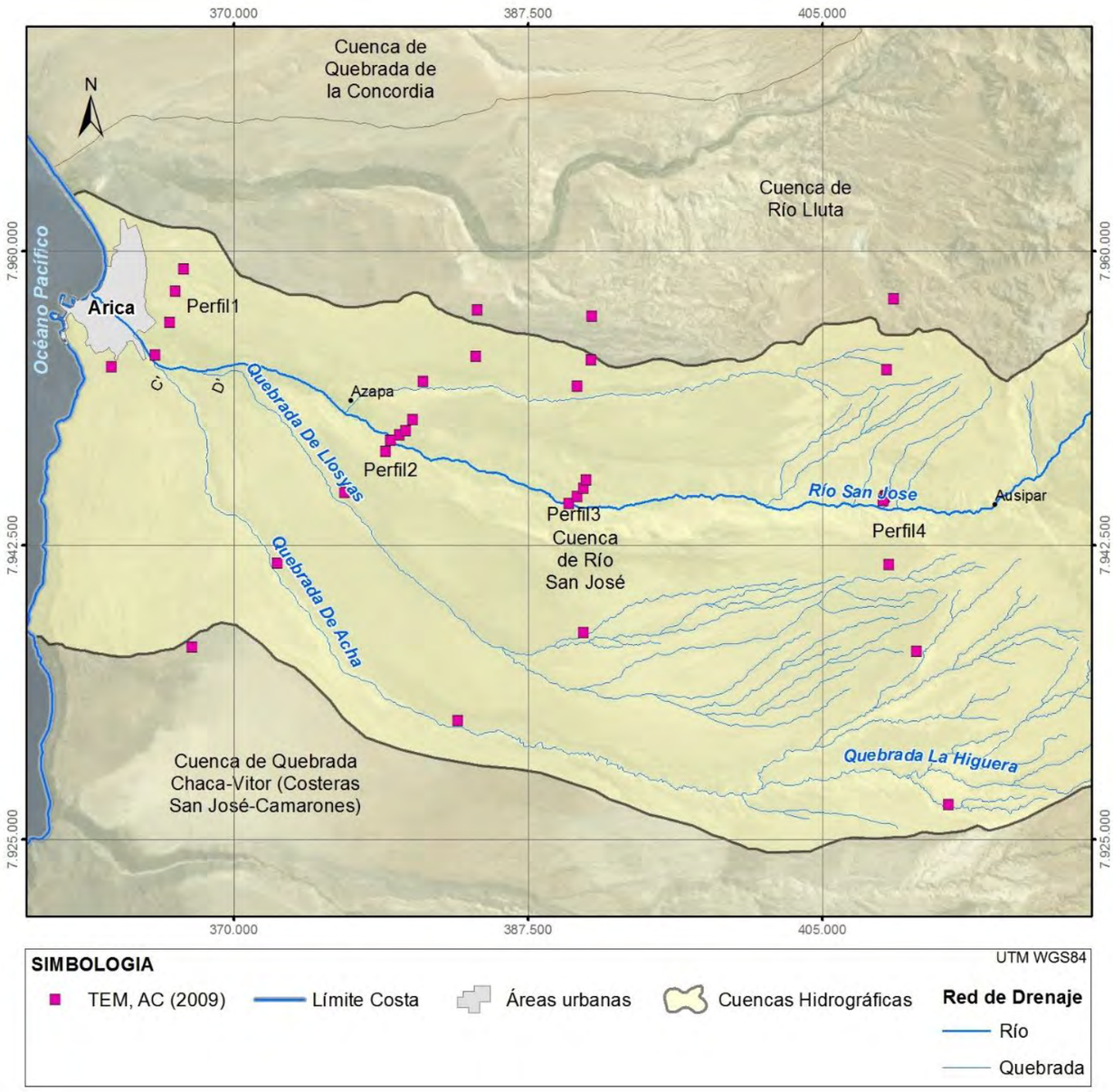


Figura 7.135 Ubicación de las mediciones TEM realizadas por AC ING (2009) en el valle de Azapa. Fuente: modificado de AC ING (2009).

En el estudio del INH (2014) se caracterizó la Unidad Hidrogeológica I del valle de Azapa basándose en los antecedentes y el desarrollo de pruebas de infiltración, pruebas de bombeo y una prospección geofísica, con el fin de desarrollar un modelo numérico de flujo de agua subterránea y el balance hídrico de la cuenca.

7.4.3.2 Definición y caracterización de las unidades hidrogeológicas

En esta sección se identificaron las unidades hidrogeológicas existentes en la cuenca del río San José a partir de los antecedentes, el mapa geológico 1:250.000 de García *et al.* (2004) y del mapa hidrogeológico de Chile 1:1.000.000 (DGA, 1987):

- Unidad Hidrogeológica I (importancia alta): materiales detríticos no consolidados o semiconsolidados. Corresponden a los depósitos fluviales y aluviales del Holoceno y Pleistoceno y depósitos litorales compuestos por gravas, arenas, limos y arcillas. Según Ayala, Cabrera y Asociados (1989) posee una potencia de 70 m, alcanza un ancho de 3.500 m en la desembocadura al mar y disminuye progresivamente hacia aguas arriba hasta alcanzar 1.000 m en Cabuza. JICA (1995) definió una capa impermeable intercalada irregular que semiconfinaría la parte inferior de la unidad acuífera. Los antecedentes diferencian en esta unidad 3 sectores por la discontinuidad en el flujo subterráneo provocado por disminuciones locales de transmisividad: Cabuza-Albarracines, Albarracines-Alto Ramírez y Alto Ramírez-Desembocadura. Esta unidad se encuentra desde Ausipa hasta la desembocadura. Es un acuífero con permeabilidad primaria y libre.
- Unidad Hidrogeológica II (importancia alta-media): corresponden a los volcanes del Mioceno Superior. Los volcanes Margarita y Familiari tienen una permeabilidad primaria baja a nula, pero por fracturación presentan una importancia hidrogeológica media-alta. Se caracterizan por tener familias de fracturas conectadas que originan acuíferos colgados y/o recargan otras unidades hidrogeológicas.
- Unidad Hidrogeológica III (importancia media): constituida por los depósitos salinos. Esta unidad se ubica en la Depresión Central. Corresponden a mantos subhorizontales de sales, limos y costras salinas, de espesor centimétrico a métrico, y colores blanco y amarillo, los cuales se distribuyen en la parte occidental de la depresión Central. Esta unidad constituye un medio de porosidad primaria y secundaria por disolución de sales.

- Unidad Hidrogeológica IV (importancia media-baja): corresponden a materiales detríticos semiconsolidados o consolidados. Compuesta por los depósitos glaciares, lacustres, palustres, eólicos y coluviales (unos 50 m de espesor) del cuaternario, de remoción en masa del Plioceno-Cuaternario, fluviales del Plioceno, de avalancha del Lluta del Mioceno Superior, a las Formaciones Huaylas, El Diablo y Azapa y a depósitos aluviales de la Cordillera de la Costa. Esta unidad se caracteriza por presentar una porosidad intergranular.
- Unidad Hidrogeológica V (importancia baja): comprende a una secuencia de rocas volcánico-sedimentarias, volcánicas, sedimentarias consolidadas y/o flujos piroclásticos de tobas, de variada litología y se encuentra moderada a intensamente plegada y fracturada. Serían volcanes y remanentes de volcanes, las Formaciones Oxaya, Lupica, Livilcar y Joracane, estratos Quichoco y las tobas correspondientes a la Ignimbrita Lauca, Ignimbrita Oxaya, Formación Oxaya y a las dos ignimbritas que constituyen la Formación Lupica (Ignimbrita del Cordón de Belén y otro miembro de ignimbrita, areniscas y conglomerados). La porosidad intergranular de estos materiales es muy baja, sin embargo pueden presentar puntualmente fracturas conectadas.
- Unidad Hidrogeológica VI (importancia baja a muy baja): engloba a las secuencias volcanosedimentarias del Jurásico y Cretácico. Se ubica en el sector bajo de la cuenca y está compuesta por la Formación Camaraca, Los Tarros y Atajaña. Se caracteriza por presentar una porosidad primaria nula y bajo grado de fracturación.
- Basamento: corresponde a las rocas intrusivas y al complejo metamórfico de Belén.

Los antecedentes consideran a partir de la prospección geofísica realizada en el valle de Azapa, que el basamento aguas abajo de Ausipar se encuentra a 270 m de profundidad, en el sector de Cabuza estaría a 100 m, en el sector de San Miguel asciende a 80 m de profundidad y en el sector Las Maitas desciende el basamento a 190 m.

En la Tabla 7.81 se resumen las unidades hidrogeológicas según la importancia hidrogeológica y tipo de permeabilidad presente en la cuenca del río San José, y en la

Figura 7.136 se muestra un mapa de las unidades según la importancia hidrogeológica presentes en la cuenca del río San José.

Tabla 7.81 Resumen de las unidades hidrogeológicas de la cuenca del río San José. Fuente: elaboración propia.

Cuenca	Unidad Hidrogeológica	Descripción	Tipo de permeabilidad	Importancia hidrogeológica	Tipo de Unidad
Río San José	I	Depósitos aluviales y fluviales Depósitos litorales	Primaria	Alta	Acuífero
	II	Complejos volcánicos	Secundaria	Alta-media	Acuíferos fracturados
	III	Depósitos salinos	Primaria Secundaria	Media	Supuestamente Acuitardo
	IV	Depósitos coluviales Depósitos lacustres Depósitos glaciares Depósitos palustres Depósito eólico Depósitos fluviales del Plioceno Depósitos de remoción en masa Depósitos de avalancha Depósitos aluviales de la Cordillera de la Costa Formación Huaylas Formación El Diablo Formación Azapa	Primaria	Media-baja	Supuestamente Acuitardo
	V	Ignimbrita Lauca Ignimbritas y dacitas Formación Oxaya Formación Lupica Formación Livilcar Formación Joracane Estratos Quichoco Remanentes de volcanes del Mioceno	Secundaria	Media-Baja	Supuestamente Acuitardo
	VI	Formación Camaraca Formación Atajaña Formación Los Tarros	Secundaria	Baja	Supuestamente Acuícludo

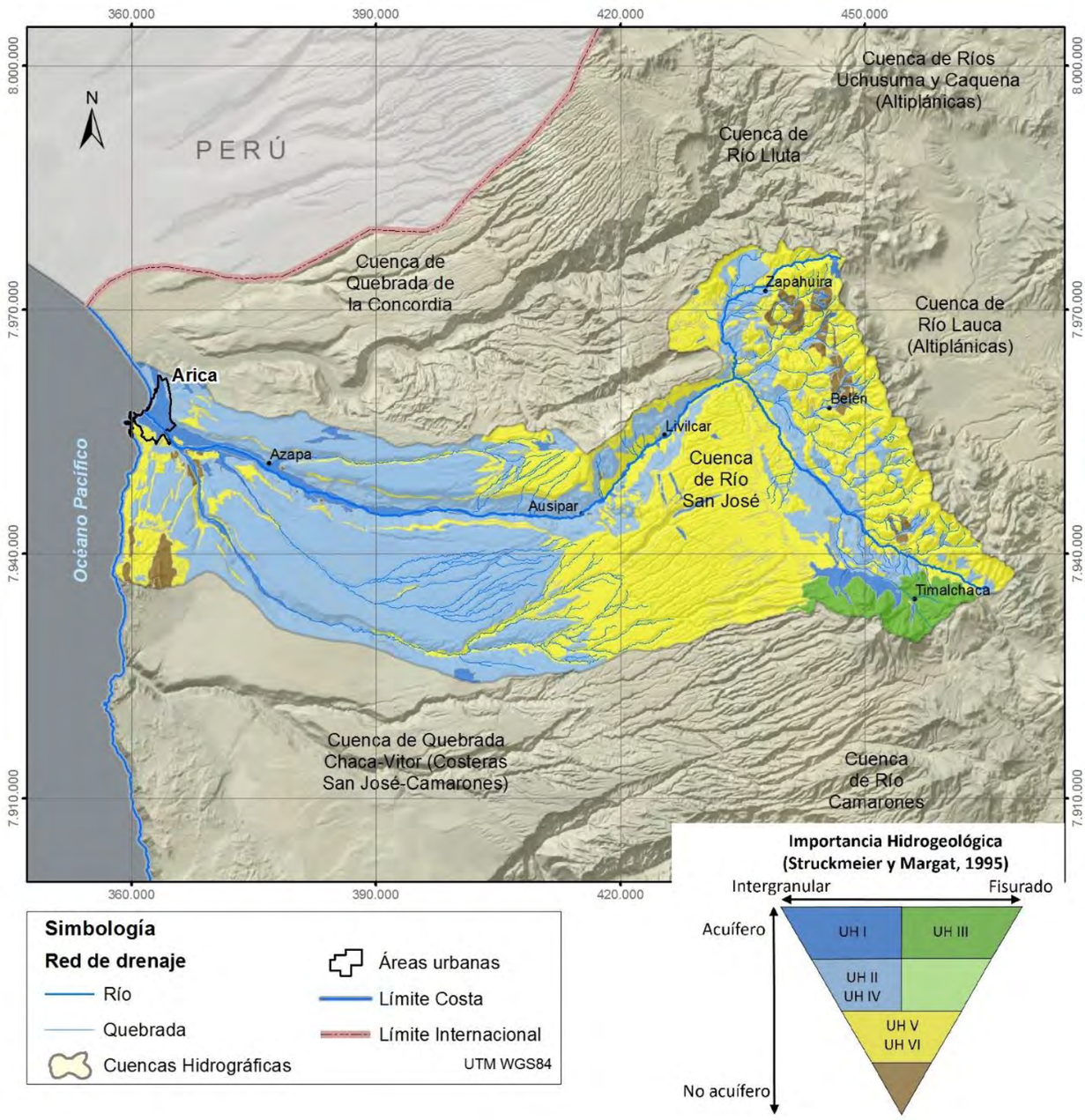


Figura 7.136 Mapa de las unidades según la importancia hidrogeológica presentes en la cuenca del río San José. Fuente: elaboración propia.

7.4.3.3 Parámetros hidráulicos

La Unidad Hidrogeológica I presenta valores de parámetros hidráulicos estimados por varios autores mediante la interpretación de pruebas de bombeo, pero desde Cabuza hacia aguas arriba no existen pozos que permitan estimar los parámetros hidráulicos de las unidades acuíferas. En las unidades hidrogeológicas que no presentan antecedentes se consideraron los valores de los parámetros hidráulicos de materiales geológicos similares en la bibliografía.

Los parámetros hidráulicos de la Unidad Hidrogeológica I fueron estimados inicialmente por Díaz *et al.* (1972) mediante el método de Cooper-Jacob, obteniendo una transmisividad que varía entre 2.000 y 1 m^2/día y un rango de conductividad hidráulica entre 23 y 0,02 m/día. Posteriormente, Ayala, Cabrera y Asociados (1989) interpretaron las pruebas de gasto variable y de gasto constante efectuadas en los sondajes, resultando una transmisividad que varía entre 10.000 m^2/día y 50 m^2/día. Los valores de transmisividad disminuyen en profundidad y longitudinalmente desde las zonas altas hacia la línea de costa. En la Figura 7.137 se muestra la distribución espacial de los valores de transmisividad estimados en el valle de Azapa. Al no existir pozos de observación, Ayala, Cabrera y Asociados (1989) estimó un valor de coeficiente de almacenamiento del 10% o entre el 5 y 13%, basándose en otros autores.

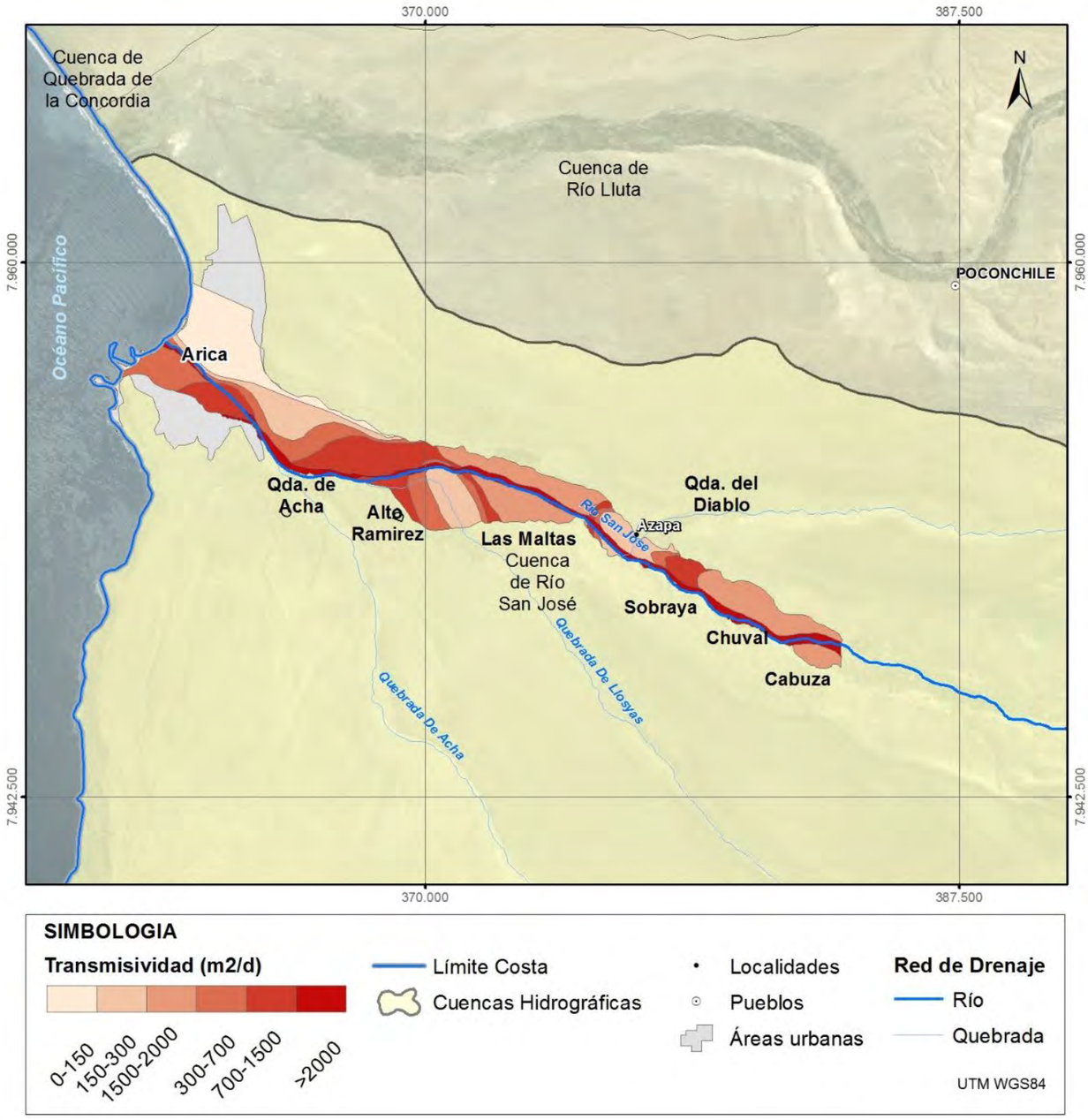


Figura 7.137 Distribución espacial de los valores de transmisividad en el valle de Azapa. Fuente: modificado de Ayala, Cabrera y Asociados (1989).

JICA (1995) estimó los valores de los parámetros hidráulicos obtenidos en 10 sondajes. Los valores de transmisividad varían entre 30 a 3.526 m^2/día, con un promedio de 1.344 m^2/día, siendo la zona de San Miguel la menos transmisiva, cuya permeabilidad oscila entre 0,66 y 96 m/día, con promedio de 30 m/día, el coeficiente de almacenamiento entre $3,28x10^{-5}$ % y 3,68%, con un promedio de 1,18%, y por último con un caudal específico promedio de 351 l/s/m.

En la Tabla 7.83 se muestran las características hidrogeológicas de la Unidad Hidrogeológica I (depósitos aluviales y fluviales del cuaternario) por sector, desde Cabuza hacia la costa, y descritas en DHV (1995).

Tabla 7.82 Resumen de las características hidrogeológicas por sectores del valle de Azapa. Fuente: DHV (1995).

Sector	Profundidad N.E. (m)	Descenso N.E. en últimos 20 años (m)	Transmisividad (m^2/día)
Cabuza-Las Riveras	35 a 10	0 a 5	3.000 a 10.000
Las Riveras-Albarracines	10 a 0	0	150 a 250
San Miguel-Las Ánimas	30 a 5	5 a10	1.500 a 2.000
Las Ánimas- Pago de Gómez	5 a 30	10 a 20	700 a 1.500
Saucache	40 a 45	10 a 25	300 a 1.500
Costero	25 a 10	0 a 10	50 a 800

El INH (2014) realizó un análisis de las pruebas de bombeo en 19 captaciones mediante el método de Theis con corrección de Dupuit, cuya ubicación de estas captaciones se muestra en la Figura 7.138. Los valores de transmisividad obtenidos varían entre 428 y 2 m^2/día y un promedio de 80 m^2/día y una permeabilidad máxima de 110 m/día y mínima de 0,6 m/día y un promedio de 15 m/día. Además para el modelo numérico del valle de Azapa se realizó un nuevo catastro que incluyó 82 captaciones con expediente DGA, y en las cuales se analizaron las pruebas de bombeo por medio del software Aquifer Test, para 39 captaciones, en su mayoría de tipo noria, obteniendo valores de permeabilidad entre 0,2 y 30 m/día para los rellenos fluviales del valle de Azapa. INH (2014) presenta los datos de las pruebas de bombeo realizadas en 11 pozos en el periodo 1993-2011. En el presente estudio se reinterpretaron dichas pruebas de bombeo mediante el programa AQTESOLV y se consideró un espesor de 80 m constante en los 11 pozos debido a la falta de información de la estratigrafía y habilitación de los pozos. Se obtuvo un rango de

transmisividad de 10.000 a 650 m^2/día, siendo un promedio de 3.600 m^2/día y una conductividad hidráulica que varía entre 8 y 125 m/día.

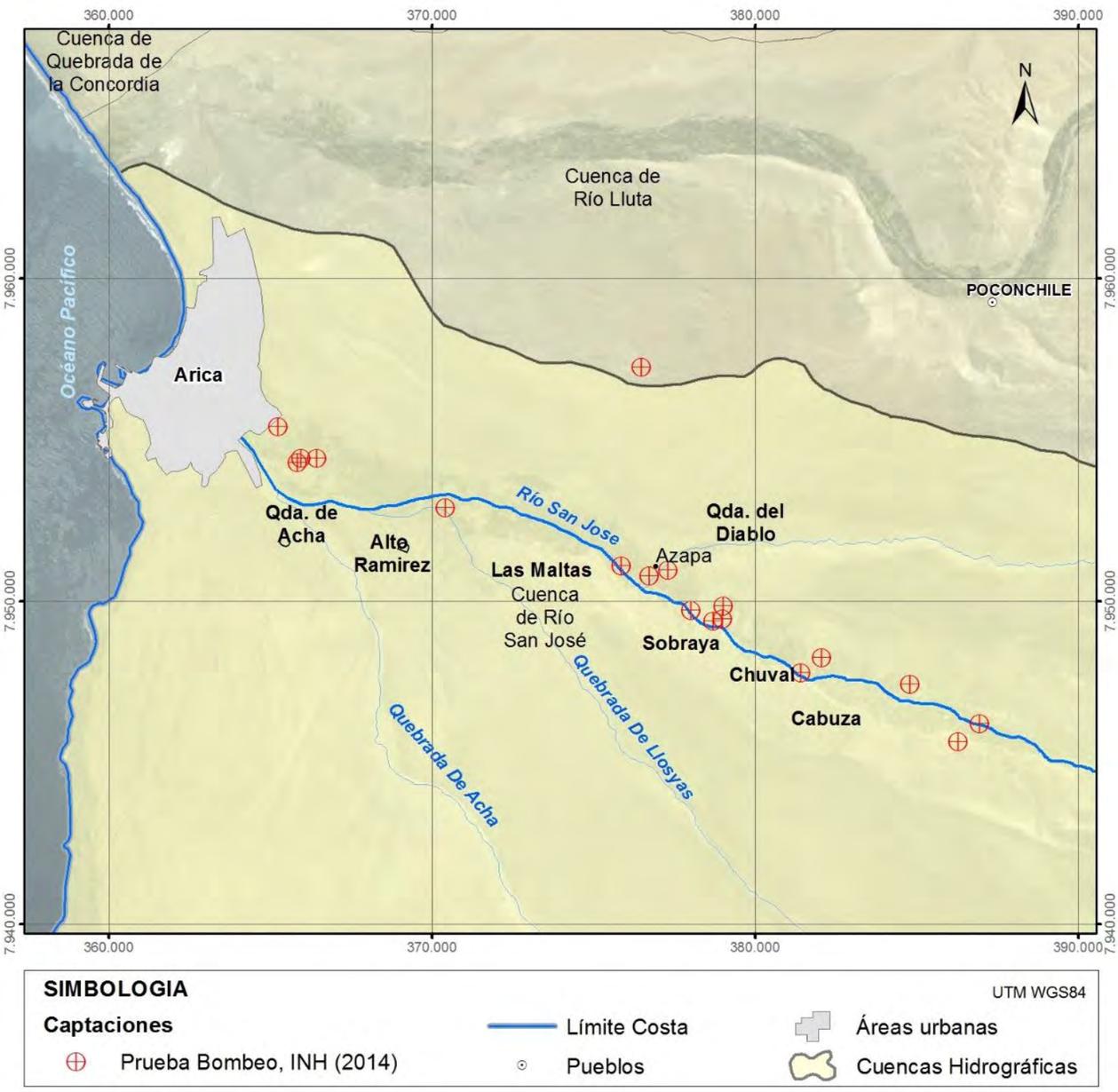


Figura 7.138 Ubicación de los pozos donde el INH (2014) realizó pruebas de bombeo. Fuente: modificado de INH (2014).

En la Tabla 7.83 se presenta un resumen de los parámetros hidráulicos de cada una de las unidades hidrogeológicas definidas en la cuenca del río San José. En ésta se consideraron los valores de los parámetros hidráulicos de la Unidad Hidrogeológica I estimados en el presente estudio y en el resto de unidades se han entregado valores de parámetros referenciales de acuerdo a la literatura existente y a unidades de roca similares.

Tabla 7.83 Resumen de los parámetros hidráulicos de cada unidad hidrogeológica de la cuenca del río San José. Fuente: elaboración propia.

Cuenca	Unidad Hidrogeológica	Régimen	T (m^2/día)	K (m/día)	Ss (m^{-1})	Sy (%)	Observaciones
Río San José	I	Libre	650 – 10.000	8-125		0,02-0,22	T, K base a la reinterpretación de las pruebas de bombeo de ICASS (2016) Sy estimado por INH (2014)
	II	Libre		$1E^{-2}$-$1E^{2}$		--	K estimado por Aquaconsult (2010) depósitos volcánicos.
	III	Libre		$8E^{-7}$ – $2E^{-3}$	--	--	K estimado por Domenico y Schwartz (1990) para rocas sedimentarias
	IV	Libre		$1E^{-6}$ – $5E^{-1}$		--	K estimado por Domenico y Schwartz (1990) para rocas sedimentarias
		Confinado			--		
	V	Libre		$1E^{-5}$-1	--		K estimado por Aquaconsult (2010) de la Fm. Lupica. S por Domenico y Mifflin (1965)
		Confinado			E^{-6}-$7E^{-5}$	--	
	VI	Libre		$2E^{-6}$-$3E^{-2}$		--	K estimado por Domenico y Schwartz (1990) para basaltos y S por Domenico y Mifflin (1965)
		Confinado			$3E^{-6}$		

7.4.3.4 Piezometría

La piezometría elaborada en los antecedentes se acotan al tramo del valle de Azapa entre el sector de Cabuza y la línea de costa, en el resto de la cuenca del río San José no existen antecedentes debido a que no se han perforado pozos de observación y menos de bombeo. Los niveles piezométricos varían en el tiempo y en los sectores debido principalmente a los aportes de las crecidas del río San José, de la intensidad de la explotación en los pozos del valle de Azapa y por la condición hidrológica que se presente, es decir, años húmedos, normales o secos.

La evolución histórica de los niveles de los pozos ubicados en el valle de Azapa ha sido analizada desde la década de los años 60. En el sector Cabuza antes del transvase del río Lauca, año 1962, el nivel freático se encontraba entre 38 y 40 m de profundidad, sin embargo, según Ayala, Cabrera y Asociados (1989) una vez que entró en operación el canal Lauca los niveles ascendieron entre 4,5 y 5 m de profundidad. Hasta la década de los años 90 existió un progresivo descenso en los niveles freáticos, pero en el año 1998 se identificó un ascenso en los niveles, el que se debió al fin de la sequía y la recarga de la infiltración de agua durante las crecidas del río San José. Posteriormente, continuó el descenso de los niveles debido a las extracciones en los pozos, sobre todo entre los sectores Pago de Gómez y Arica. Ayala, Cabrera y Asociados (1989) elaboraron un mapa piezométrico con los niveles medidos en junio de 1988. Arrau (1997) comparó estos niveles del año 1988 con los registrados en el año 1995 medidos por Ayala, Cabrera y Asociados y AC ING (1995), observando que el nivel en el sector de Cabuza se mantuvo prácticamente constante, pero aguas abajo descendió entre 10 y 20 m según el sector del valle de Azapa.

Para analizar la evolución temporal del nivel freático de la Unidad Hidrogeológica I en el valle de Azapa se tomó el registro de nivel que mide la DGA, sin embargo no se encontró la estratigrafía y la habilitación de estos pozos. La DGA efectúa el monitoreo en 50 pozos desde 1960 hasta la actualidad, pero no de manera continua. Sin embargo, se ha analizado el nivel de 37 pozos debido a que se conoce su ubicación, definida en AC ING (2009). A continuación se describe la evolución de los niveles por sector, tal como se muestra en la Figura 7.139.

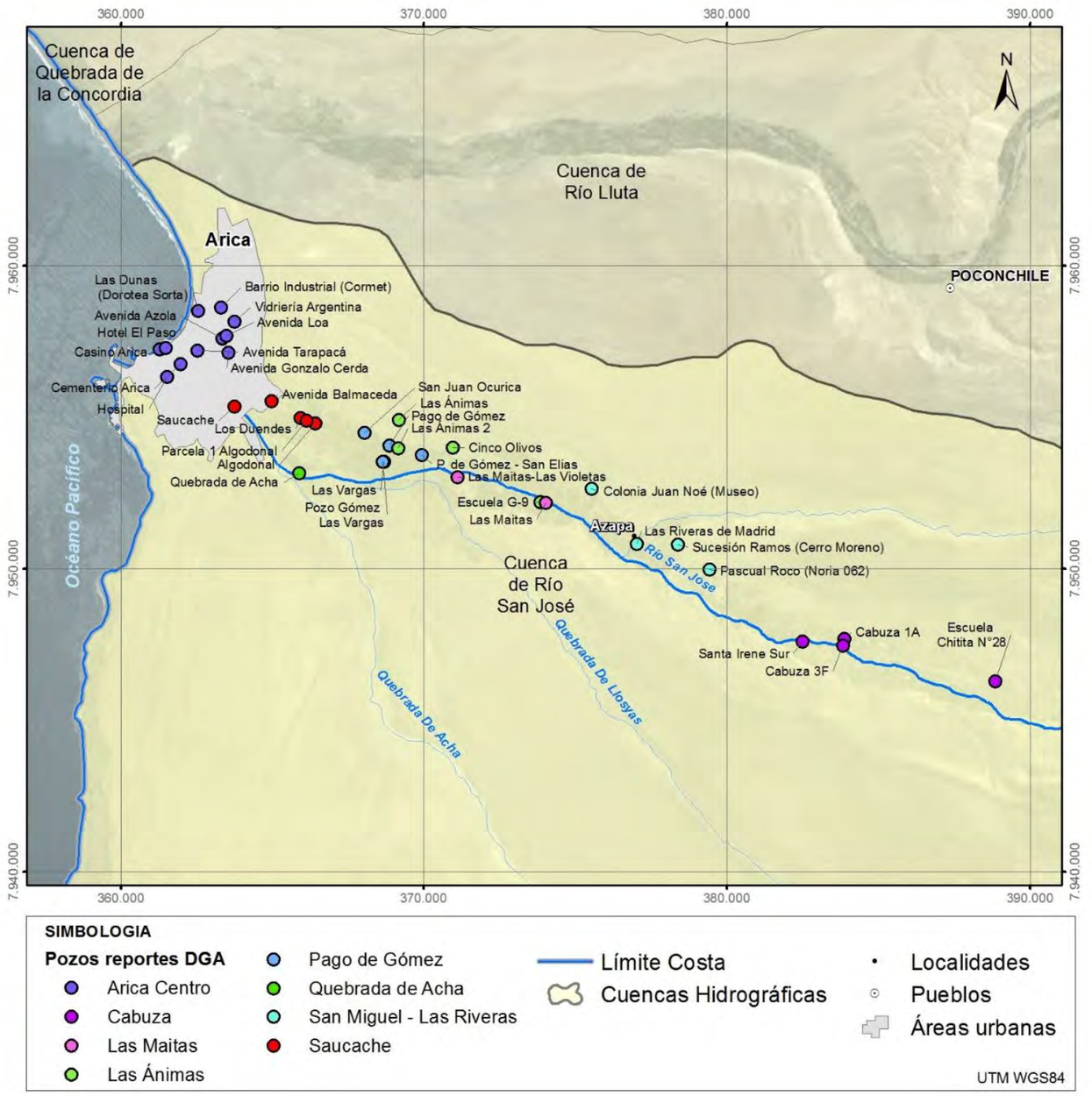


Figura 7.139 Ubicación de los pozos con registro de medición de niveles de la DGA. Fuente: elaboración propia.

En la Figura 7.140 se muestra la evolución de la profundidad en la que se encuentra el nivel en 11 pozos ubicados en el sector de la ciudad de Arica durante diferentes periodos comprendidos entre los años 1973 y 2013. En el año 1973 el nivel se encontraba a 30 o 24 m de profundidad, ascendió hasta los 10-15 m en el año 1976-1978, después desciende hasta los 27 m de profundidad en el año 1986-1987. A partir de esta fecha no se tiene un registro continuo. Sin embargo, el nivel en los pozos ubicados en el norte de Arica y próximos a la costa (Casino, Las Dunas y Hotel El Paso) se mantiene en una profundidad comprendida entre 2 y 8 m sin variaciones relevantes entre los años 1989 hasta 2013.

A continuación, se analizó la relación entre los niveles piezométricos del acuífero del valle del Azapa con los caudales registrados en la estación fluviométrica Ausipar y por otro lado, con las precipitaciones registradas en la estación meteorológicas Azapa. Según se puede observar en la Figura 7.140, no existe una correlación inmediata entre el caudal del río San José en Ausipar y de las precipitaciones de la zona con el nivel piezométrico de los sondajes, debido a que el acuífero responde y refleja principalmente el régimen de bombeo o extracciones, que es de mayor magnitud, que el caudal y precipitaciones que lo recargan.

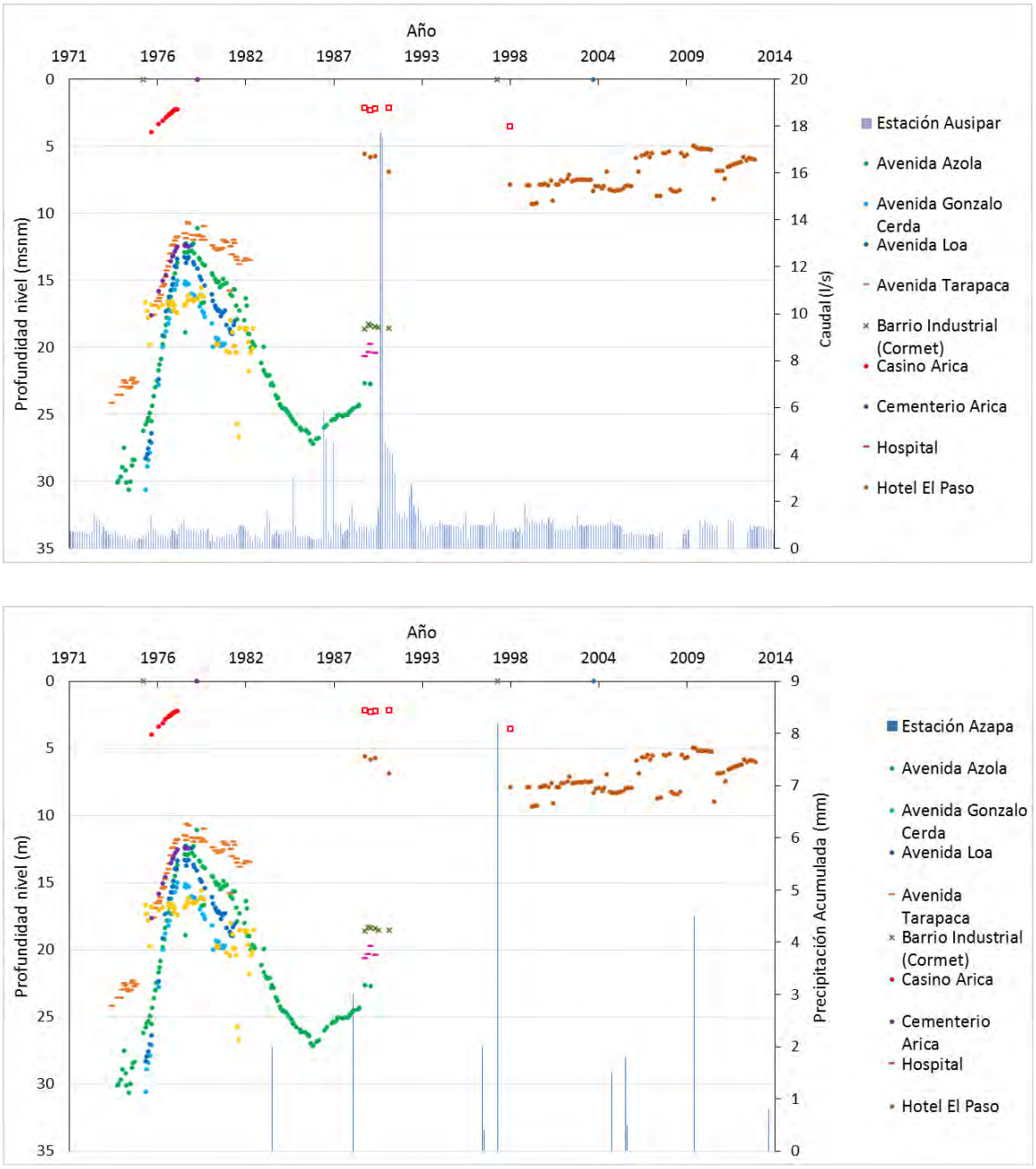


Figura 7.140 Evolución histórica de la profundidad del nivel en los pozos ubicados en el sector Arica Centro en el periodo 1973 – 2013 2006 con relación a la precipitación y el caudal. Fuente: elaboración propia.

Aguas arriba, en el sector Saucache, se analizó el registro del nivel de profundidad en 6 pozos desde el año 1973 al 2006. En la Figura 7.141 se muestra que en el año 1973 el nivel estaba a 43 m de profundidad en el pozo "Los Duendes", sin embargo, sufrió un ascenso hasta los 10-18 m en el año 1978 según el pozo, y del mismo modo que se muestra en el sector de la ciudad de Arica. Después descendieron los niveles hasta los

35 m en el pozo "Saucache" para volver a ascender varios metros en 1988 y luego descender hasta los 60 m de profundidad en el año 1998. Estas variaciones son similares en todos los pozos menos en el pozo "Avenida Balmaceda", donde el nivel se mantiene prácticamente constante entre los 17 y 23 m de profundidad desde 1975 hasta 2006.

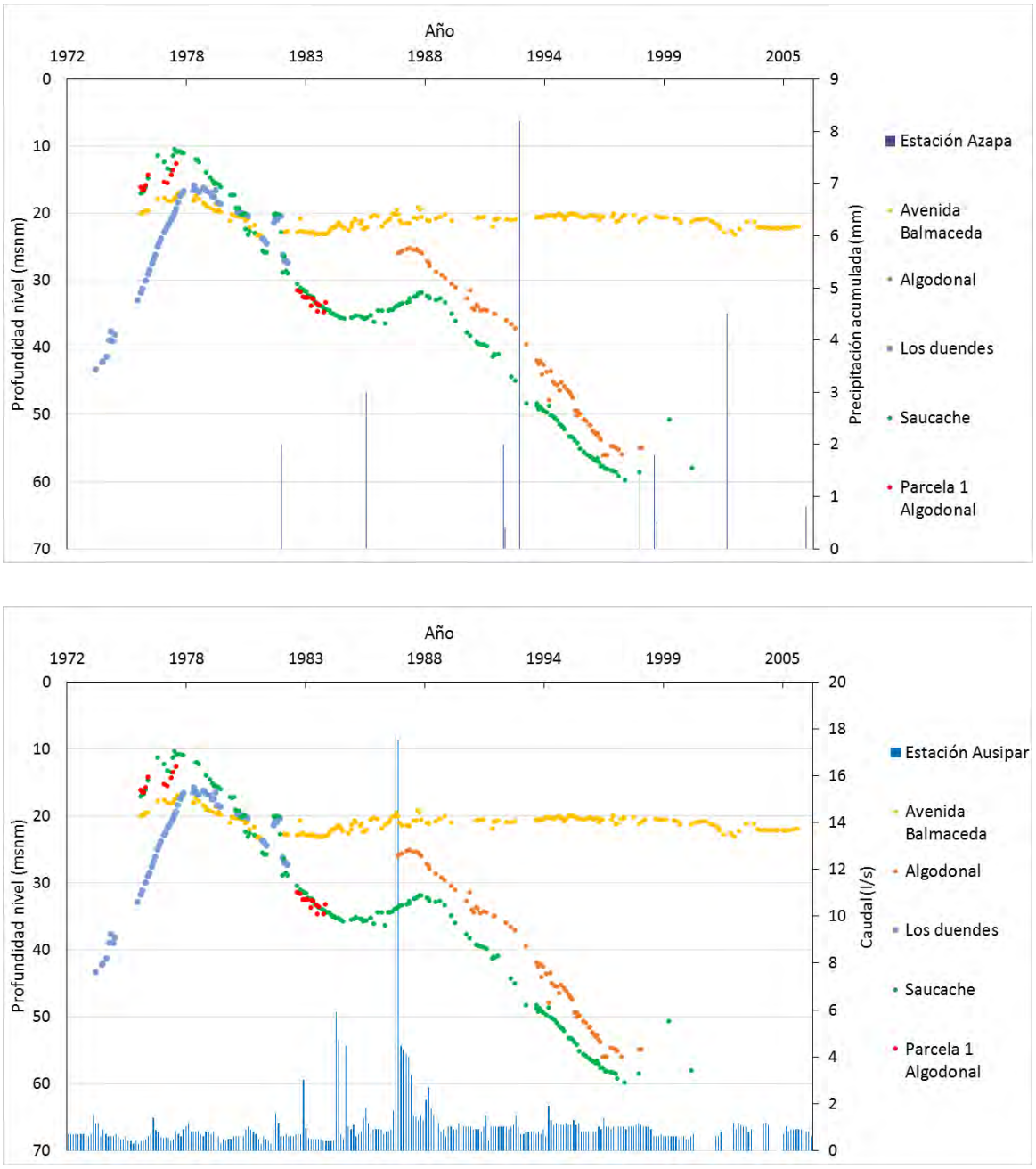


Figura 7.141 Evolución histórica de la profundidad del nivel en los pozos ubicados en el sector Saucache en el periodo 1973 - 2006 con relación a la precipitación y el caudal. Fuente: elaboración propia.

En la Figura 7.142 se muestra la evolución de los niveles en 3 pozos ubicados en la quebrada Acha y 8 pozos en el sector Pago de Gómez desde el año 1962 al 2014. En los años 60 el nivel en el pozo "Pozo Gómez Las Vargas" se mantenía entre los 33 y 30 m, pero en el año 1977 los niveles ascendieron entre los 11 y 20 m de profundidad en la mayoría de los pozos. Luego hubo un ascenso de nivel en el año 1987 en el pozo

"Las Vargas". Posteriormente, el nivel descendió hasta los 50 m de profundidad a finales de los años 90, que aumentó hasta 20-15 m en los años 2001-2002. Después en el pozo "Las Vargas" desciende el nivel hasta los 50 m en el año 2011 y luego asciende a 42 m de profundidad

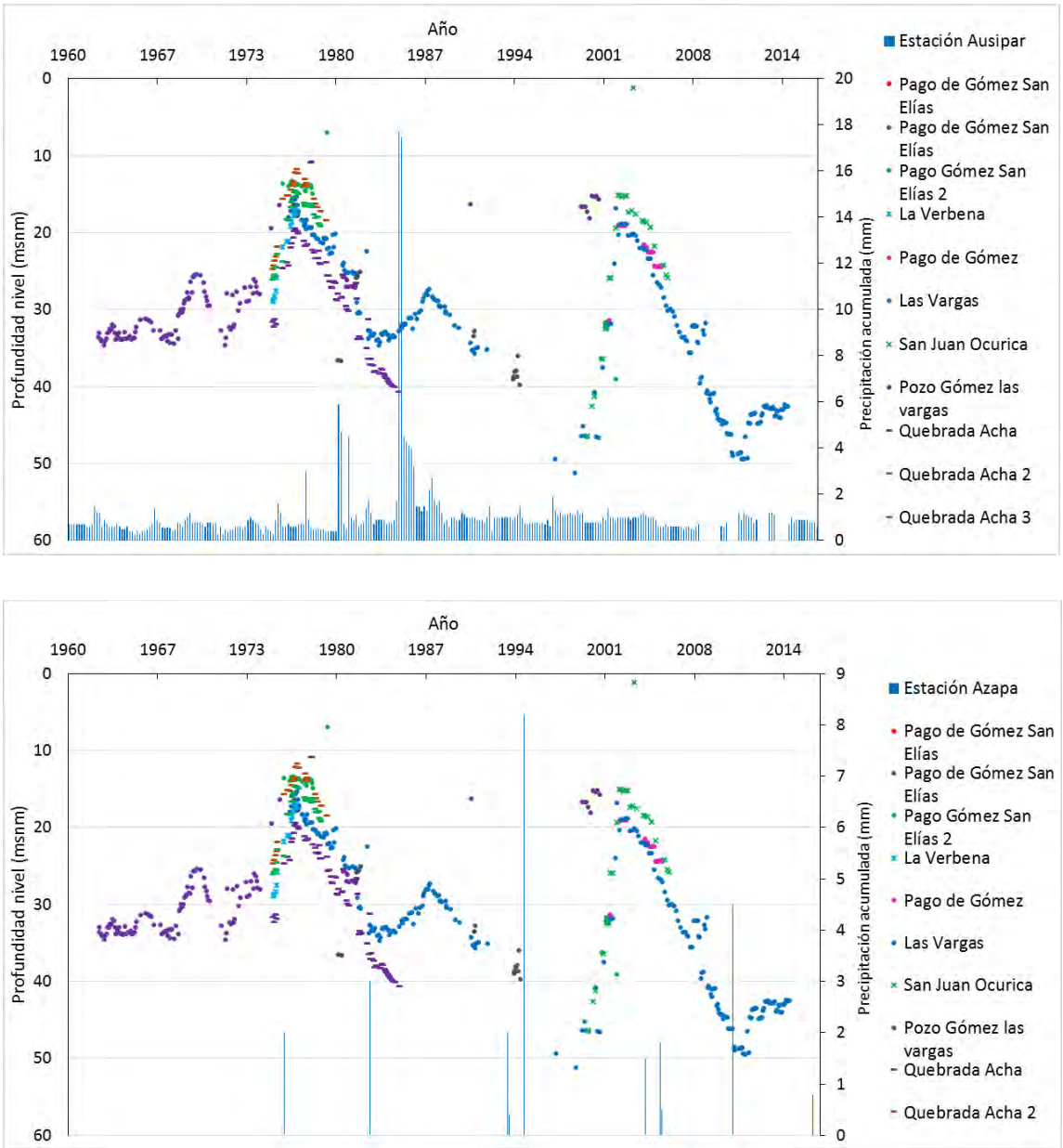


Figura 7.142 Evolución histórica de la profundidad del nivel en los pozos ubicados en los sectores quebrada de Acha y Pago de Gómez, en el periodo 1962 - 2014 con relación a la precipitación y el caudal. Fuente: elaboración propia.

En la Figura 7.143 se presenta la evolución de los niveles de 6 pozos ubicados en los sectores Las Ánimas y Las Maitas entre los años 1973 y 2007. El nivel en el pozo "Olivares Azapa 2" en el año 1973 se encontraba a 42 m de profundidad, el que luego ascendió hasta los 15 m en el año 1978, pero a partir de este año volvió a bajar hasta los 36 m en 1985. Desde 1989 hasta 1994 los niveles descendieron de 27 a 36 m de profundidad en el pozo las Ánimas. Posteriormente, en el pozo "Las Maitas" en el año 1999 el nivel estaba a 29 m y ascendió hasta los 6-8 m en los años 2003 y 2004 para volver a descender hasta los 17 m en el año 2007.

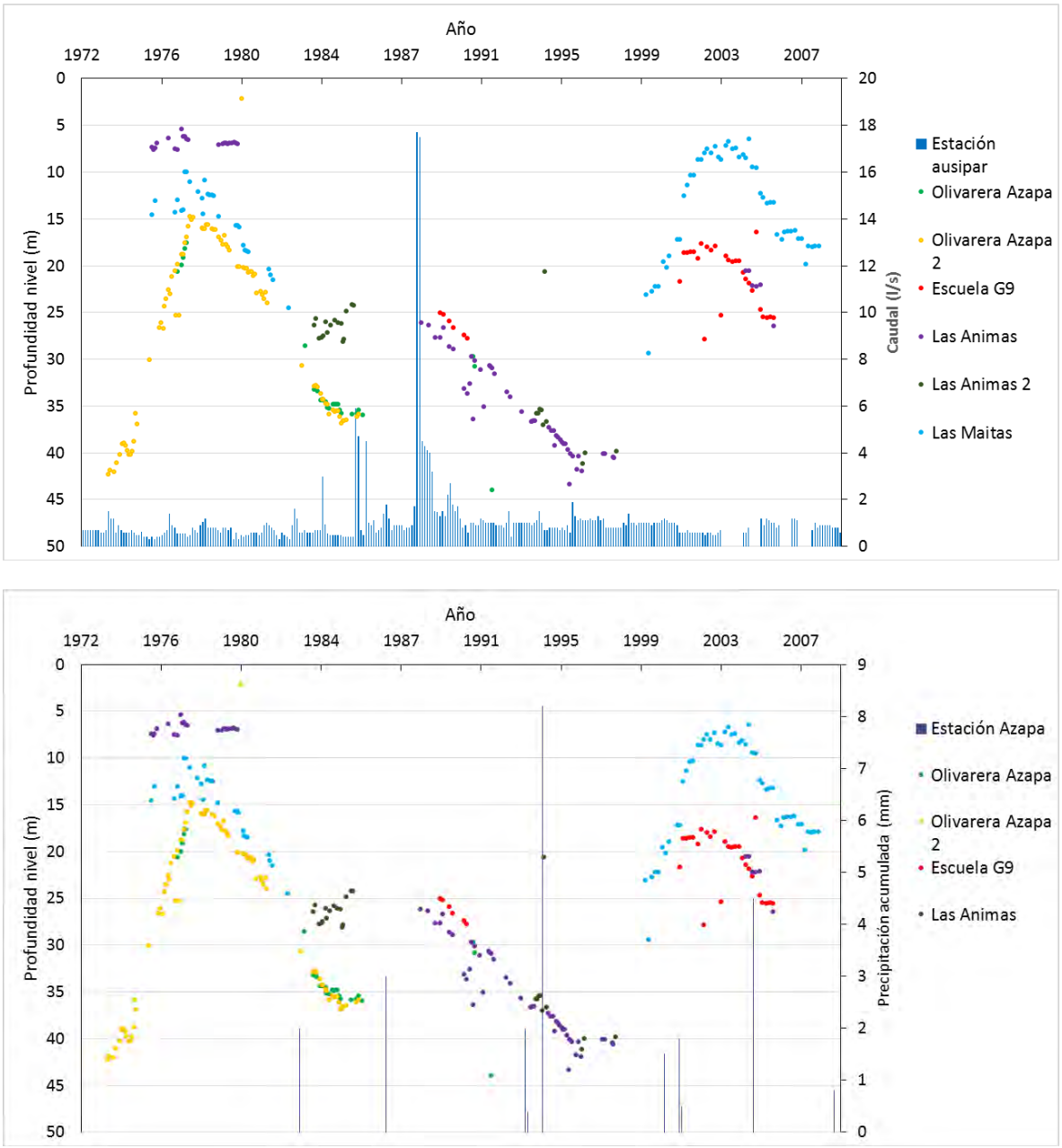


Figura 7.143 Evolución histórica de la profundidad del nivel en los pozos ubicados en los sectores Las Ánimas y Las Maitas, en el periodo 1973 – 2007 con relación a la precipitación y el caudal. Fuente: elaboración propia.

En la Figura 7.144 se muestran los niveles de los 9 pozos que se encuentran en los sectores de San Miguel, Las Riveras y Cabuza en el periodo 1962 - 2015. Los niveles en este sector son generalmente más someros que en el resto de sectores. El mayor registro histórico prácticamente continuo desde 1962 hasta 2013 se presenta en el pozo "Las Riveras de Madrid". En este pozo el nivel se encontraba a 14 m en 1962, pero en un año más fue ascendió hasta los 2 m de profundidad, después descendió

hasta los 8 m en 1967, ascendió hasta los 2 m en 1968, descendió a 5 m en 1971 y luego ascendió a 1 m de profundidad en 1974 y se mantuvo constante hasta 1989, que descendió hasta los 20 m en 1997. Después ascendió hasta 1-2 m en 2001 y se mantuvo constante un par de años hasta que volvió a descender a 11 m en el año 2009. Generalmente, en el resto de pozos se producen los mismos ascensos y descensos que en el pozo "Las Riveras de Madrid", pero los niveles se encuentran a mayor profundidad. En el sector Cabuza se presenta el registro de 3 pozos muy acotados en el tiempo, desde 1975 a 1979, y cuyos niveles oscilan entre 23 a 27 o 31 m.

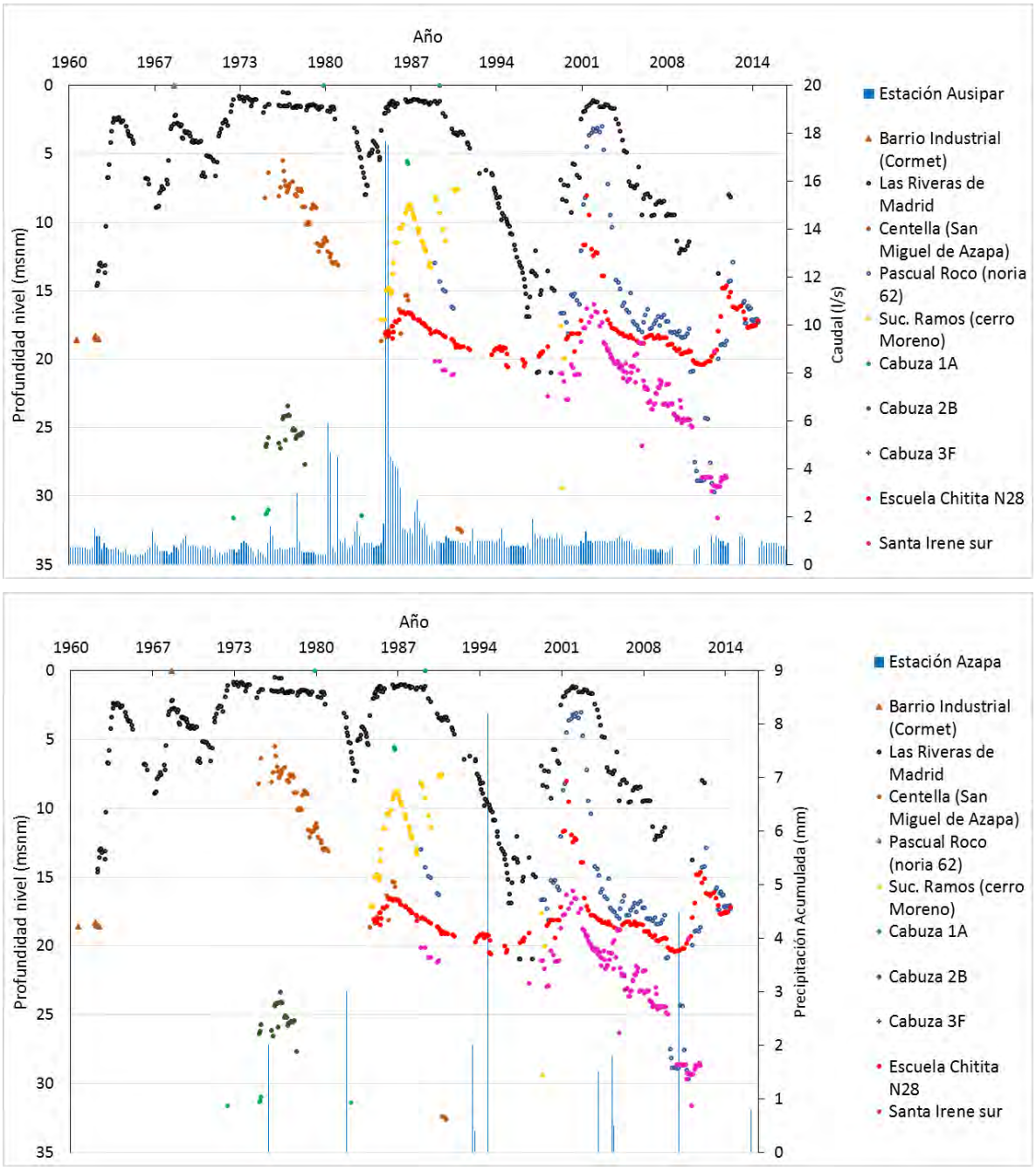


Figura 7.144 Evolución histórica de la profundidad del nivel en los pozos ubicados en los sectores San Miguel, Las Riveras y Cabuza, en el periodo 1962 - 2015 con relación a la precipitación y el caudal. Fuente: elaboración propia.

Resumiendo, la mayor variación de niveles se produce en el sector Saucache y Pago de Gómez debido a que es la zona con mayor explotación del valle de Azapa. Los aumentos del nivel freático registrados en el valle de Azapa históricamente se relacionan directamente con las crecidas sufridas en el río San José, tal como ha

sucedido en los años 1977, 1987 y 2001, mientras que los descensos de nivel son causados por épocas de mayor o menor explotación en los pozos y de sequía. Desde principios de los años 2000 los niveles han sufrido un continuo y progresivo descenso en el tiempo hasta la actualidad.

En el reciente estudio del INH (2014) realizan un monitoreo de nivel en 16 pozos durante 14 meses (desde febrero de 2013 hasta abril de 2014) y confirman que el descenso de los niveles o aumento de la profundidad a la que se encuentra el agua es evidente para los meses de verano, ya que por un lado aumenta la demanda de agua por ser época estival, y también aumenta el uso para el riego de los cultivos de la zona. Ambos hechos confirman la razón de declive en los niveles para los meses de verano. Y también afirman, que durante las grandes crecidas y mientras éstas más se prolonguen, el nivel de los pozos aumenta progresivamente hasta alcanzar niveles que sobrepasen la media.

La piezometría confeccionada por AC ING y Ayala, Cabrera y Asociados (2002) muestra que los niveles piezométricos en el valle de Azapa tienden a descender hacia el occidente. En el sector de Cabuza los niveles piezométricos alcanzan unos 400 msnm, que a medida que uno se acercan al sector de Las Riveras, estos niveles descienden hasta los 300 msnm, generando un gradiente hidráulico medio de aproximadamente 1,5%. Desde el sector de Las Riveras hasta el sector de San Miguel, el nivel piezométrico sigue descendiendo hasta los 230 msnm, con un gradiente hidráulico medio de 2,7%. Posteriormente, al llegar a sector de Las Animas los niveles piezométricos alcanzan los 160 msnm, lo que da un gradiente hidráulico de 1,4%. Desde el sector de Las Animas hasta el sector que se encuentra a 1,5 km aguas arriba desde la planta Azapa, se observa un descenso abrupto de los niveles piezométricos hasta los 110 msnm, que producen un mayor gradiente hidráulico de unos 2,9%. Por último, desde este punto hasta llegar a la ciudad de Arica (nivel del mar), se genera un gradiente hidráulico de 1,8%.

En la Figura 7.145 se presenta la piezometría de la Unidad Hidrogeológica I del valle de Azapa, elaborada a partir de las curvas de nivel cada 20 m, considerando la relación río-acuífero, las mediciones de nivel en pozos en las diferentes campañas del presente estudio, de las mediciones de nivel desde 2012 hasta 2015 que monitorea la DGA y de las mediciones de nivel realizadas en el estudio del INH (2014) en los años 2013 y 2014 a lo largo del valla de Azapa. Se observa como el movimiento general de las

aguas subterráneas en el valle de Azapa es de oriente a poniente, desde las cotas altas hacia la línea de costa. En el que existen conos de depresión causados por la extracción de agua en los pozos y zonas de recarga desde los campos de cultivo que se riegan e infiltran en el acuífero el agua de riego, sin embargo, no existe tanta información para poder desarrollar una piezometría de tal detalle donde se muestren estas componentes.

En la Figura 7.146 se presenta la piezometría de algunas zonas de la cabecera de la cuenca del río San José, la subcuenca Azapa Alto, donde no existe ninguna información de niveles. La piezometría inferida se ha trazado en base a las vertientes, curvas de nivel cada 20 m, escorrentías superficiales y bofedales. El flujo del agua subterránea es relativamente somero y tiene dirección local en cada una de las quebradas y finalmente dirección este-oeste. Las isopiezas se han trazado en la Unidad Hidrogeológica I presente en el río Tignamar, los volcanes fracturados Margarita y Familiari del mioceno superior que constituyen la Unidad Hidrogeológica II y en la Unidad Hidrogeológica IV en las quebradas Oxa y Pumane.

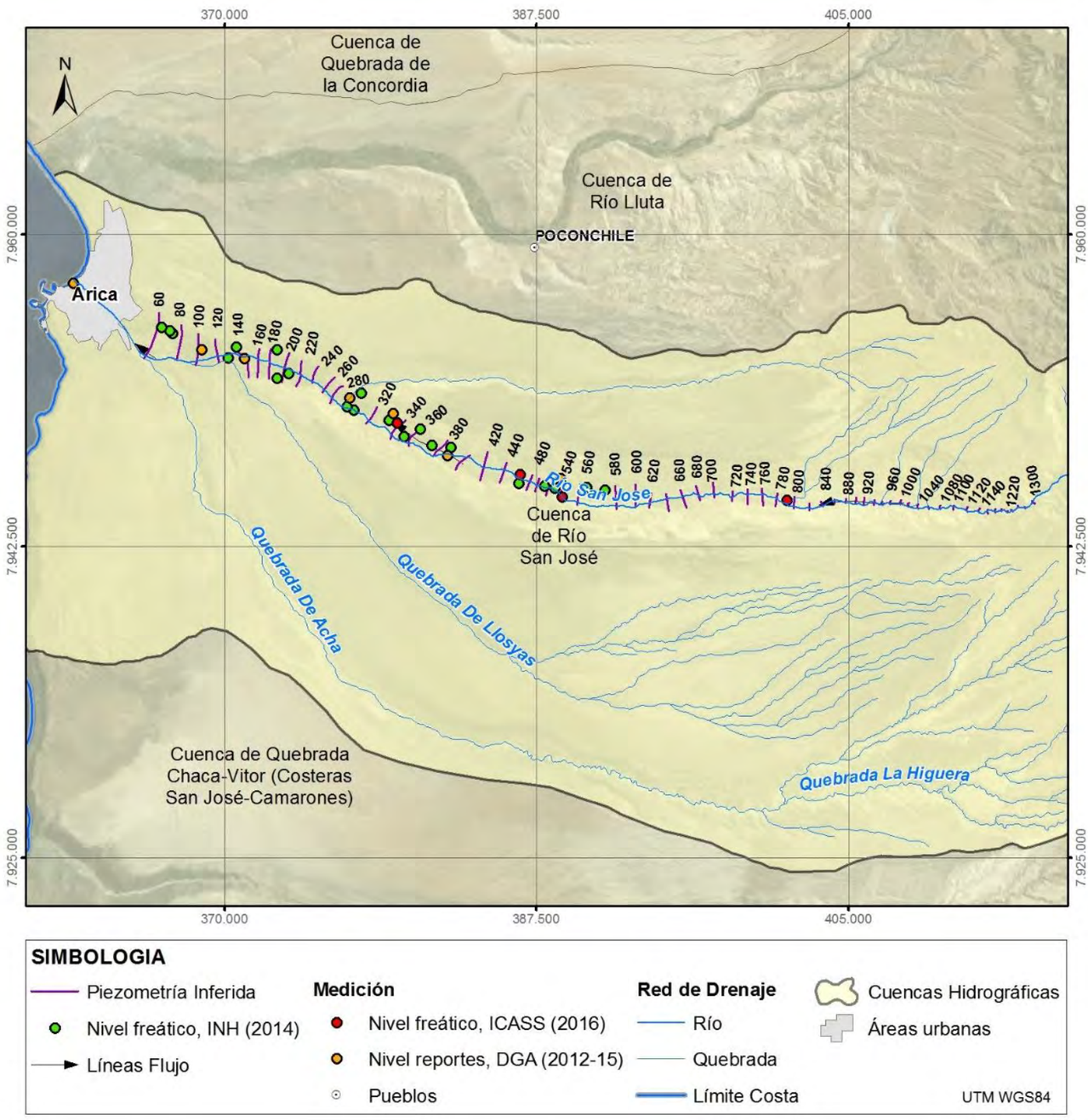


Figura 7.145 Mapa piezométrico de la Unidad Hidrogeológica I en la cuenca del río San José. Fuente: elaboración propia.

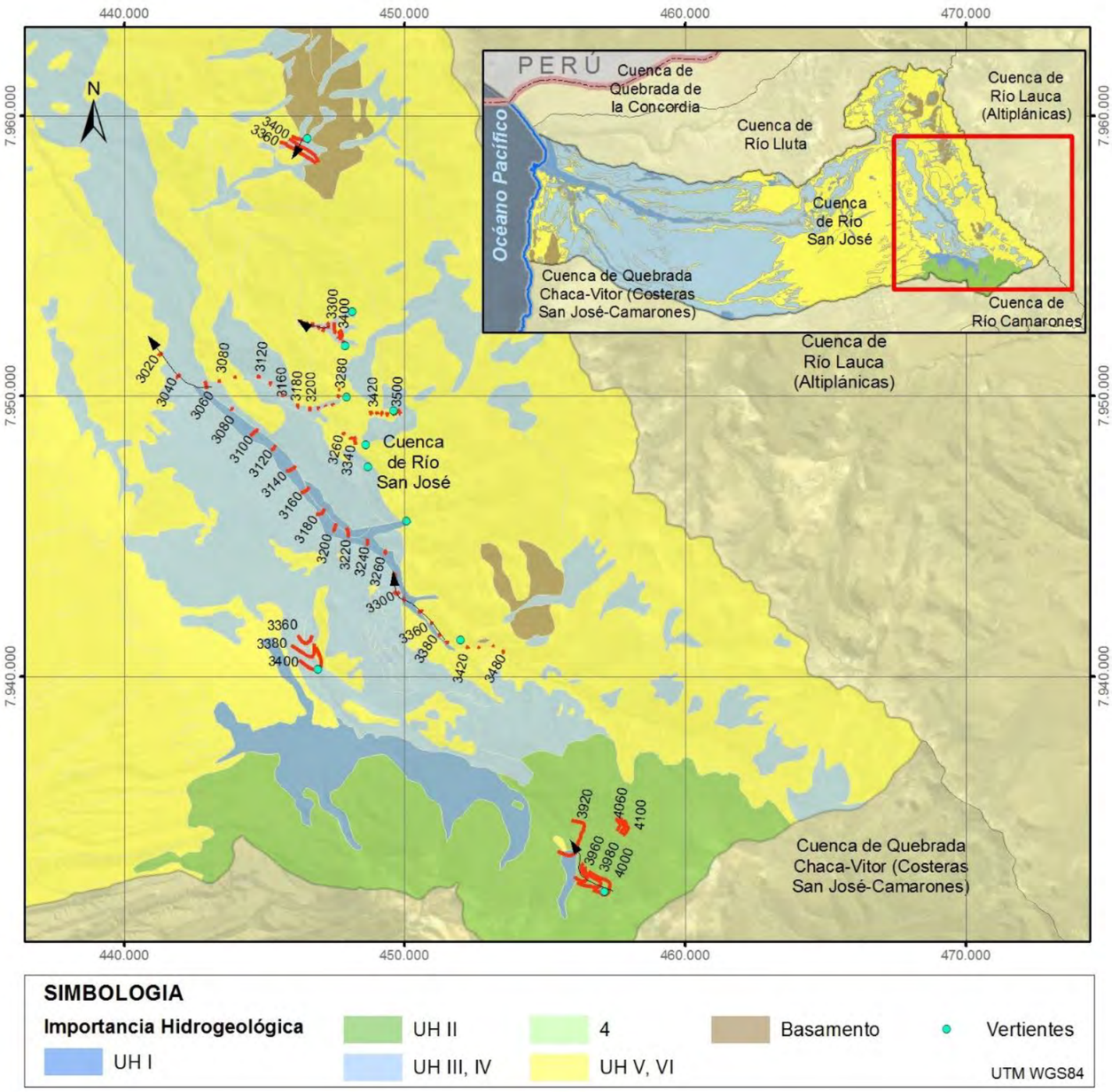


Figura 7.146 Mapa piezométrico de la cabecera de la cuenca del río San José. Fuente: elaboración propia.

En la Figura 7.147 se presenta el perfil longitudinal de la cota topográfica y el nivel freático del valle de Azapa elaborado por DHV *et al.* (1995), donde se muestra que en la confluencia del río San José con la quebrada El Diablo existe un ascenso en el nivel freático que provoca que las aguas subterráneas afloren en forma de vertientes en este sector.

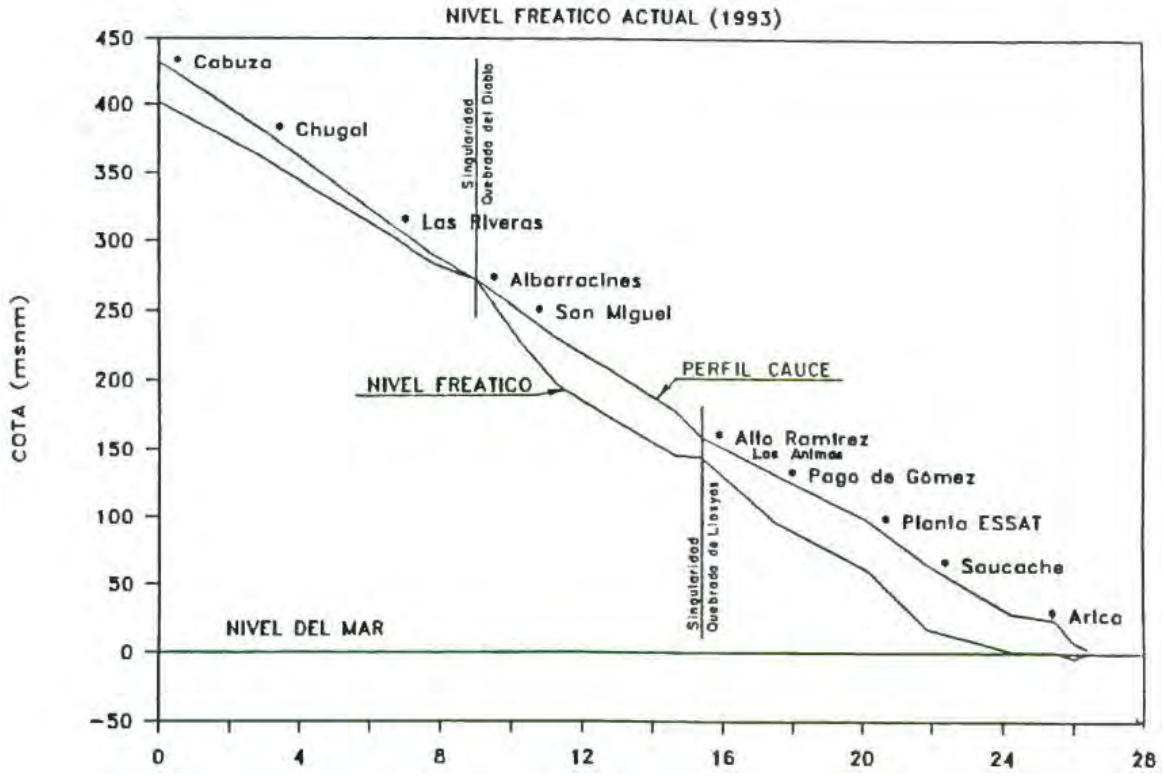


Figura 7.147 Perfil longitudinal de la cota topográfica y el nivel freático del valle de Azapa. Fuente: DHV *et al.* (1995).

7.4.4 Caracterización Hidroquímica

En esta sección se revisaron los antecedentes existentes relacionados con la composición hidroquímica, la calidad de las aguas y la composición isotópica de las aguas superficiales y subterráneas de la cuenca del río San José. Posteriormente, se resumen las actividades efectuadas en las cuatro campañas de muestreo desarrolladas durante el presente estudio. Seguidamente, se describieron los parámetros fisicoquímicos registrados *in situ* durante las campañas de muestreo, se identificaron las facies químicas de las aguas analizadas, se comparó la composición química obtenida con los límites establecidos en la norma chilena para agua potable NCh 409/1

y finalmente se analizó la composición isotópica de las aguas superficiales y subterráneas tomadas en las campañas de terreno.

7.4.4.1 Estudios existentes

La composición hidroquímica y la calidad de las aguas superficiales y subterráneas de la cuenca del río San José ha sido analizada desde la década de los años 70, debido al déficit de recursos hídricos y al progresivo empeoramiento de la calidad de las aguas.

En el Anexo VIII se analizan los diversos antecedentes relacionados con la hidroquímica de la aguas. Se concluye que el empeoramiento de la calidad de los recursos hídricos en el valle de Azapa no se asocia con el transvase de las aguas altiplánicas, sino con el proceso de salinización del agua subterránea. La salinización está relacionada con el aumento de la extensión de los campos de cultivo que provocan el lavado de suelos salinos, y a la intrusión de la cuña marina producto de la sobreexplotación de las agua subterráneas en el sector de Arica y bajo del valle de Azapa. Este proceso de salinización de las aguas también produjo un incremento de cloruros, calcio y magnesio en las aguas subterráneas del valle de Azapa.

Las aguas del canal Lauca se caracterizan por ser aguas frescas y alcalinas, de pH promedio de 7,9 y una conductividad eléctrica de 673 µS/cm. En la bocatoma del canal Azapa presenta un pH de 8 y una conductividad de 774 µS/cm, y en el río San José en Saucache un pH de 7,5 y 650 µS/cm. En la zona costera se detecta un alto contenido de hierro de 1,24 mg/L, de arsénico 0,07 mg/L y de boro 1,98 mg/L. Antes de la bocatoma del canal Azapa la calidad de las aguas mejora, pero sigue excediendo el límite de contenido de hierro y boro. Las aguas del canal Lauca también exceden el contenido de arsénico y boro, pero no supera el contenido de hierro. Las aguas subterráneas de valle de Azapa presentan un valor de pH neutro, un contenido de boro que excede levemente la norma para riego, pero no el contenido de arsénicos. Destaca el mayor contenido de cloruros en las aguas subterráneas que las superficiales, lo que demuestra la existencia de un proceso de salinización.

7.4.4.2 Campañas de terreno

En el presente estudio se realizaron 4 campañas de muestreo de aguas superficiales y subterráneas para caracterizar hidroquímica e isotópicamente y determinar la calidad de las aguas según el contenido de algunos elementos y parámetros según la norma

chilena para agua potable NCh 409/1. En la Tabla 7.84 se resume el número de mediciones de los parámetros fisicoquímicos registrados *in situ*, el número de muestras tomadas para el análisis hidroquímico y para el análisis isotópico y en la Figura 7.148 se presenta la ubicación de los puntos muestreados. En el Anexo VIII se describe el protocolo seguido en terreno para la toma de muestras de agua.

Tabla 7.84 Resumen de las actividades realizadas en las campañas de muestreo en la cuenca del río San José. Fuente: elaboración propia.

Campaña	Fecha	Medición parámetros fisicoquímicos *in situ*	Muestras para análisis hidroquímico	Muestras para análisis isotópico
Primera	23,24,25 y 26 de noviembre de 2015	19	19	19
Segunda	18,19,20,23 y 24 de febrero de 2016	24	24	20
Tercera	10, 11, 13 y 14 de mayo de 2016	20	20	16
Cuarta	31 de julio y 2, 3 y 8 de agosto de 2016	13	13	8

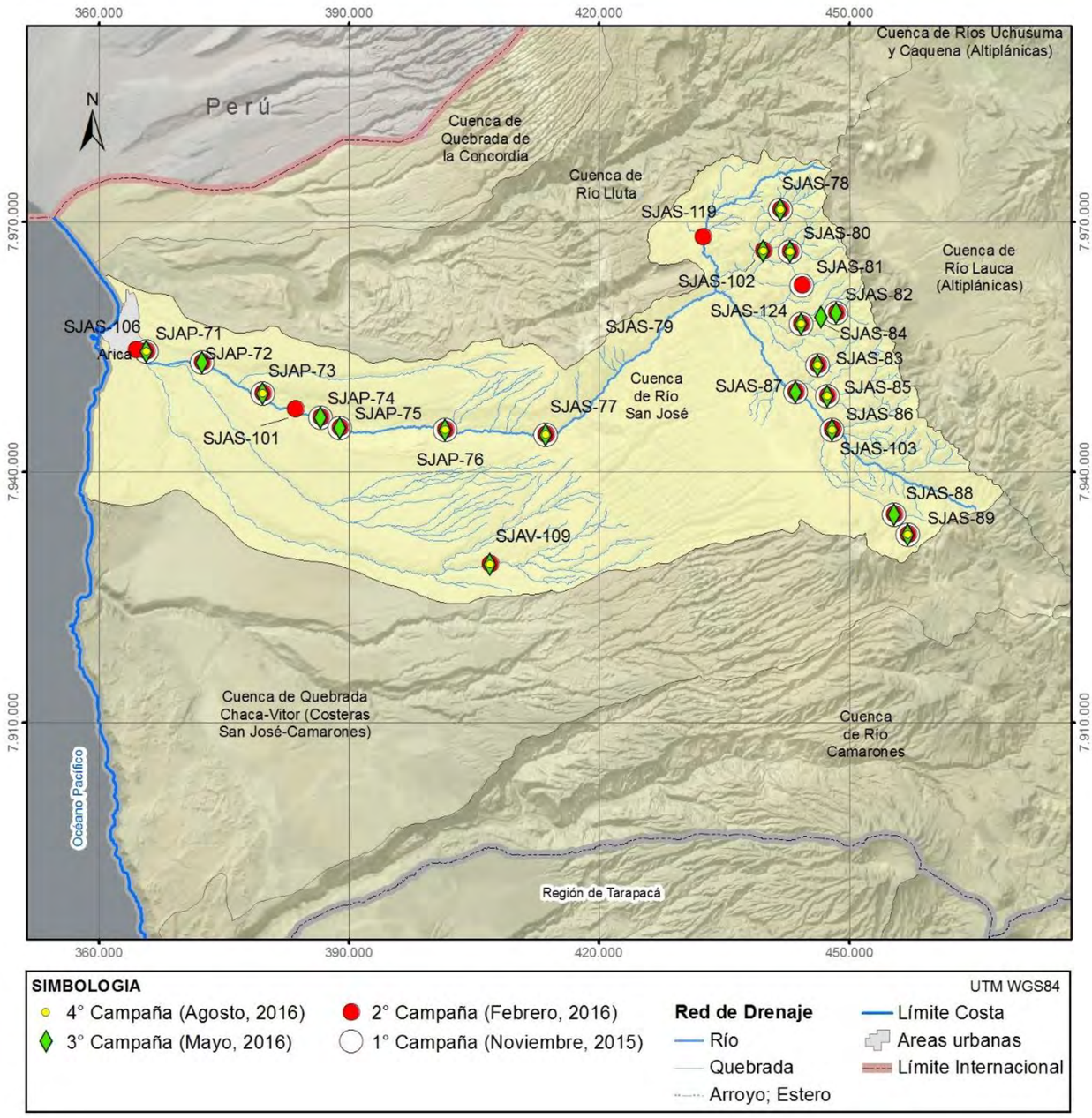


Figura 7.148 Ubicación de los puntos muestreados en la cuenca del río San José durante las campañas efectuadas en el presente estudio. Fuente: elaboración propia.

7.4.4.3 Parámetros fisicoquímicos *in situ*

En las 4 campañas de terreno se midieron los parámetros fisicoquímicos de las muestras que se tomaron para el análisis hidroquímico e isotópico. En esta sección se evalúan los valores de temperatura, pH, conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales (TDS) para caracterizar estos parámetros fisicoquímicos e identificar si existe una variación estacional de estos.

Temperatura

El valor de la temperatura medida en las aguas superficiales y subterráneas durante las campañas de muestreo presentó un amplio rango de variación, entre 7 y 30 °C. La Tabla 7.85 resume los valores máximos, mínimos y promedios de temperatura registrados en las cuatro campañas de terreno realizadas en el presente estudio en la cuenca del río San José.

Tabla 7.85 Valores máximos, mínimos y promedio de temperatura registrados en cada campaña de muestreo en la cuenca del río San José. Fuente: elaboración propia.

Temperatura (°C)	1°Campaña Noviembre 2015	2°Campaña Febrero 2016	3°Campaña Mayo 2016	4°Campaña Agosto 2016
Máxima	25,3	30,1	29,7	26,4
Mínima	11,7	13,6	8,7	7,3
Promedio	20	20,6	17,6	16,5

En la Figura 7.149 se observa que la temperatura de las aguas superficiales en noviembre de 2015 oscila entre 11 y 25°C y va descendiendo progresivamente a los largo del año hasta los 7 y 17°C en invierno, registrado en agosto de 2016.

En cambio, en la Figura 7.150 se observa que la temperatura en las aguas subterráneas es prácticamente constantes en el tiempo y más cálida que las aguas superficiales, oscilando entre 19 y 30°C. Esta diferencia térmica entre aguas superficiales y subterráneas es debido a que las aguas superficiales están influenciadas directamente por las condiciones climáticas mientras que este efecto en las aguas subterráneas es amortiguado por el suelo y sedimentos.

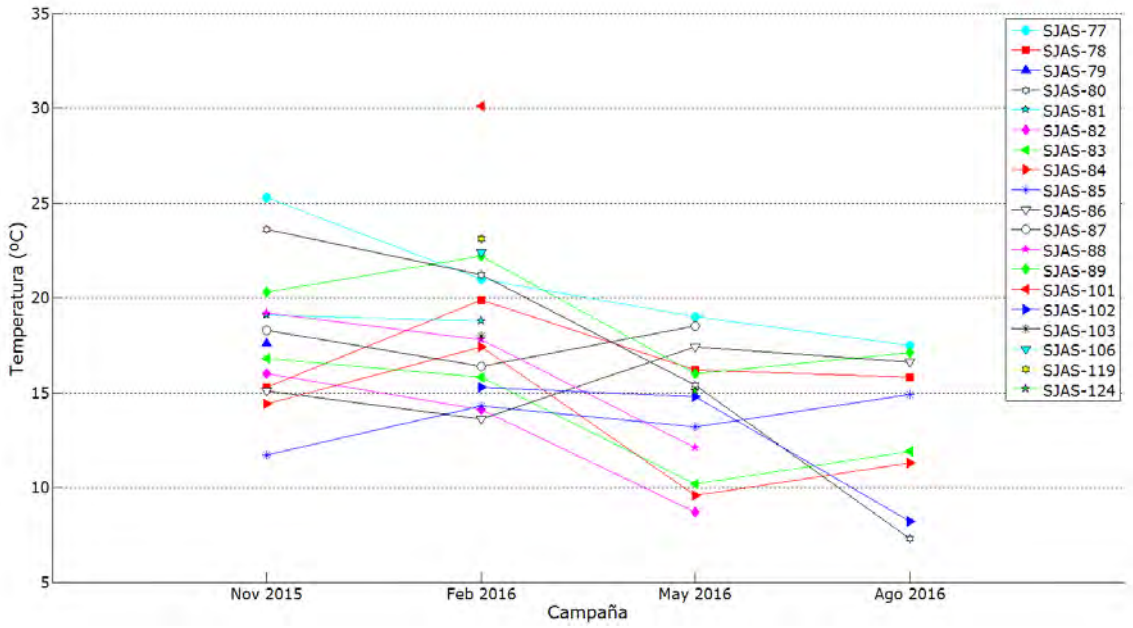


Figura 7.149 Valores de temperatura registrados en las aguas superficiales en las campañas realizadas en la cuenca del río San José. Fuente: elaboración propia.

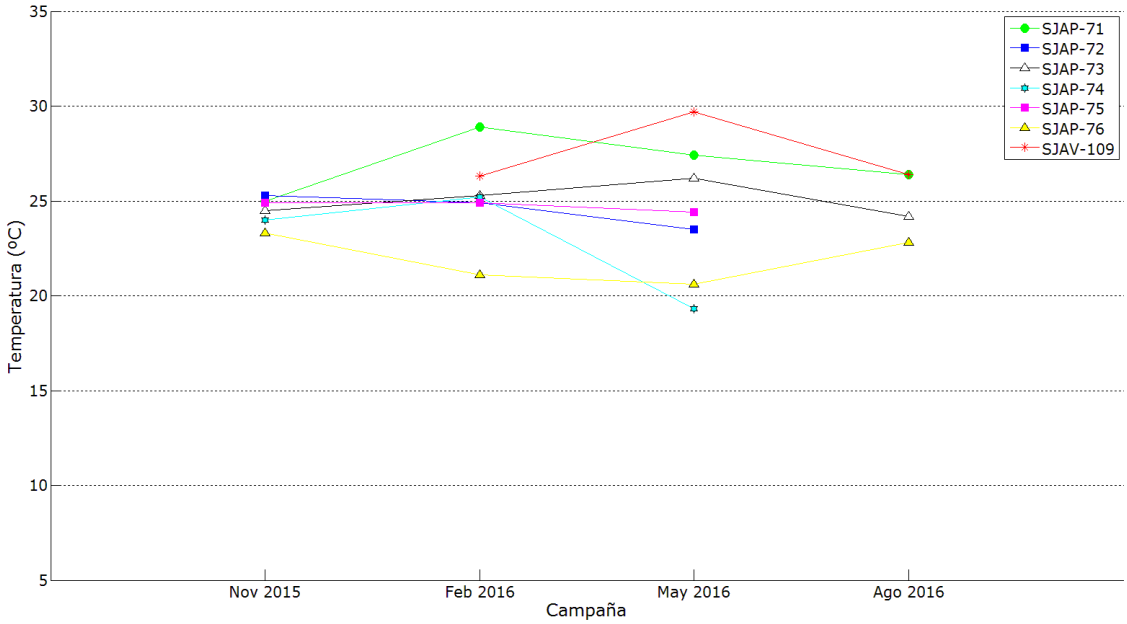


Figura 7.150 Valores de temperatura registrados en las aguas subterráneas en las campañas realizadas en la cuenca del río San José. Fuente: elaboración propia.

PH

El registro de pH de las aguas analizadas en la cuenca del río San José incide que las aguas son desde ácidas hasta básicas, pH 4 a 8,9. La Tabla 7.86 resume los valores máximos, mínimos y promedios de pH registrados en las cuatro campañas de terreno realizadas en el presente estudio.

Tabla 7.86 Valores máximos, mínimos y promedio de pH registrado en cada campaña de muestreo en la cuenca del río San José. Fuente: elaboración propia.

pH	1°Campaña Noviembre 2015	2°Campaña Febrero 2016	3°Campaña Mayo 2016	4°Campaña Agosto 2016
Máxima	8,85	8,7	8,58	8,25
Mínima	4,3	4,25	4,75	4,6
Promedio	7	7,4	7,3	6,7

Si se comparan los valores de pH de las aguas superficiales mostradas en la Figura 7.151 con los de las aguas subterráneas graficados en la Figura 7.152, se observa que las aguas superficiales son aguas más alcalinas que las aguas subterráneas. Las aguas superficiales presentan un pH que oscila entre 6 y 8,9, excepto la muestra SJAS-89 tomada en la quebrada Oxa que presenta aguas ácidas que varían entre pH 4,2 y 4,8. En el caso de las aguas subterráneas el pH varía entre 6,2 y 7,8.

A nivel temporal no se identifica una evolución clara en el tiempo, siendo generalmente constante durante el año de muestreo.

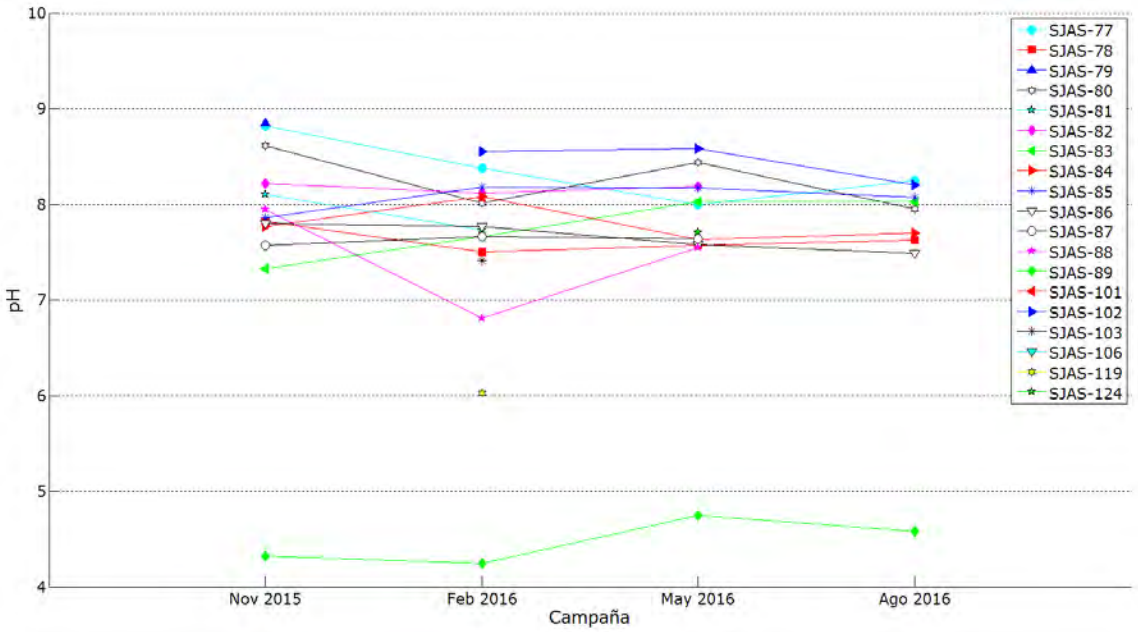


Figura 7.151 Valores de pH registrados en las aguas superficiales en las campañas realizadas en la cuenca del río San José. Fuente: elaboración propia.

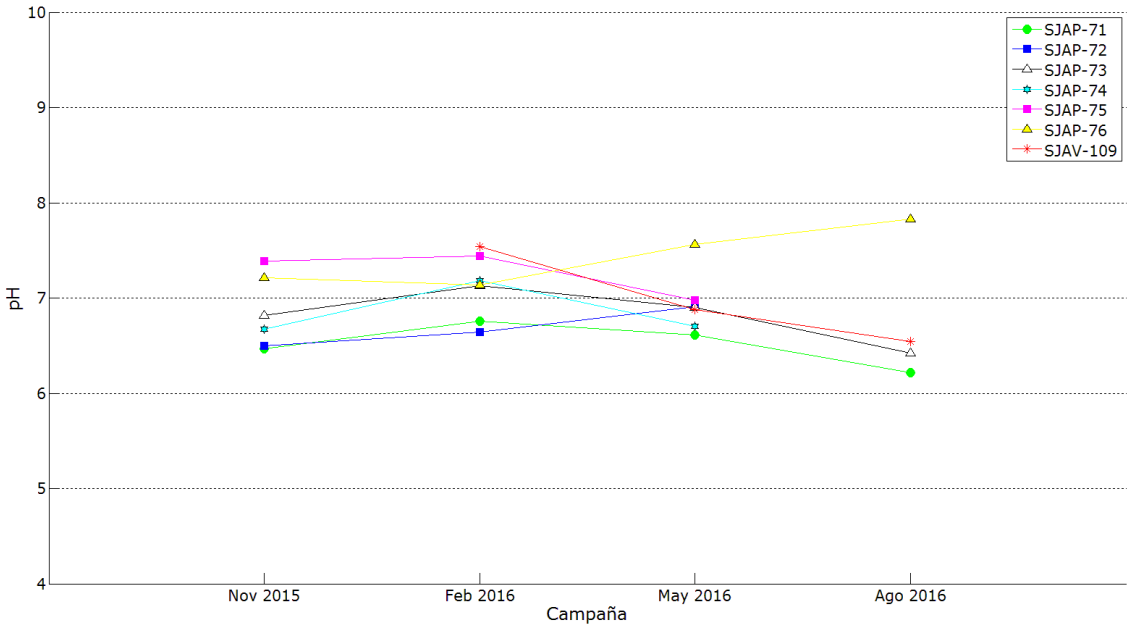


Figura 7.152 Valores de pH registrados en las aguas subterráneas en las campañas realizadas en la cuenca del río San José. Fuente: elaboración propia.

Conductividad eléctrica

Los valores de conductividad eléctrica de las agua recogidas durante el presente estudio oscilan entre 200 y 8.000 µS/cm. La Tabla 7.87 resume los valores máximos, mínimos y promedios de conductividad eléctrica (CE) registrados en las cuatro campañas de terreno realizadas en el presente estudio.

Tabla 7.87 Valores máximos, mínimos y promedios de conductividad eléctrica registrados en cada campaña de muestreo en la cuenca del río San José. Fuente: elaboración propia.

CE (µS/cm)	1°Campaña Noviembre 2015	2°Campaña Febrero 2016	3°Campaña Mayo 2016	4°Campaña Agosto 2016
Máxima	5.620	8.250	7.458	5.470
Mínima	223	256	242	368
Promedio	1.197	1.332	1.359	937

Las aguas superficiales tanto de las aguas del río San José como de las aguas de las diferentes quebradas de la cordillera son aguas frescas con una conductividad eléctrica inferior a 1.000 µS/cm, exceptuando la muestra SJAS-80 que presenta entre 900 y 1.350 µS/cm. En la Figura 7.153 se observa que la conductividad eléctrica es constante en el tiempo, sin fuertes variaciones.

En la Figura 7.154 se muestra el valor de la conductividad eléctrica de las aguas subterráneas. La muestra con menor conductividad es la vertiente ubicada en Puquio, siendo aguas frescas. También son aguas frescas, con una conductividad inferior a 1.000 µS/cm, son las aguas analizadas en el pozo que se encuentra en el sector Los Molinos. Desde el sector de Los Molinos hacia aguas abajo se observa un incremento de la conductividad eléctrica hasta alcanzar 5.000 y 8.250 µS/cm en un pozo próximo a la ciudad de Arica. Por lo tanto, las aguas subterráneas del acuífero del valle de Azapa son aguas con mayor conductividad que las aguas de la cabecera de la cuenca.

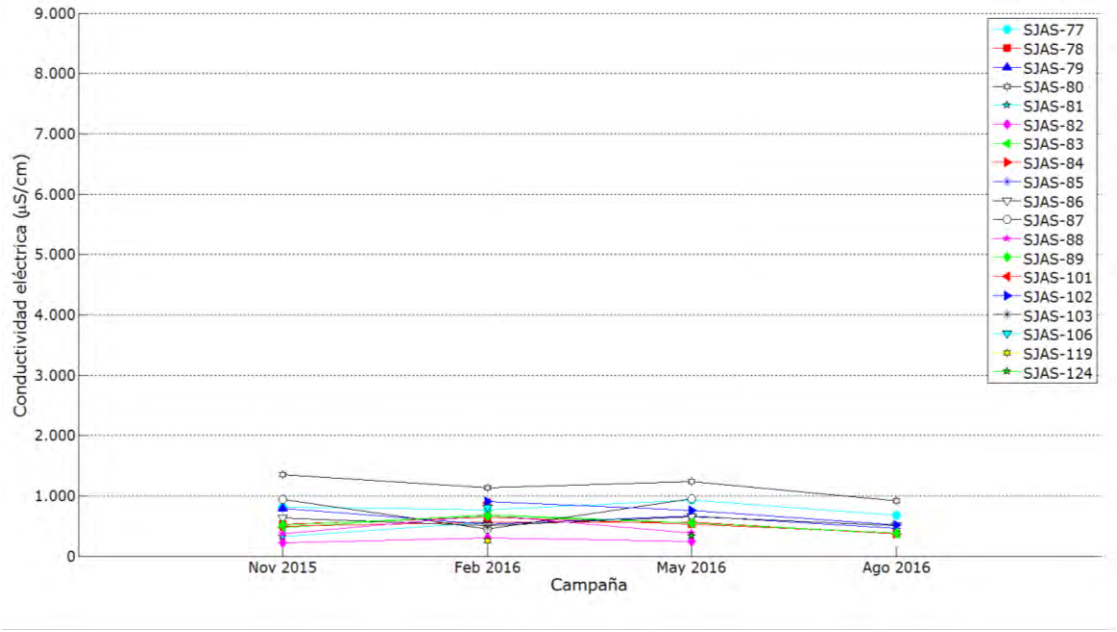


Figura 7.153 Valores de conductividad eléctrica registrados en las aguas superficiales en las campañas realizadas en la cuenca del río San José. Fuente: elaboración propia.

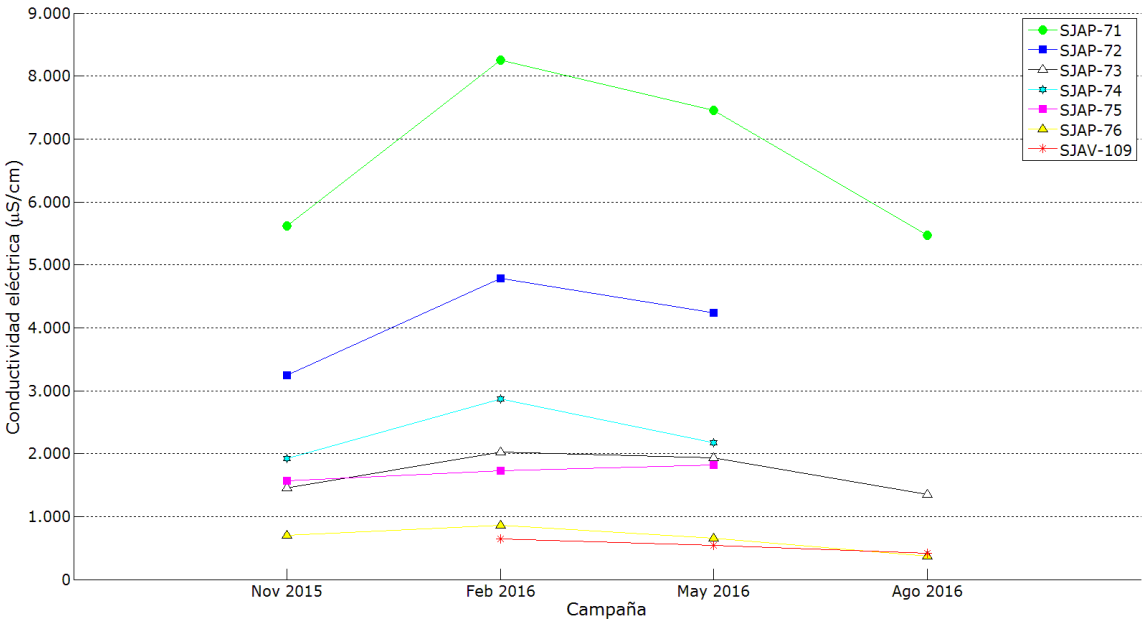


Figura 7.154 Valores de conductividad eléctrica registrados en las aguas subterráneas en las campañas realizadas en la cuenca del río San José. Fuente: elaboración propia.

SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES (TDS)

La Tabla 7.88 resume los valores máximos, mínimos y promedios de sólidos disueltos totales registrados (TDS) en las cuatro campañas de terreno realizadas en el presente estudio.

Tabla 7.88 Valores máximos, mínimos y promedio de sólidos disueltos totales (TDS) registrados en cada campaña de muestreo en la cuenca del río San José. Fuente: elaboración propia.

TDS (mg/L)	1°Campaña Noviembre 2015	2°Campaña Febrero 2016	3°Campaña Mayo 2016	4°Campaña Agosto de 2016
Máxima	3.600	5.280	6.696	3.500
Mínima	143	164	147	236
Promedio	767	853	1.104	600

Los resultados de conductividad eléctrica y sólidos totales disueltos obtenidos mostrarían el proceso de salinización del agua subterránea que está sufriendo el valle de Azapa. Este proceso estaría causado por dos factores fundamentales: (1) la sobreexplotación del acuífero y (2) el aumento de la extensión de los campos de cultivo que provocan el lavado de suelos salinos.

7.4.4.4 Modelo hidroquímico de las aguas

CONTROL DE CALIDAD ANÁLISIS QUÍMICOS

En la Tabla 7.89 se citan los rangos del error del balance iónico de las muestras tomadas en la cuenca del río San José durante las cuatro campañas de muestreo.

Tabla 7.89. Resumen de los valores máximos y mínimos del error del balance iónico de la composición química de las muestras de las cuatro campañas de muestreo en la cuenca del río San José. Fuente: elaboración propia.

Error del balance iónico	1°Campaña Noviembre 2015	2°Campaña Febrero 2016	3°Campaña Mayo 2016	4°Campaña Agosto 2016
Máximo	8,17%	19,84%	9,28%	8,54%
Mínimo	-0,22%	-2,03%	-9,32%	-5,97%

En la segunda campaña se observa un alto error en el balance iónico debido a que se analizaron los cationes y aniones totales y las muestras presentaban un alto contenido en partículas coloidales y sedimentables producto de las crecidas del invierno altiplánico. En el Anexo VIII se muestra que varias muestras fueron filtradas

posteriormente en el laboratorio y que el error del balance iónico de los elementos disueltos fue generalmente inferior al 10%.

ANÁLISIS DE FACIES QUÍMICAS

En los diagramas de Piper y Schoeller-Berkaloff elaborados en esta sección se han representado de color azul las aguas superficiales del río San José, de color naranja las aguas subterráneas tomadas en pozos, de color negro las aguas superficiales transvasadas del río Lauca (canal Lauca), de color morado las aguas superficiales del río Tignamar y de color verde las muestras tomadas en diferentes quebradas precordilleranas. En el Anexo VIII se muestran los diagramas de Piper y Schoeller-Berkaloff de las aguas superficiales y subterráneas analizadas en febrero, mayo y agosto de 2016.

En la primera campaña de terreno se tomaron 19 muestras de aguas superficiales y subterráneas para el análisis hidroquímico. En la Figura 7.155 se observa que las aguas de las quebradas de la alta parte de la cuenca presentan diferentes facies mientras que las aguas del sector bajo de la cuenca son muy similares químicamente.

Las aguas en la quebrada Oxa son sulfatadas cálcicas (SJAS-88 y SJAS-89), pero aguas abajo (en el pueblo Tignamar, SJAS-86, y hacia aguas abajo, SJAS-87) se enriquecen en bicarbonatos, siendo aguas sulfatos-bicarbonatadas cálcicas, pero en febrero de 2016 presenta facies sulfatadas cálcicas.

La muestra SJAS-85 presenta facies sulfatos-bicarbonatadas cálcicas en la quebrada Pumane (o Saxamar). En cambio, la quebrada Lupica se caracteriza por sus aguas sulfatadas cálcicas. Las aguas de la quebrada Belén, correspondiente a la muestra SJAS-82, son bicarbonatadas-sulfatadas cálcicas, pero aguas abajo del pueblo Belén, en la muestra SJAS-84, las aguas son bicarbonatadas cálcicas y con mayor contenido de elementos mayores que la muestra SJAS-82, pero de composición química similar a la muestra tomada en el pueblo Pachama, SJAS-81. En la quebrada Caillama (SJAS-80) las aguas son sulfatos-cloruradas sódicas, mientras que las aguas de la quebrada Luco (SJAS-78) son sulfatadas magnésicas con un alto contenido de calcio y sodio, como la muestra SJAS-77.

En la central hidroeléctrica Chapiquiña se libera el agua desviada del río Lauca mediante el canal Lauca-Azapa. Las aguas transvasadas desde el río Lauca son

bicarbonatadas sódico-magnésicas. Aguas abajo, el río San José en Livilcar es bicarbonatado cálcico-magnésico y en Ausipar se enriquecen en sodio. A partir de este punto las aguas superficiales se infiltran o se desvían en la bocatoma Azapa y no circula agua generalmente por el cauce del río San José en el valle. Sin embargo, en febrero de 2016 escurrían aguas por el río San José hasta la desembocadura, siendo aguas sulfatadas cálcico-magnésicas. Las aguas del pozo SJAP-76 son bicarbonatadas cálcicas con alto contenido en sulfatos y cloruros, similar a las aguas superficiales del río San José. Aguas abajo de este pozo, a medida que avanza hacia la línea de costa las aguas subterráneas son cloruradas cálcicas y van enriqueciéndose en elementos mayoritarios.

En la quebrada La Higuera o Acha hay algunas pequeñas vertientes en la localidad de Puquio. Estas aguas son frescas, de pH básico, facies sulfatadas-cloruradas o sulfatadas sódico-cálcicas y con bajo grado de mineralización.

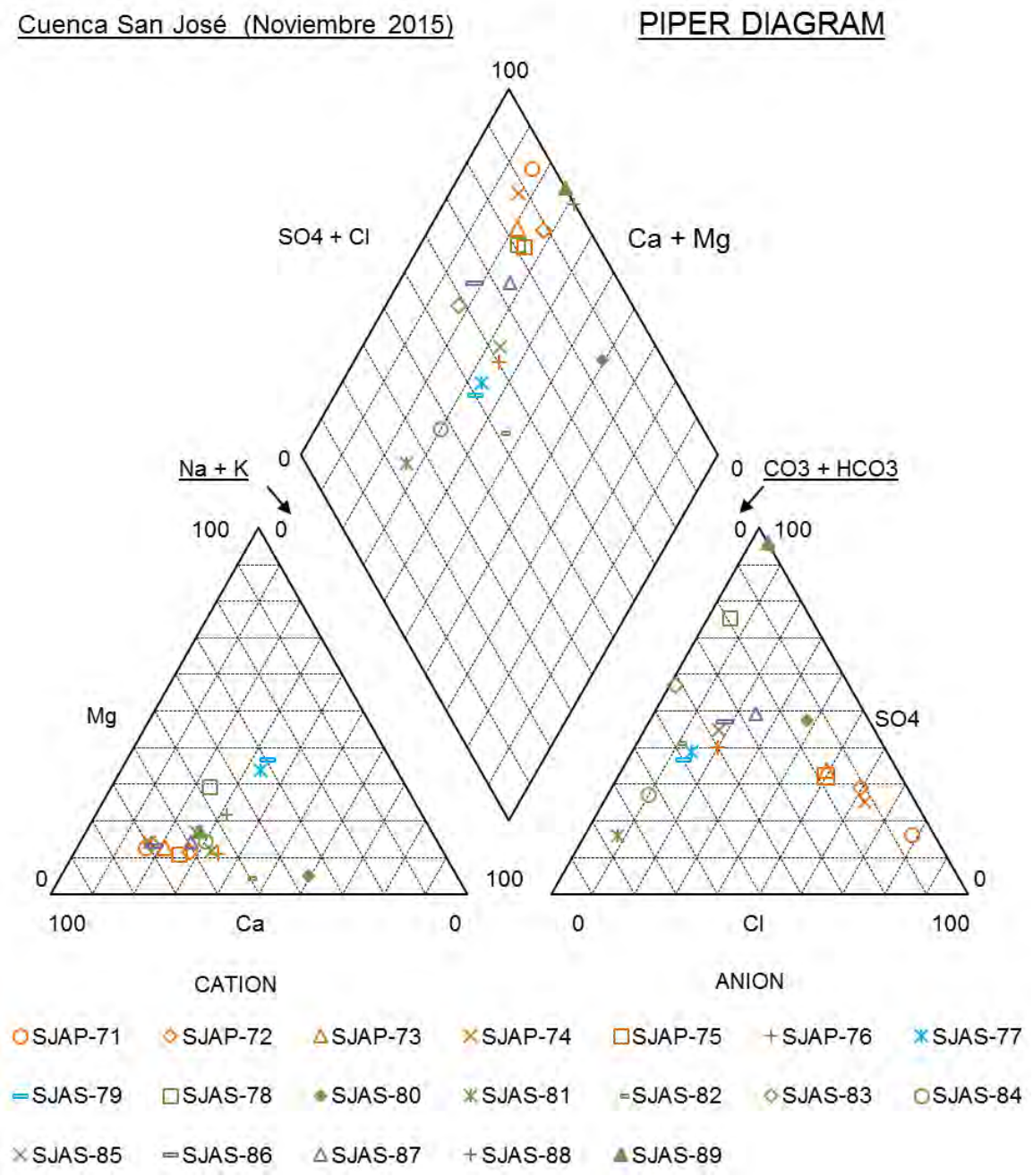


Figura 7.155 Diagrama de Piper de las muestras analizadas en la cuenca del río San José, campaña de noviembre de 2015. Fuente: elaboración propia.

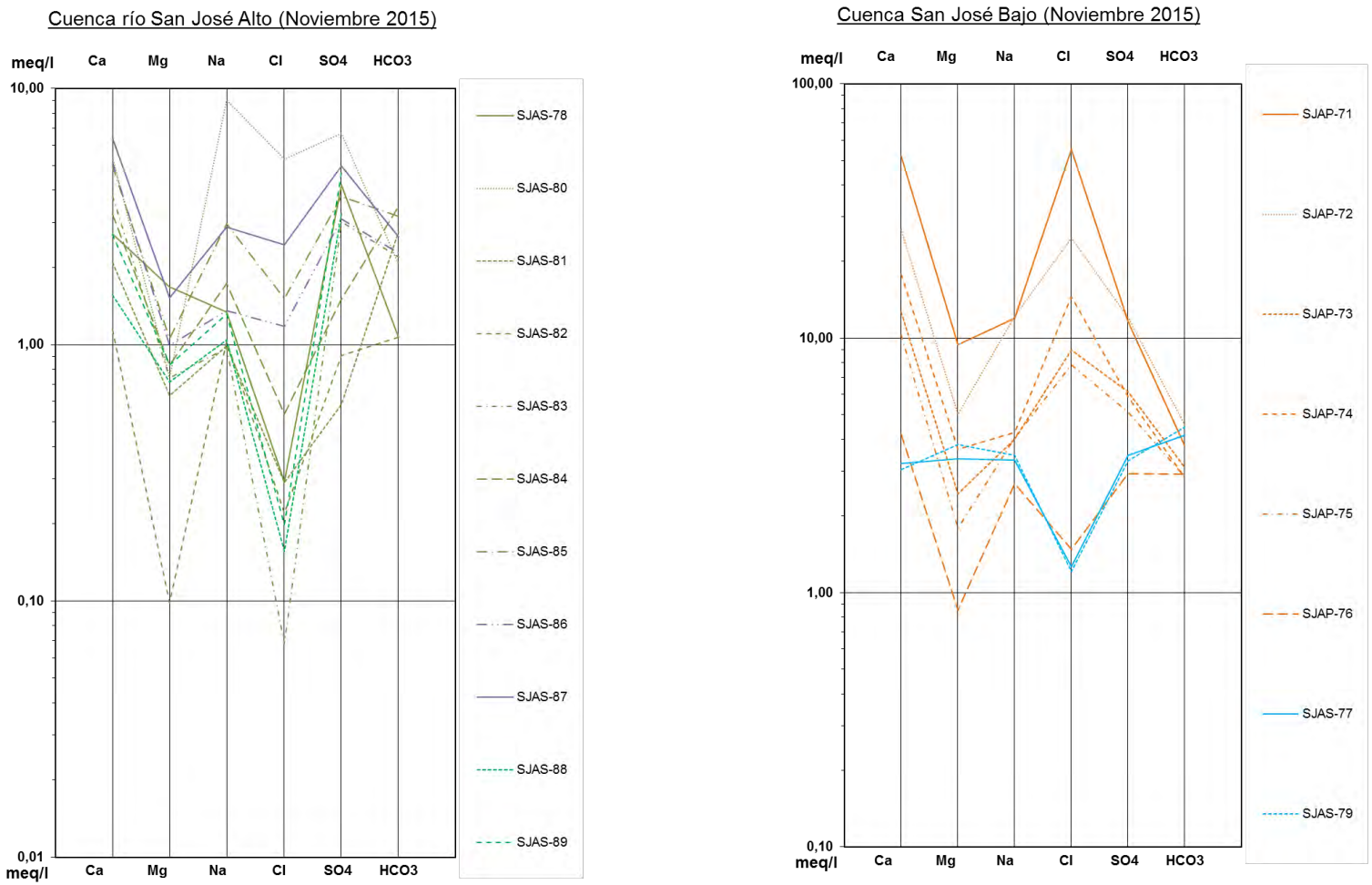


Figura 7.156 Diagramas de Schoeller-Berkaloff de las muestras analizadas en la cuenca del río San José, campaña de noviembre de 2015. Fuente: elaboración propia.

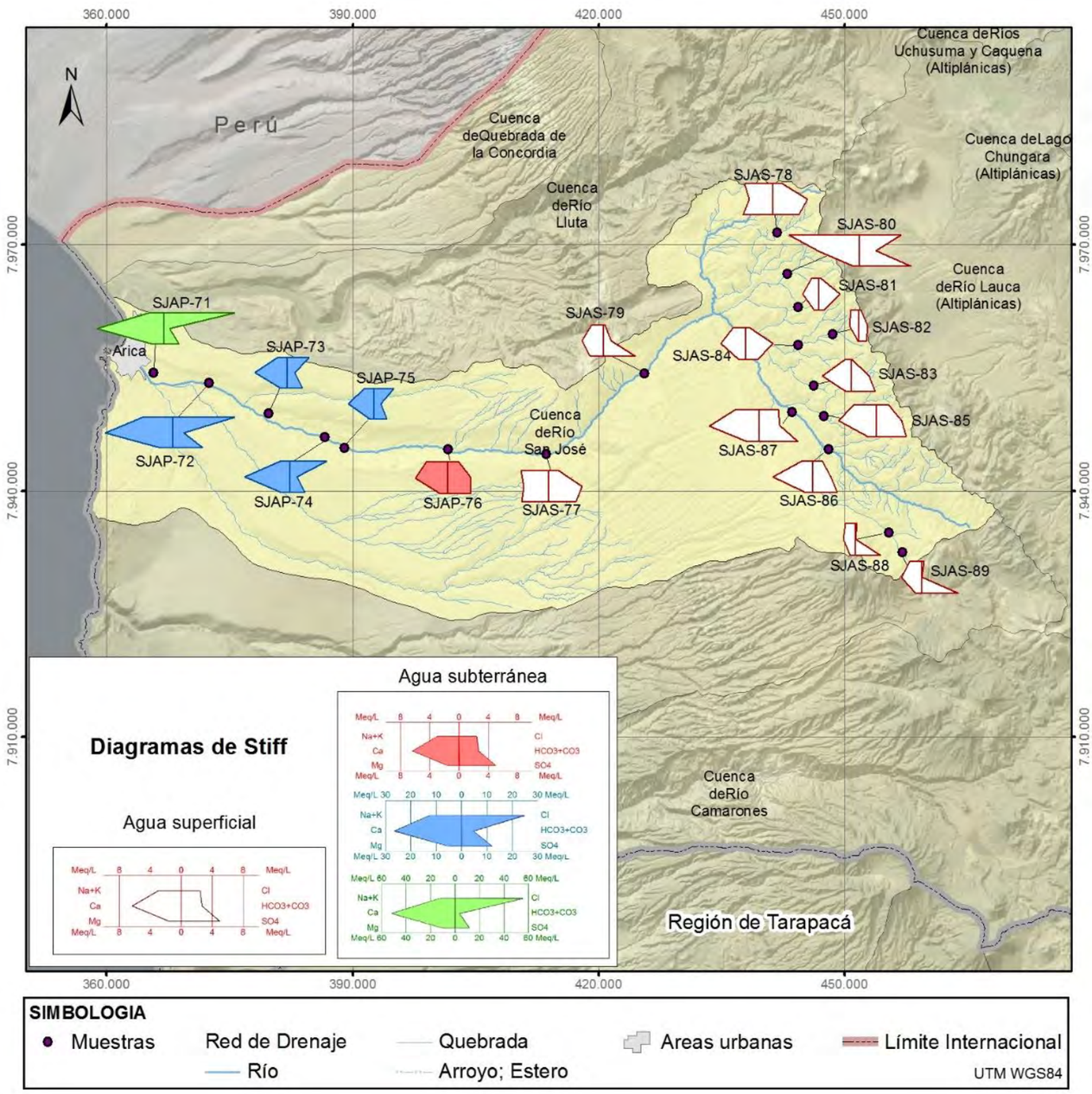


Figura 7.157 Diagramas de Stiff de las muestras analizadas en la cuenca del río San José, campaña de noviembre de 2015. Fuente: elaboración propia.

En el Anexo VIII se presentan los gráficos del contenido de elementos mayoritarios y minoritarios obtenidos en las diferentes campañas. En estos gráficos se observa que las aguas superficiales y subterráneas de la cuenca del río San José no contienen selenio, fosfatos, cianuro, cadmio (excepto la muestra SJAS-101 en febrero de 2016), zinc y aluminio, hierro, cobre y cromo. Excepcionalmente, en el mes de febrero las aguas superficiales contienen zinc, aluminio, hierro, cobre y cromo.

Se observa que las aguas subterráneas se van enriqueciendo de sulfatos, nitratos, potasio, sodio, magnesio, litio, calcio, cloruros y bromuros a lo largo del valle de Azapa. Las aguas subterráneas no contienen arsénico, pero sí las aguas superficiales, en el que destaca el contenido de arsénico de la muestra SJAS-80. Por otro lado, el nivel de bromuros va aumentando en las aguas subterráneas del valle de Azapa mientras que las aguas del río Lluta es mínimo el valor. Las aguas de las quebradas precordilleranas generalmente tienen un bajo contenido en bromuros excepto en la muestra SJAS-80.

El contenido de nitratos es muy bajo o nulo en las aguas superficiales que fluyen por las quebradas de la precordillera y por el río San José. Sin embargo, en las aguas subterráneas analizadas en los pozos ubicados en el valle de Azapa el contenido de nitratos aumenta progresivamente desde nulo en el inicio del valle hasta los 100 mg/L en las cercanías de Arica.

EVOLUCIÓN DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS AGUAS

Las aguas de la cuenca del río San José manifiestan un proceso de mezcla de aguas de diferentes orígenes en el acuífero del valle de Azapa, en el que algunas aguas proceden de la cuenca del río Lauca y otras de las quebradas precordilleranas de la propia cuenca.

La precordillera de la cuenca del río San José se caracteriza por presentar numerosas quebradas, las cuales son aguas frescas, neutras y con facies que varían entre bicarbonatadas a sulfatadas cálcicas o cálcico-magnésicas. Las quebradas de la precordillera no suelen contener niveles altos de ningún elemento o metal y son muy poco mineralizadas, excepto la muestra de la quebrada Caillama (SJAS-80). La quebrada Caillama (SJAS-80) presenta un pH superior al resto, pH 8, y una conductividad levemente superior, 1.300 µS/cm, con facies sulfatada-clorurada sódica

y que contiene mayor cantidad de cloruros, arsénico, boro, bromuro, hierro, litio y zinc.

Por otro lado, en febrero de 2016 se pudo tomar una muestra de agua, debido a las abundantes precipitaciones del invierno altiplánico que generaban escorrentía superficial por el río Seco. La muestra del río Seco son aguas frescas, con pH 6 y de tipo sulfatadas cálcico-magnésicas. Poseen elevado contenido de aluminio, hierro, magnesio, nitratos y sílice. Esta situación puede ser el producto de la lixiviación y escorrentía superficial que provocan las abundantes precipitaciones del invierno altiplánico en las zonas de alteración en el sector del cerro Piedra Grande en la Formación Lupica (b).

Es destacable el agua que circula por la quebrada Oxa, que alimenta al río Tignamar, por su composición hidroquímica diferente al resto de las quebradas. Por la quebrada Oxa fluyen aguas frescas, ácidas (pH 4 a 5), sulfatadas cálcicas como las aguas del otro lado de la divisoria de aguas en la cuenca de la quebrada Chaca Vítor (VIAS-91 y VIAS-90). La muestra de noviembre de 2015 del río Tignamar contenía aguas frescas, neutras y sulfatadas-bicarbonatadas cálcicas, pero en febrero de 2016 fueron sulfatadas cálcicas. El río Tignamar se caracteriza por el elevado contenido de zinc, hierro, cobre y aluminio, y en la quebrada Oxa además de los anteriores metales también posee amoniaco, nitratos, nitritos y manganeso. Por lo tanto, durante el invierno altiplánico se acentúa el aporte de aguas de lixiviación y escorrentía superficial desde las zonas de alteración hidrotermal que existe en los cerros Tuxuma y Alto Tumaya en la Formación Lupica (a) y en los cerros volcánicos Familiani y Margarita.

Sin embargo, las aguas que marcan la composición química en el río San José son las aguas desviadas por el canal Lauca-Azapa desde el río Lauca. El canal Lauca en la quebrada muestreada, SJAS-102, son aguas frescas (menor a 1.000 μS/cm), básicas (pH mayor a 8) y facies bicarbonatada-sulfatadas sódico-magnésicas, del mismo modo que son las aguas del nacimiento del río Lauca. Estas aguas transvasadas incorporan a la cuenca del río San José aguas con mayor contenido de aluminio, arsénico, bromuro, cloruros, fluoruros y sílice que, en general, poseen el resto de las quebradas precordilleranas.

Las aguas del río San José en el tramo de Livilcar-Ausipar son aguas frescas, básicas y facies bicarbonatadas-sulfatadas con un equilibrio entre cationes, muy similares a las

aguas del canal Lauca transvasadas. Las aguas del río San José se infiltran en el acuífero del valle de Azapa o se desvían mediante la bocatoma del canal Azapa aguas abajo del sector de Ausipar, menos cuando se producen las grandes crecidas del río San José por las abundantes precipitaciones del invierno altiplánico y el caudal del río San José llega hasta la desembocadura. En febrero se obtuvieron aguas más sulfatadas y cálcico-magnésicas y un alto contenido en metales en las aguas superficiales que recorrían el valle de Azapa.

En cambio, las aguas subterráneas del acuífero del valle de Azapa presentan una composición hidroquímica constante en las campañas, siendo cloruro-sulfatadas a cloruradas cálcicas, excepto las aguas del pozo ubicado en el sector de Ausipar que son similares a las aguas superficiales. Esto indicaría que es una zona de recarga del acuífero, donde el río San José alimentaría al acuífero. En general, las aguas subterráneas del valle Azapa destacan por su alto nivel de nitratos y nitritos y por el incremento progresivo del contenido de calcio, sodio, litio, bromuros, sulfatos y cloruros, pasando de ser aguas frescas a salobres en la desembocadura. Existe una diferencia importante de contenido de metales entre las aguas superficiales y subterráneas, sobre todo en febrero de 2016 por el arrastre de sedimentos provocado por las fuertes precipitaciones del invierno altiplánico.

La composición hidroquímica de las aguas subterráneas y su evolución por el valle indicaría un proceso de salinización del acuífero. Esto sería producto de la sobreexplotación del acuífero que produjo intrusión marina en el valle, por el aumento de la extensión de los campos de cultivo que provocan el lavado de suelos salinos y del cultivo intensivo en el valle de Azapa en las últimas décadas.

Por último, en la quebrada La Higuera o Acha hay algunas pequeñas vertientes en la localidad de Puquio, tal como se observa en la Figura 7.158. Estas aguas son frescas, de pH básico, facies sulfatadas-cloruradas sódicas y con bajo grado de mineralización.

Figura 7.158 Vertiente ubicada en la localidad de Puquio, quebrada La Higuera o Acha. Fuente: elaboración propia.

7.4.4.5 Calidad de las aguas

En la primera campaña de terreno, noviembre de 2015, se analizaron los contenidos de elementos mayoritarios y minoritarios disueltos en las aguas superficiales y subterráneas para poder comparar con el contenido de elementos mayoritarios y minoritarios totales analizados en el resto de campañas de muestreo. En el Anexo VIII se presentan los resultados de las mediciones de parámetros *in situ* y análisis de laboratorio, y dentro de cada tabla se remarcaron en rojo aquellos valores que sobrepasan la norma chilena para uso de agua potable NCh 409 y en verde los resultados de aluminio y boro que superen los límites establecidos en la norma de riego NCh 1.333.

Las 19 muestras analizadas durante la primera campaña de terreno, en noviembre de 2015, no superan los límites establecidos en la norma chilena de agua potable NCh 409/1 en el contenido de cadmio, cianuro, cobre, cromo, hierro, magnesio, mercurio, amoniaco, plomo, selenio y zinc. Sin embargo, 15 muestras superan el contenido de manganeso, sulfatos, sólidos disueltos totales, arsénico, cloruros, nitratos, pH y/o

fluoruros, por lo que no son aptas para el consumo humano. El análisis de los elementos disueltos indica que las muestras SJAS-78, SJAS-81, SJAS-83 y SJAS-86 tomadas en diferentes quebradas de la precordillera son aguas potables para el consumo humano.

En el análisis desarrollado en febrero de 2016 se analizaron 24 muestras de aguas superficiales y subterráneas. Todas las aguas analizadas exceden algún elemento, principalmente arsénico, hierro y manganeso y en menor número de muestras el nivel de cloruros, cromo, fluoruros, mercurio, nitratos, plomo y/o pH. En 11 muestras analizadas superan el contenido de boro para ser aptas para el riego.

En mayo de 2016 se obtuvieron 2 muestras aptas para el consumo humano y para riego, la muestra SJAS-83 en la quebrada Lupica y la muestra SJAS-78 en la quebrada Luco. El resto de muestras exceden los límites de arsénico, boro, cloruros, hierro, manganeso, mercurio, nitratos, sulfatos, sólidos disueltos totales y/o pH que indican las normas NCh 409 y NCh 1.333.

Por último, el análisis hidroquímico de las 13 muestras tomadas en agosto de 2016 indicó que la muestra SJAS-83, ubicada en la quebrada Lupica, es apta para el consumo humano y para riego, mientras que el resto de las muestras superan los límites de los mismos elementos que en el análisis efectuado en mayo de 2016.

Se concluye que las aguas superficiales y subterráneas de la cuenca del río San José no son aptas para el consumo humano, ya que exceden los límites de la norma, principalmente de arsénico, boro, cloruros, hierro, manganeso, mercurio, nitratos, sulfatos, sólidos disueltos totales y/o pH que indica la norma NCh 409, excepto en la quebrada Lupica que tiene aguas apta para el consumo humano y para riego. Las aguas en febrero 2016 contienen mayor cantidad de elementos por el arrastre de sedimentos que provocan las fuertes precipitaciones del invierno altiplánico.

7.4.4.6 Isotopía de las aguas

En el presente estudio se tomaron muestras de aguas superficiales y subterráneas a lo largo del río San José y de las deferentes quebradas que existen en la cabecera de la cuenca para el análisis isotópico de la molécula del agua. En la Figura 7.159 se

muestra la ubicación de los puntos de aguas superficiales y subterráneas que se analizaron en cada campaña de muestreo.

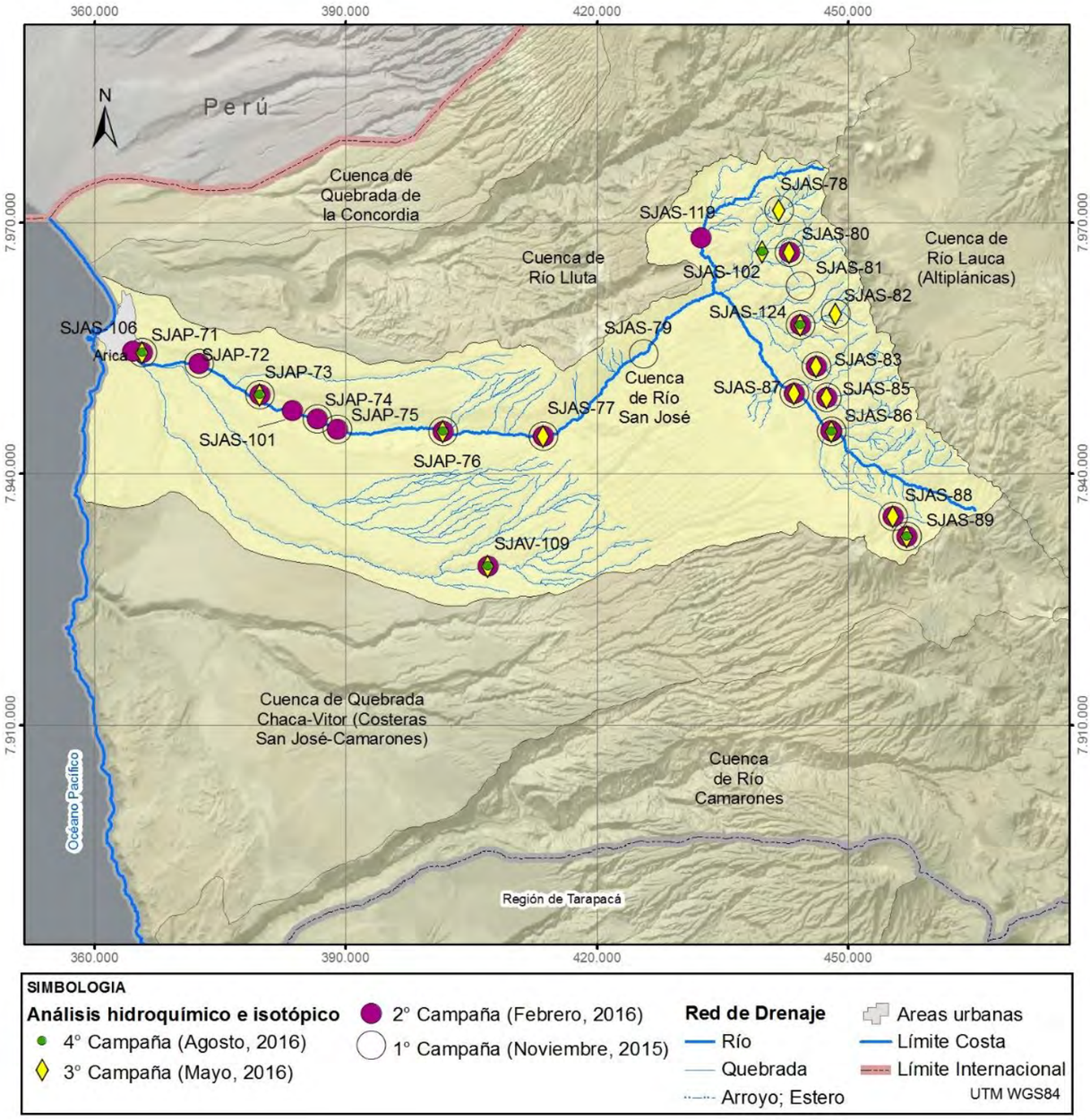


Figura 7.159 Ubicación de los puntos analizados isotópicamente en la cuenca del río San José durante las diferentes campañas de muestreo. Fuente: elaboración propia.

A continuación se interpretó la composición isotópica de las aguas superficiales y subterráneas obtenidas en las cuatro campañas mediante la relación entre el $\delta^{18}O$ y δD. En la Tabla 7.90 se indican los valores máximos y mínimos de oxígeno 18 y deuterio obtenidos en cada campaña de muestreo.

Tabla 7.90 Resumen de los valores máximos y mínimos de oxígeno 18 y deuterio obtenidos en las cuatro campañas de muestreo en la cuenca del río San José. Fuente: elaboración propia.

		1°Campaña Noviembre 2015	2°Campaña Febrero 2016	3°Campaña Mayo 2016	4°Campaña Agosto 2016
$\delta^{18}O$‰ SMOW	Máximo	-7,49	-4,51	-5,26	-4,90
	Mínimo	-11,36	-12,94	-11,73	-11,00
δD‰ SMOW	Máximo	-63,58	-29,7	-32,94	-30,95
	Mínimo	-79,01	-89,61	-82,65	-84,94

En las siguientes figuras se han representado de color azul las aguas analizadas en noviembre de 2015, de naranjo las muestras tomadas en febrero de 2016, de verde las aguas muestreadas en mayo de 2016 y de color rojo las aguas analizadas isotópicamente en agosto de 2016.

En el análisis se distinguen 3 tipos de composición isotópica de agua en la cuenca del río San José: (1) aguas de las vertientes del sector de la cabecera, con una amplia variación en la composición isotópica, (2) aguas transvasadas desde el río Lauca, las cuales provienen del sistema lagunar Chungara-Cotacotani, por lo que han sufrido fraccionamiento por evaporación desde lámina libre y (3) las aguas de los pozos y del río San José, que son una mezcla entre las aguas propias de la cuenca y las aguas importadas desde la cuenca del río Lauca.

En la Figura 7.160 se observa que la composición isotópica de las aguas superficiales presenta diferentes grados de fraccionamiento, variando espacial y temporalmente. La mayoría de las aguas tomadas en las quebradas precordilleranas se encuentran próximas a la RRM o entre la RMM y la RML, indicando que son aguas meteóricas. Las muestras tomadas en febrero se aproximan más a la RML, probablemente por las abundantes precipitaciones que se producen en el invierno altiplánico, es decir,

durante la campaña de muestreo. En cambio, las muestras tomadas en noviembre de 2015 reflejan mayor grado de evaporación que el resto de las campañas.

La muestra tomada aguas abajo de la central eléctrica Chapiquiña corresponde a las aguas transferidas desde el río Lauca. La composición isotópica de estas aguas refleja un alto grado de evaporación desde lámina libre debido a la evaporación que se produce en las lagunas de Cotacotani y que alimentan al río Lauca. Por lo tanto, las aguas superficiales del río San José corresponden a la mezcla de aguas precordilleranas con las aguas transvasadas por el canal Lauca. Sin embargo, la composición isotópica de las aguas superficiales del río San José está directamente relacionada y marcada por la composición isotópica de las aguas transferidas. Esto se debe a que el canal Lauca aporta un mayor caudal que el resto de las quebradas precordilleranas que alimentan el río San José.

En la Figura 7.161 se observa que la composición isotópica de las aguas subterráneas analizadas en los pozos ubicados en el valle de Azapa es muy similar entre ellas, no definen una evolución espacial o temporal. Sin embargo, la muestra analizada en la vertiente de Puquios presenta una composición isotópica con mucho más enriquecimiento que el resto de la cuenca, es decir, ha sufrido menor fraccionamiento isotópico que el resto de la cuenca.

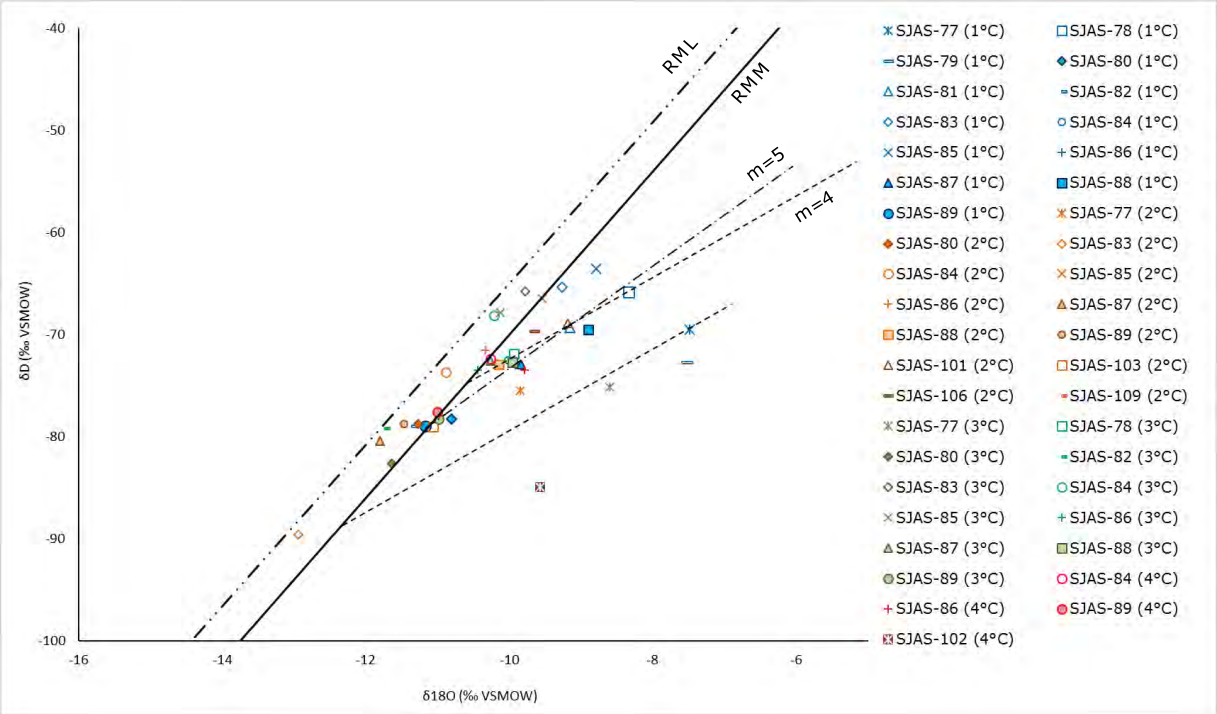


Figura 7.160 **Relación $\delta^{18}O/\delta D$ de las aguas superficiales analizadas en la** cuenca del río San José en las diferentes campañas. Fuente: elaboración propia.

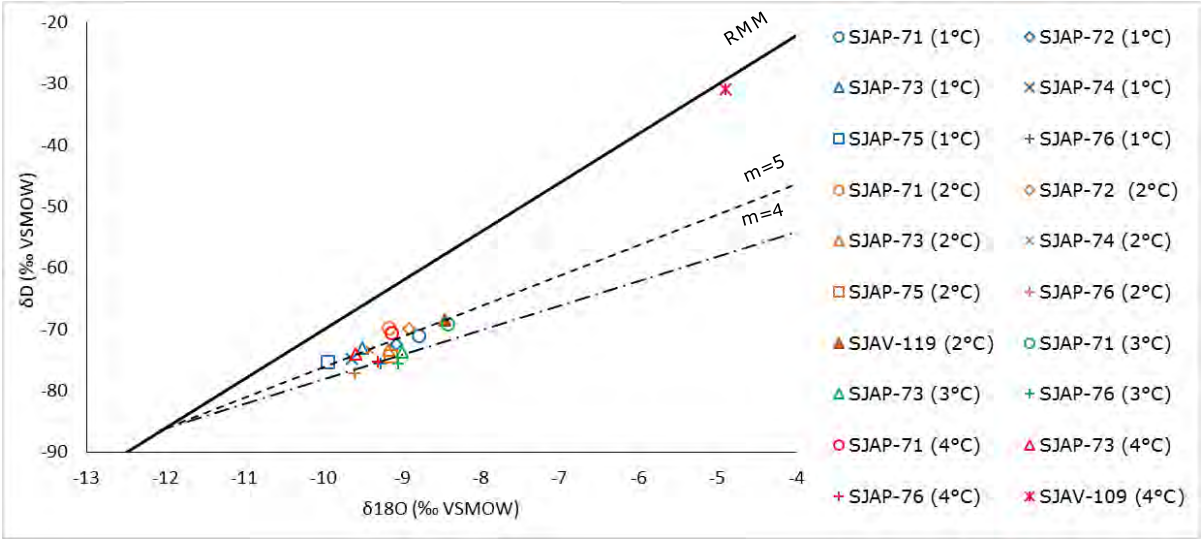


Figura 7.161 **Relación $\delta^{18}O/\delta D$ de las aguas** subterráneas analizadas en la cuenca del río San José en las diferentes campañas. Fuente: elaboración propia.

7.4.5 Modelo Conceptual

La cuenca del río San José se desarrolla inmediatamente al sur de la cuenca del río Lluta y drena una superficie de 3.104 km^2. Limita al norte con la cuenca del río Lluta, al sur con la cuenca de la quebrada Chaca-Vítor, al este con la cuenca altiplánica del río Lauca y al oeste con el océano Pacífico. Nace de la confluencia de dos tributarios principales, los ríos Seco y Tignamar, éste último es el mayor aportante, sin embargo los recursos propios son escasos. Cercano a la ciudad de Arica, el San José recibe como afluente a la quebrada de Acha o La Higuera, la cual se desarrolla de sureste a noroeste.

Los principales usos del suelo en la cuenca del río San José son áreas sin vegetación (60%), praderas matorrales (30%), terrenos agrícolas (5%) y área urbana e industrial (5%), por lo tanto, la evapotranspiración desde el suelo y de la vegetación es una de las principales pérdidas de la precipitación antes de llegar a la superficie.

Los recursos hídricos superficiales de la cuenca en su parte alta, han sido intervenidos desde el año 1962 cuando entró en funcionamiento el canal de transvase Lauca-Azapa, convirtiéndose en uno de los principales aportes de agua en la cuenca, con un promedio histórico de 600 l/s (DGA, 2010). Adicionalmente, las mayores precipitaciones registradas en la cuenca se presentan en la parte alta, concentrándose durante el invierno altiplánico, y disminuyen con el gradiente altitudinal hacia la costa. La precipitación media anual en la cuenca, estimada a partir del método de las isoyetas es de 83,7 mm/año.

El río San José se origina de la confluencia de los dos tributarios principales, el río Seco y el Tignamar, ambos ubicados en la subcuenca de Azapa Alto, los cuales drenan una serie de quebradas precordilleranas como Vichuta, Tangane, Manzanane, Huancure, Putagua, Tumaya, Oxa, Saxamar, Lupica, Belén o Misaña, Pachama, Chapiquiña y Murmuntane. En la zona de Tignamar la escorrentía superficial es baja y nula, con un caudal medio anual de 50 l/s en la estación río Tignamar en Tignamar, y sólo se permite apreciar en el tramo desde Chapiquiña hasta la bocatoma del canal Azapa. El río San José se desarrolla muy encajonado y recién en Ausipar comienza a abrirse gradualmente, con un caudal de 1120 l/s en la estación río San José en Ausipar, hasta abrirse totalmente en su desembocadura, y finalmente en el sector bajo recibe las quebradas de Las Llosllas y de Acha.

Las zonas de recarga en la subcuenca de Azapa Alto lo constituyen los acuíferos fracturados de los volcanes Margarita y Familiari. A nivel de cuenca, la unidad de mayor importancia hidrogeológica lo compone los materiales detríticos no consolidados o semiconsolidados, correspondientes a los depósitos fluviales y aluviales del Holoceno y Pleistoceno y a depósitos litorales. Mediante la interpretación de las pruebas de bombeo efectuadas en el acuífero detrítico del valle de Azapa, se estimó una transmisividad que varió entre 650 y 10.000 m^2/día, una conductividad hidráulica de 8 a 125 m/día y un coeficiente de almacenamiento de 0,02 a 0,22%. El flujo subterráneo es somero y tiene dirección local en cada una de las quebradas y finalmente dirección este-oeste en el valle de Azapa.

Las aguas de la cuenca del río San José manifiestan un proceso de mezcla de aguas de diferentes orígenes en el acuífero del valle de Azapa, en el que algunas aguas proceden de la cuenca del río Lauca y otras de las quebradas precordilleranas de la propia cuenca. La precordillera de la cuenca del río San José se caracteriza por presentar numerosas quebradas, las cuales son aguas frescas, neutras y facies que varían entre bicarbonatadas a sulfatadas cálcicas o cálcico-magnésicas. Las aguas del río San José en el tramo de Livilcar-Ausipar son aguas frescas, básicas y con facies bicarbonatadas-sulfatadas con un equilibrio entre cationes, muy similares a las aguas del canal Lauca transvasadas. Las aguas del río San José se infiltran en el acuífero del valle de Azapa o se desvían mediante la bocatoma del canal Azapa aguas abajo del sector de Ausipar, menos cuando se producen las grandes crecidas del río San José debido a las abundantes precipitaciones del invierno altiplánico. En cambio, las aguas subterráneas del acuífero del valle de Azapa son cloruro-sulfatadas a cloruradas cálcicas con un alto nivel de nitratos y nitritos, además se muestra un incremento progresivo del contenido de calcio, sodio, litio, bromuros, sulfatos y cloruros, pasando de ser aguas frescas a salobres en la desembocadura. Esto sería producto de la intrusión marina debido a la sobreexplotación del acuífero y por el aumento de la extensión de riego de los campos de cultivo que provocan el lavado de suelos salinos y del cultivo intensivo en el valle de Azapa durante las últimas décadas.

El análisis de calidad de las aguas de la cuenca del río San José concluye que no son aptas para el consumo humano por exceder los límites de varios elementos que indica la norma NCh 409, excepto en la quebrada Lupica que tiene aguas apta para el consumo humano y para riego.

En la Figura 7.162 se muestra el esquema del modelo conceptual de la cuenca del río San José, cuyas entradas principales del sistema superficial estarían dadas por el trasvase del canal Lauca-Azapa y por las precipitaciones; y del sistema subterráneo por las recargas al acuífero del valle de Azapa. El agua que precipita en la parte alta, escurre superficialmente por las laderas, por los cauces y una parte es retenida en depresiones. La porción de agua que logra infiltrarse es la que recarga al acuífero. En la parte baja, la principal recarga se atribuye al riego de las áreas cultivadas en el valle y a los canales no revestidos. Además, de presentarse eventuales infiltraciones desde las redes de alcantarillado y agua potable en la ciudad de Arica.

Las principales salidas del sistema superficial lo constituye la toma del canal Azapa, la evapotranspiración de los cultivos y praderas y la descarga superficial eventual al océano pacífico del río San José; así mismo las grandes salidas del sistema subterráneo se produce por la extracción de agua subterránea en norias y pozos para el riego de los cultivos y para el abastecimiento de agua de la ciudad de Arica y por la descarga subterránea al océano Pacífico. En menor magnitud, existen afloramientos de vertientes de aguas que alimentan a las quebradas.

Las principales demandas del sistema superficial de la subcuenca de Azapa Alto lo constituye la agricultura, siendo menores. Y en la subcuenca de río San José comprende el gran consumo agrícola del canal Azapa y pecuario. Y la gran demanda del sistema subterráneo en la subcuenca del río San José comprende el consumo para agua potable e industrial.

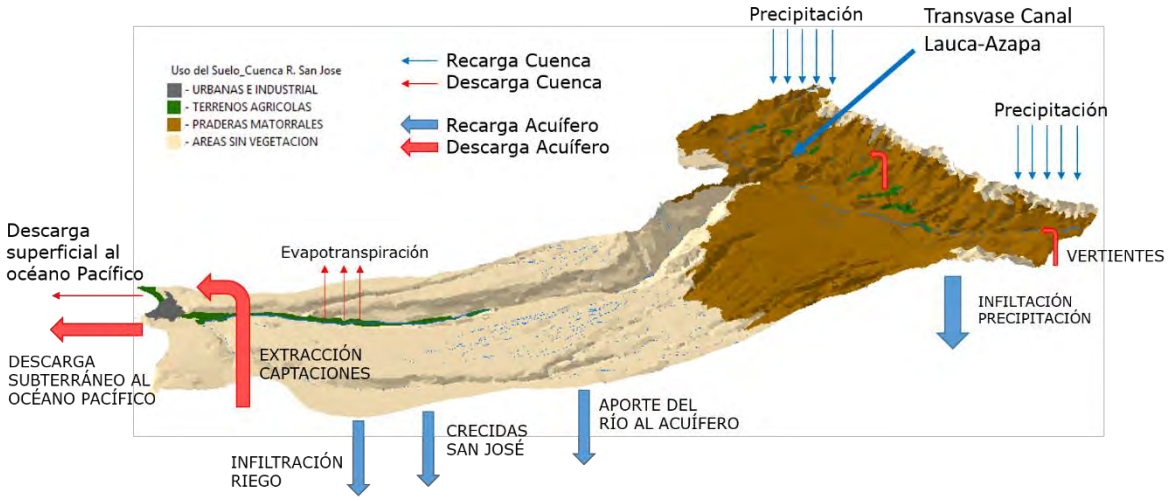


Figura 7.162 Esquema del modelo conceptual hidrológico de la cuenca del río San José. Fuente: modificado de la capa uso del suelo tomada del portal web del SINIA http://ide.mma.gob.cl/.

7.5 Cuenca de la Quebrada Chaca-Vítor

La cuenca de la quebrada Chaca Vítor tiene una superficie de 2.769 km^2, nace en la angostura de Umirpa del río homónimo, cuyas fuentes están en el portezuelo Orcotunco ubicado entre los volcanes Orcotunco y Anocaire. Esta cuenca presenta un gran desnivel, variando su altura entre los 5.050 msnm en los cerros de Anocarire hasta a nivel del mar en su desembocadura.

A partir de la angostura de Umirpa, la quebrada Chaca Vítor desciende por un estrecho cajón cordillerano pasando por las localidades agrícolas de Chitita, Guañacagua, el pueblo de Codpa y Ofragía, desde donde continúa por un profundo cajón, atravesando las pampas de Chaca y Camarones, hasta su llegada al mar en Caleta Vítor.

En la Figura 7.163 se presenta la ubicación de la cuenca de la quebrada Chaca - Vítor su red de drenaje.

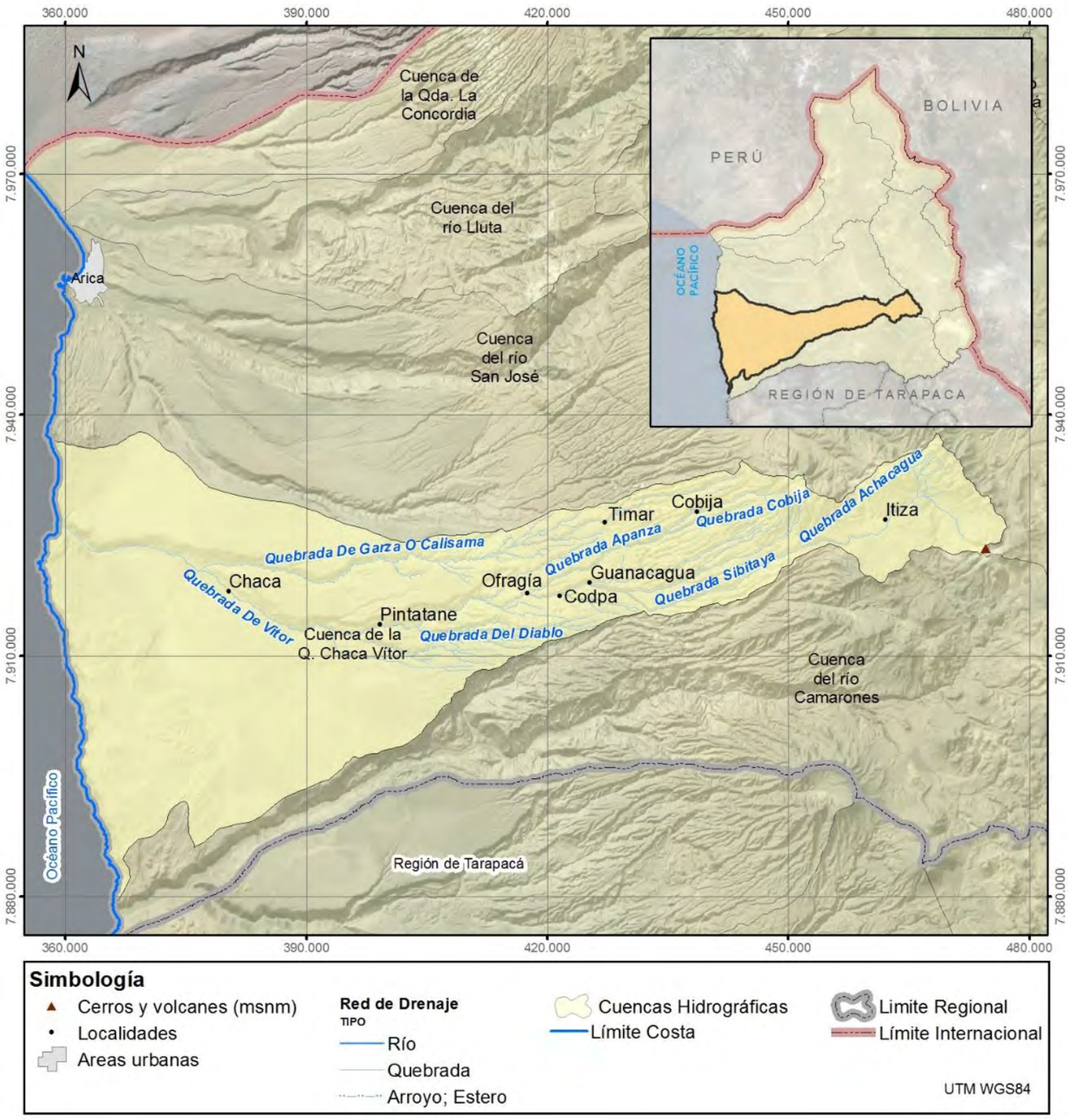


Figura 7.163 Ubicación de la cuenca de la quebrada Chaca-Vítor. Fuente: elaboración propia.

7.5.1 Caracterización Hidrológica

7.5.1.1 Definición y caracterización de la cuenca de la quebrada Chaca Vítor

El principal tributario de la quebrada Chaca - Vítor es la quebrada Garza o Calisama, cuyo origen está en el borde suroeste de la Pampa Oxaya, cercana a la localidad de Timar. Está quebrada posee un desarrollo de 38 km desde sus nacientes hasta su desembocadura en la ribera norte de la quebrada de Chaca Vítor, aguas abajo del pueblo de Chaca. Su cauce es profundo y el lecho se encuentra permanentemente seco. Otros tributarios de importancia en la cuenca son la quebrada del Diablo, que desemboca por la ribera sur, aguas arriba de la localidad de Pintane, permanece seco con frecuencia, y la quebrada Sivitaya proveniente desde el Norte.

DELIMITACIÓN DE LA CUENCA

El criterio utilizado para la delimitación se explicó en el apartado "Definición y Caracterización de las Cuencas de la Región" en el capítulo de "Análisis Regional". De manera resumida el criterio es básicamente topográfico.

CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS DE LA CUENCA

La morfología de la cuenca de la quebrada Chaca Vítor es un referente para establecer la dinámica esperada de la escorrentía superficial y se caracteriza por el análisis de tres parámetros, los relativos a la forma, al relieve y a la red de drenaje. Éstos se calcularon con el uso de SIG, además de utilizar expresiones matemáticas para este fin. La metodología se muestra en detalle en el Anexo VI.

En relación a la forma, la cuenca tiene un coeficiente de compacidad (K_G) de 1,89, por tanto su forma es rectangular. La densidad del drenaje de la cuenca de la quebrada Chaca Vítor definida como la longitud total de los cauces sobre el área de la cuenca, es en este caso de 0,14 km/km^2 que corresponde a una densidad de drenaje pobre.

Es necesario destacar que este parámetro representa la densidad de drenaje promedio en la cuenca, lo cual no excluye que existan cauces o quebradas al interior de la cuenca que dispongan de un drenaje muy desarrollado y por tanto, ocurra una respuesta rápida de transformación lluvia-escorrentía.

Para construir la curva hipsométrica de la cuenca fue necesario reclasificar las bandas del DEM y calcular las áreas acumuladas intermedias. Según la curva hipsométrica (Figura 7.164), la cuenca tiene un topografía variable iniciando desde la cota mínima de 0 msnm hasta la máxima de 5.069 msnm. Sin embargo, el 50% de la cuenca tiene una altura sobre los 1.300 msnm.

De acuerdo a la metodología presentada en el Anexo VI, esta curva hipsométrica se clasifica de tipo C y corresponde a una cuenca sedimentaria que está en la fase de vejez.

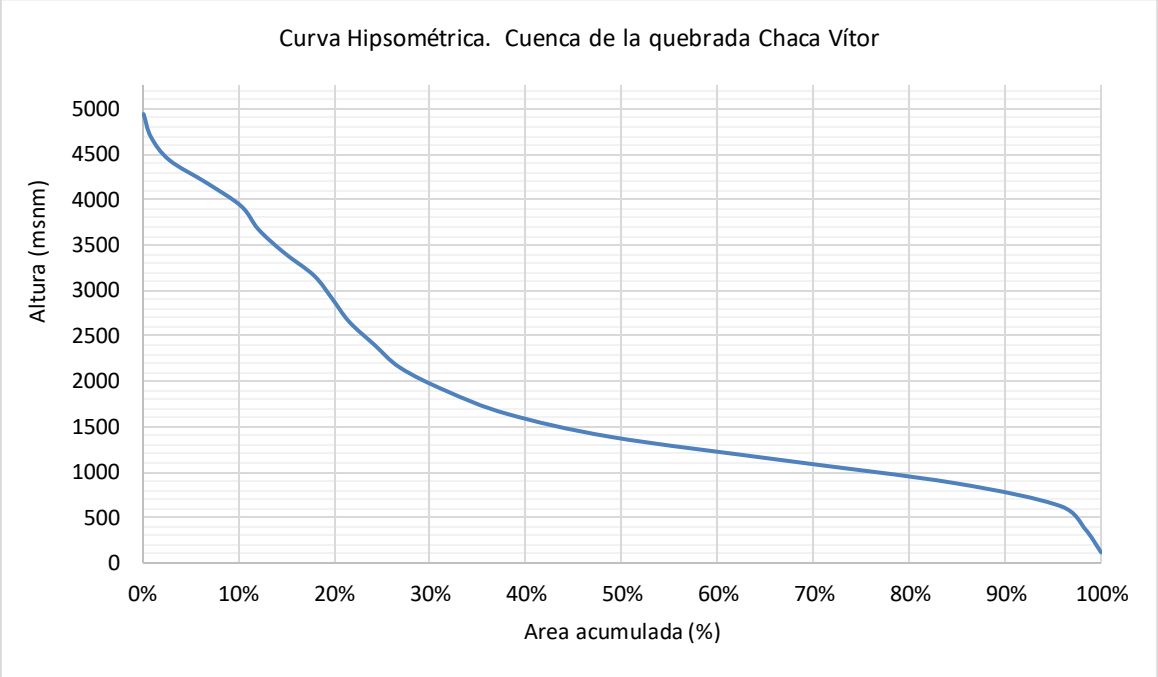


Figura 7.164 Curva hipsométrica de la cuenca de la quebrada Chaca Vítor. Fuente: elaboración propia.

7.5.1.2 Caracterización de la red de drenaje

El diagrama Unifilar de la quebrada Chaca Vítor se indica en la Figura 7.165. En este se incluyen los ríos y las quebradas aportantes de mayor interés. Allí se referencia el caudal medio anual medido en las estaciones fluviométricas administradas por la DGA.

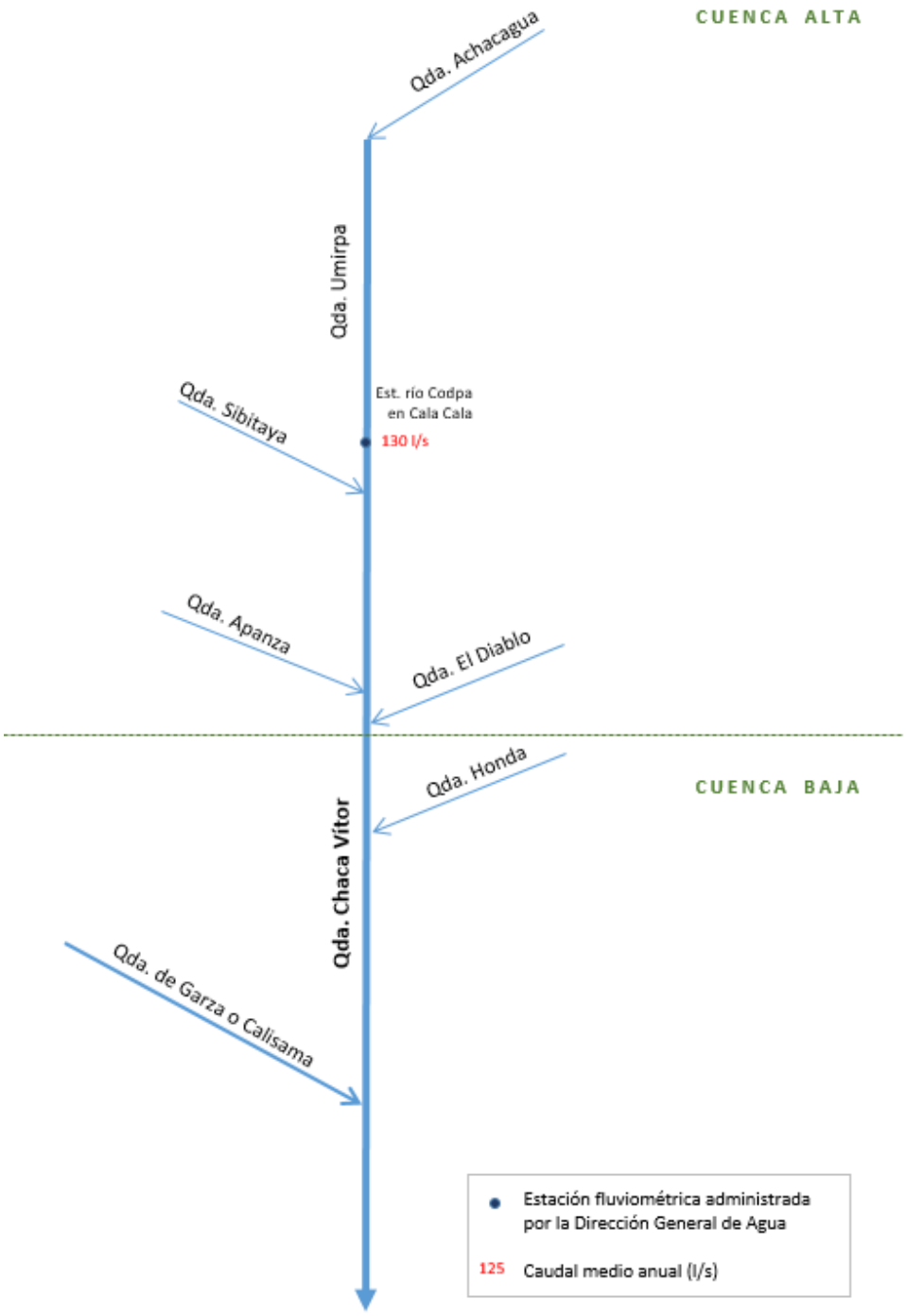


Figura 7.165 Diagrama unifilar de la quebrada Chaca Vítor. Fuente: elaboración propia.

7.5.1.3 Hidrometeorología

La cuenca de la quebrada Chaca Vítor cuenta con registros históricos de dos estaciones meteorológicas administradas por la DGA, Codpa y Chaca. La estación Chaca está suspendida desde el año 1983. De esta manera, dada la poca información disponible en la cuenca para analizar la distribución de la precipitación, se dispuso de datos reportados en otras estaciones ubicadas en cuencas cercanas. Las coordenadas y periodos de información disponible de las estaciones se presentan en la Tabla 7.91.

Cabe mencionar que la estación Codpa cuenta con instrumentos de medición de las variables: temperatura, humedad relativa y evaporación.

Tabla 7.91 Coordenadas y periodo de información de las estaciones meteorológicas de influencia en la cuenca. Fuente: elaboración propia.

Estación Meteorológica DGA	Código BNA	DATUM WGS84 H19S		Altitud	Periodo	Años	Estado
		UTM Este	UTM Norte				
CODPA	01410012-1	421.626	7.917.572	1.870	1961-2014	54	V
CHACA	01410011-3	378.824	7.919.035	350	1969-1983	15	S
BELEN -DCP	01300007-7	445.449	7.958.074	3.240	1937-2014	78	V
TIGNAMAR	01300008-5	447.889	7.945.449	3.230	1967-2014	48	V
ESQUIÑA	01502007-5	443.905	7.905.542	2.170	1975-2014	40	V
RIO CAMARONES EN CHILPE	01502008-3	434.751	7.905.359	1.565	2006-2014	9	V
CUYA	01502006-7	381.463	7.886.435	200	1965-1979	15	S

V: Vigente; S: Suspendida.

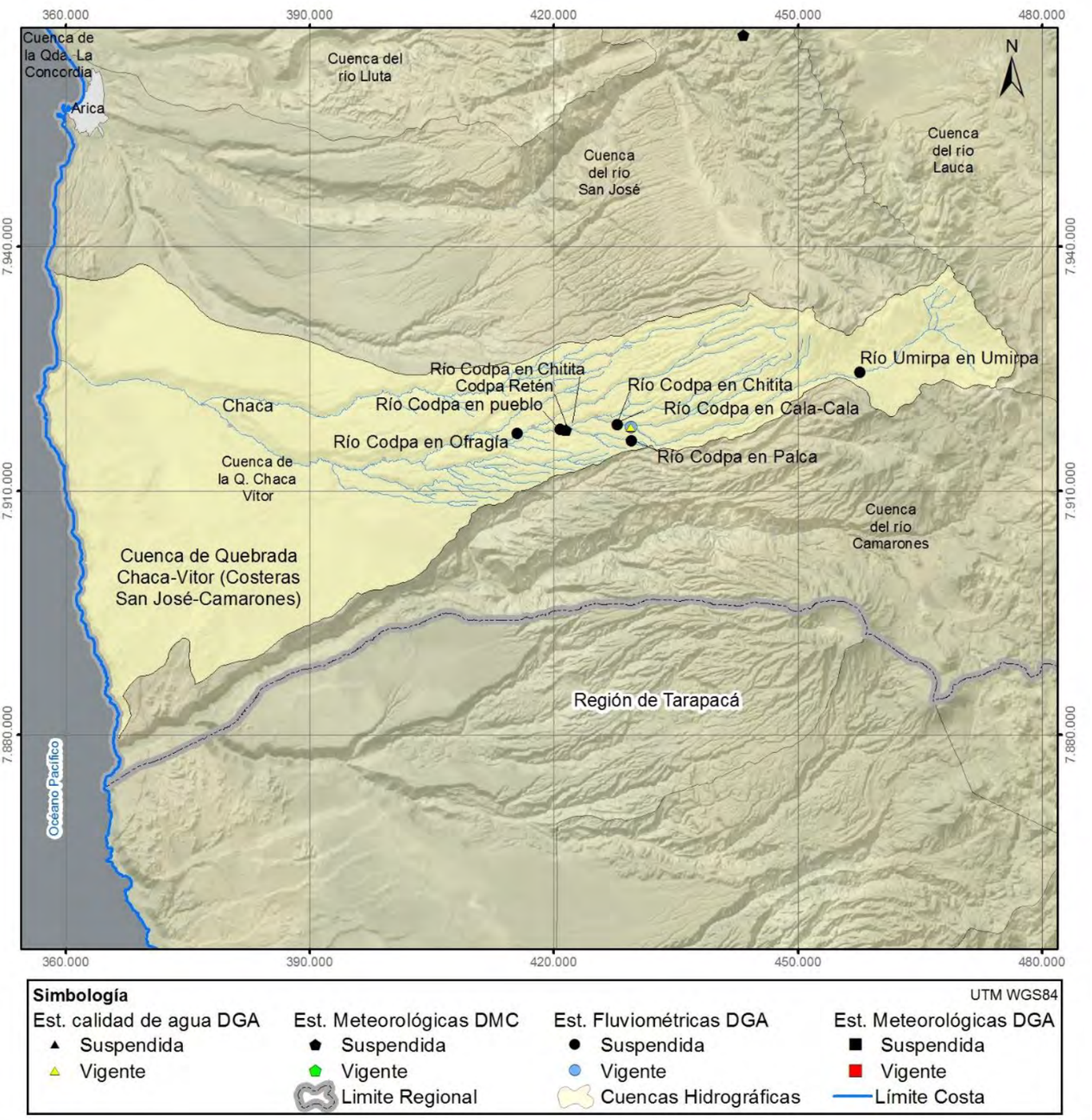


Figura 7.166 Ubicación estaciones de calidad, fluviométricas y meteorológicas en la cuenca de la quebrada Chaca-Vítor. Fuente: elaboración propia.

PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL Y MEDIA MENSUAL

Para el análisis de la precipitación media anual y media mensual se tomaron los registros de 30 años (periodo 1985 al 2014) de las estaciones pluviométricas existentes, que permiten analizar las variaciones de la precipitación. En la Figura 7.167 se presenta el registro de precipitación media anual en la estación Codpa [1.870 msnm]. Se observa los años húmedos, secos y promedio que se han presentado en la cuenca. Los años más húmedos en el periodo analizado, han sido 1997, 2001 y 2012. Por el contrario los años más secos en los últimos 30 años, fueron 1991, 1998, 2005, 2007 y 2010.

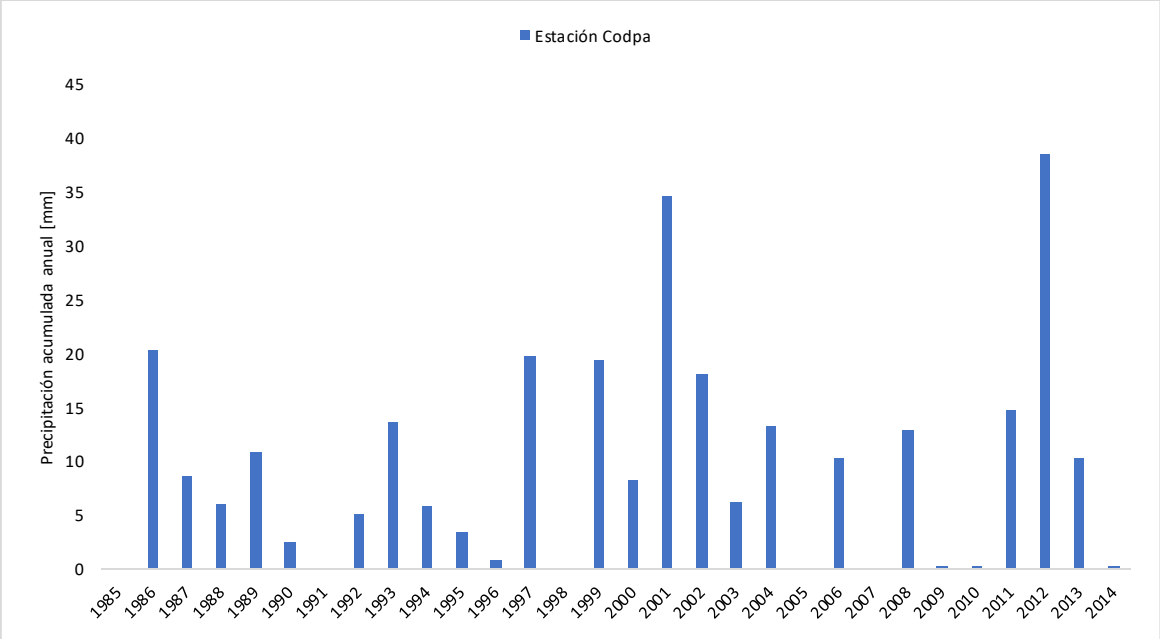


Figura 7.167 Precipitación media anual registrada en estación Codpa de la cuenca de la quebrada Chaca Vítor. Fuente: elaboración propia.

A nivel regional se trazaron las isoyetas de precipitación media anual, construidas a partir de los datos registrados en 28 estaciones meteorológicas, 24 de ellas ubicadas en la XV Región de Arica y Parinacota y las 4 restantes en la I Región de Tarapacá. La información utilizada de las estaciones fue previamente completada y analizada, como se explicó en el subcapítulo "Análisis de las variables espacial y temporal" del capítulo "Análisis Regional".

De esta manera, haciendo un zoom en la cuenca de la quebrada Chaca Vítor, las isoyetas de precipitación se presentan en la Figura 7.168. Se observa que la precipitación media anual en la cuenca de la quebrada Chaca Vítor aumenta gradualmente desde 0 mm/año en el sector bajo y medio, a partir de los 1.800 msnm se registran 10 mm/año y aumenta en relación a la altitud. En el sector alto (4.000 msnm), la precipitación media anual es cercana a los 180 mm/año. En la Tabla 7.92 se especifica la precipitación ponderada de acuerdo al área de influencia entre isoyetas, obteniendo que la precipitación media anual en la cuenca es del orden de los 32 mm.

Tabla 7.92 Ponderación de la precipitación según área de influencia entre isoyetas en la cuenca de la quebrada Chaca Vítor. Fuente: elaboración propia.

Isoyetas de Precipitación (mm)		Área entre isoyetas (km^2)	Precipitación media multianual 1985-2014 (mm)
0		1.482,9	0
0	10	567,4	2.837
10	20	71,4	1.071
20	50	127,7	4.469
50	100	115,9	8.689
100	150	97,4	12.179
150	200	80,6	14.112
> 200		225,8	45.150
			32,0 Precipitación media anual en la cuenca

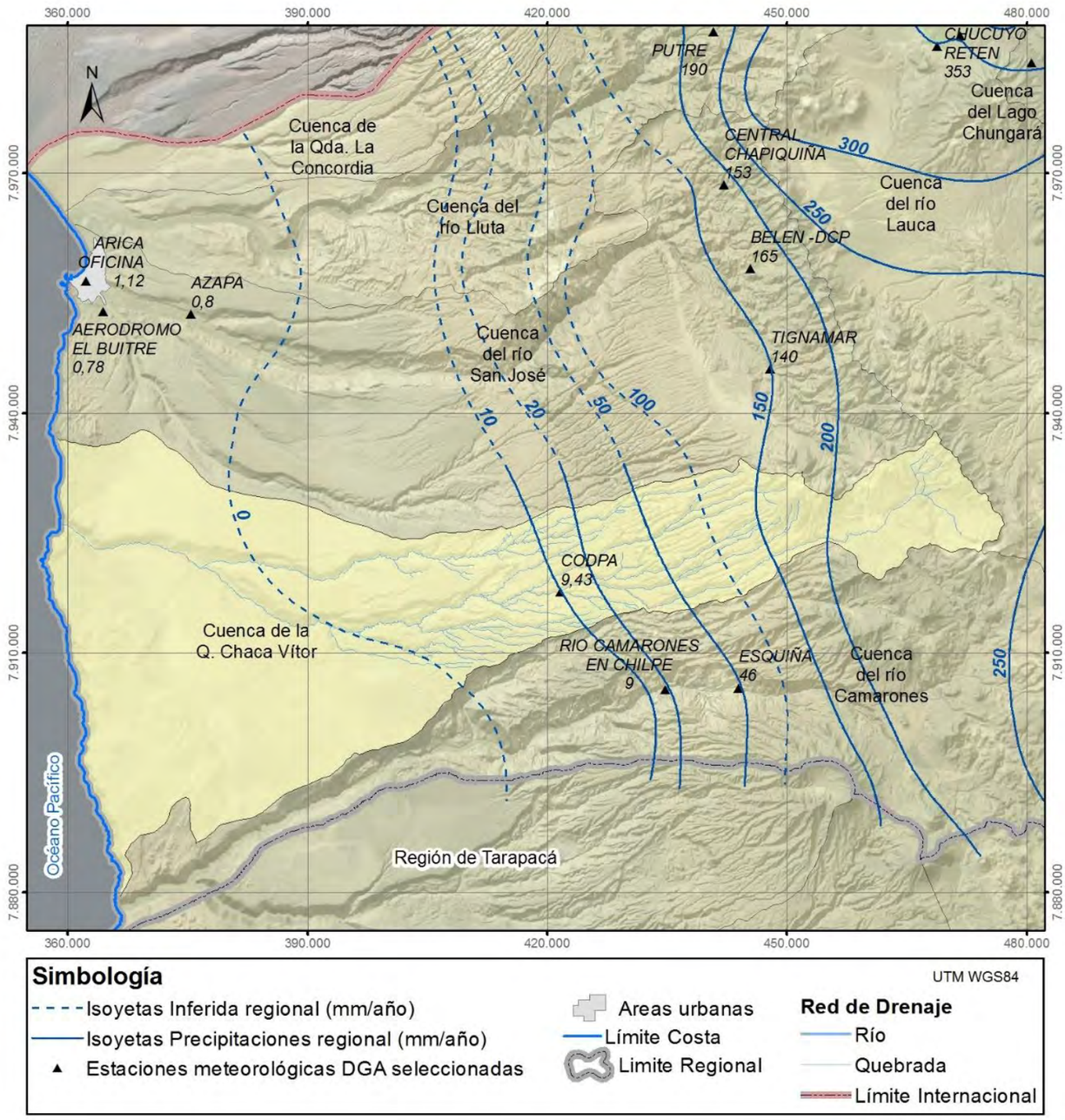


Figura 7.168 Isoyetas de precipitación media anual regional en la cuenca de la quebrada Chaca-Vítor. Fuente: elaboración propia.

La magnitud de la precipitación media mensual en la cuenca se presenta en la Tabla 7.93 y de manera gráfica se observa la variación temporal en la Figura 7.169. Las lluvias se concentran en los meses de Diciembre, Enero, Febrero y Marzo, del orden de los 4 mm a 20 mm en la parte baja-media hasta los 57 mm en la parte alta. Los meses más secos son mayo y junio, registrándose precipitaciones al mes de 0 y 1 mm.

Tabla 7.93 Precipitación media mensual en la cuenca de la quebrada Chaca Vítor. Fuente: elaboración propia.

Estación pluviométrica DGA	Altitud [msnm]	Precipitación media mensual [mm] periodo 1985-2014												
		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Pp ACUM
Codpa	1870	3,6	3,7	1,2	0,0	0,0	0,0	0,2	0,4	0,0	0,0	0,0	0,3	9,4
Belén -Dcp	3240	57	55	29,7	0,9	0,6	0,7	1,4	2,9	0,4	0,5	0,8	16	165,4
Tignamar	3230	52	43	20,9	1,4	0,7	0,5	1,3	1,8	1,5	0,2	0,5	16	139,8
Esquiña	2170	12	20	9,0	0,7	0,0	0,0	0,7	1,1	0,3	0,0	0,0	2,0	45,9
Rio Camarones En Chilpe	1565	2,8	4,3	0,6	0,1	0,0	0,0	0,4	0,3	0,2	0,0	0,0	0,4	9,1

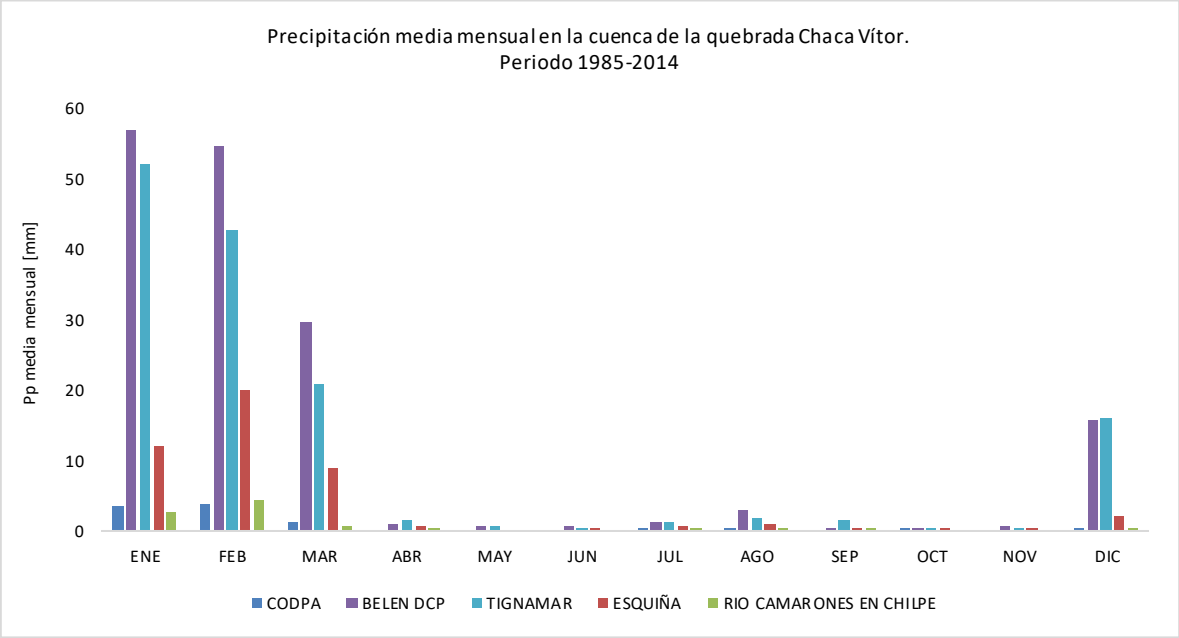


Figura 7.169 Variación mensual de la precipitación media en la cuenca de la quebrada Chaca Vítor. Fuente: elaboración propia.

EVAPORACIÓN MEDIA ANUAL Y MEDIA MENSUAL

En la cuenca el valor promedio de evaporación potencial registrado en la estación Codpa [1.870 msnm] anualmente alcanza los 1700 mm, equivalente a una tasa de evaporación de 4,6 mm/día. En la Figura 7.170 se presenta la evaporación media mensual. Se observa una variación entre 94 mm en el mes de junio hasta 182 mm en el mes de diciembre.

En el subcapítulo "Evapotranspiración" del componente "Análisis Regional", se presentan todas las estaciones meteorológicas de la XV Región que miden evaporación potencial del tanque tipo A. Se realiza un análisis más detallado a nivel regional.

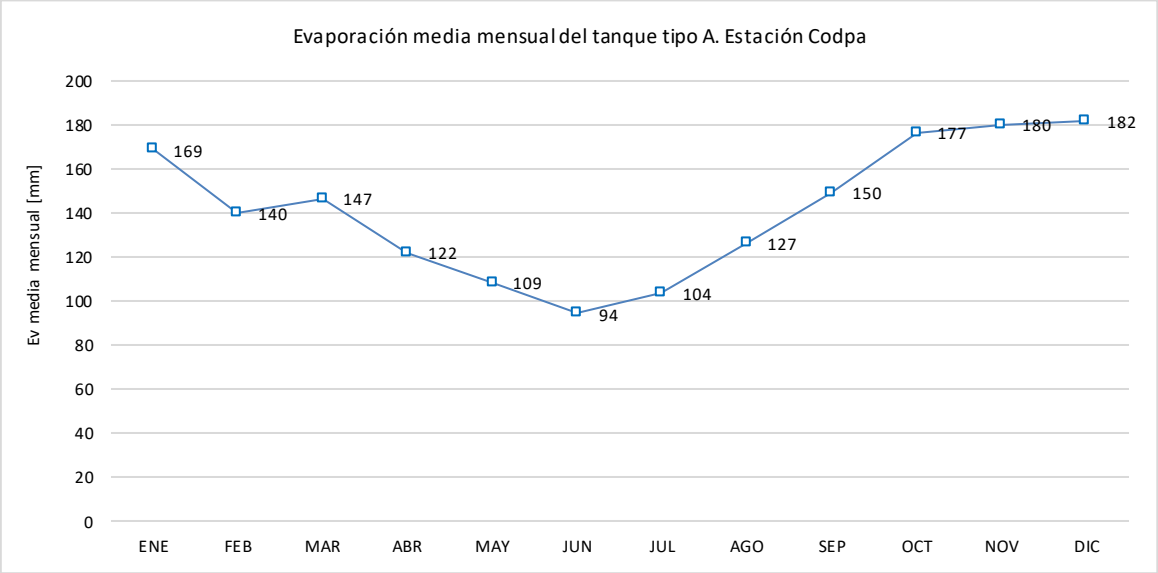


Figura 7.170 Evaporación media mensual potencial en Estación Codpa [1.870 msnm]. Fuente: elaboración propia.

EVAPOTRANSPIRACIÓN MEDIA ANUAL Y MEDIA MENSUAL

Para el análisis de la evapotranspiración media en la cuenca de la quebrada Chaca Vítor, se utilizó como referente el estudio de Mayco Consultores (2013). En este estudio se ha determinado la evapotranspiración mensual en relación a los acuíferos intermedio y costero de la cuenca, de acuerdo a datos obtenidos de la Comisión Nacional de Riego de Chile.

En la Tabla 7.94 se muestra la información de evapotranspiración media mensual en la cuenca. Como se observa los meses con menor evapotranspiración son junio y julio, y los registros más altos se presentan en diciembre y enero.

En promedio en la cuenca de la quebrada Chaca Vítor se presenta una evapotranspiración promedio mensual entre los 122 mm y 143 mm.

Tabla 7.94 Evapotranspiración media mensual en la cuenca de la quebrada Chaca Vítor. Fuente: MAYCO Consultores (2013).

Cuenca	Acuífero	Evapotranspiración media mensual [mm]												
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
Quebrada Chaca Vítor	Inter-medio	250	203	169	112	78	58	62	85	113	158	192	240	1.720
	Costero	212	172	143	95	66	49	53	72	96	134	163	204	1.459

Adicionalmente, a partir de la información disponible en el producto satelital MODIS 16, y siguiendo la metodología detallada en el Anexo VI, se estimó la evapotranspiración de la cuenca. MODIS 16 incluye información de evapotranspiración y flujo de calor latente real, estimado a partir de información satelital remota y utilizando como método de cálculo, para el caso de la evapotranspiración, la ecuación de Penman-Monteith. El valor medio anual estimado para la cuenca, considerando datos entre 2000 y 2014 es de 43,1 [mm/año].

7.5.1.4 Fluviometría

En la cuenca de la quebrada Chaca Vítor se dispone de una sola estación de control fluviométrico, Codpa en Cala-Cala, controlada por la DGA y cuenta con registros de caudal desde el año 1994. Las coordenadas y periodos de información disponible de la estación se presentan en la Tabla 7.95.

Tabla 7.95 Coordenadas y periodo de información de la estación fluviométrica en la cuenca de la quebrada Chaca Vítor. Fuente: elaboración propia.

Estación Fluviométrica DGA	Código BNA	UTM Este	UTM Norte	Altitud [msnm]	Periodo	Años	Estado
Rio Codpa En Cala - Cala	01410004-0	429.731	7.918.189	1.745	1994-2014	20	V

V: Vigente.

CAUDAL MEDIO ANUAL Y MEDIO MENSUAL

La escorrentía superficial media anual registrada en la cuenca sobre el río Codpa o quebrada Chaca Vítor alcanza valores de 0,13 m^3/s o 130 l/s en el sector medio (1.800 msnm), ver Tabla 7.96. De acuerdo a Mayco (2013), el caudal medio anual es 0,15 m^3/s, diferencia que puede estar relacionada con el intervalo de años analizados.

El río Codpa tiene una cuenca exorreica, aunque de caudal intermitente de pequeña magnitud al ser su régimen hídrico de tipo pluvial.

Tabla 7.96 Caudal medio anual para el año hidrológico en la cuenca de la quebrada Chaca Vítor. Fuente: elaboración propia.

Estación Fluviométrica	Altitud [msnm]	Periodo		CAUDAL MEDIO ANUAL [m^3/s]			
		1985-2014	otro [años]	Min	Max	Prom	Desv est
Río Codpa En Cala-Cala	1.745		23	0,01	0,27	0,13	0,07

De acuerdo al análisis de la variación temporal a nivel mensual de los escurrimientos, ver Tabla 7.97, durante los meses de enero y febrero se registran los caudales medios más altos del año hidrológico, estos caudales superan la media anual. Presentándose caudales sobre el río Codpa en el mes de febrero del orden de los 0,38 m^3/s en la estación Codpa en Cala-Cala. En los meses de junio y julio se observa un pequeño incremento del caudal medio.

En la Figura 7.171 se observa con mayor claridad la variación de los caudales medios mensuales y su respuesta a la precipitación media mensual en la cuenca. Cabe mencionar que no se cuenta con más estaciones de control fluviométrico sobre la cuenca, que permita tener otra referencia del caudal que fluye en otro afluente de importancia.

Tabla 7.97 Caudal medio mensual en la cuenca de la quebrada Chaca Vítor. Fuente: elaboración propia.

Estación Fluvio-métrica	Caudal Medio Mensual [m^3/s]												
	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Prom
Río Codpa en Cala-Cala	0,02	0,02	0,04	0,31	0,38	0,32	0,10	0,07	0,07	0,09	0,04	0,03	0,13

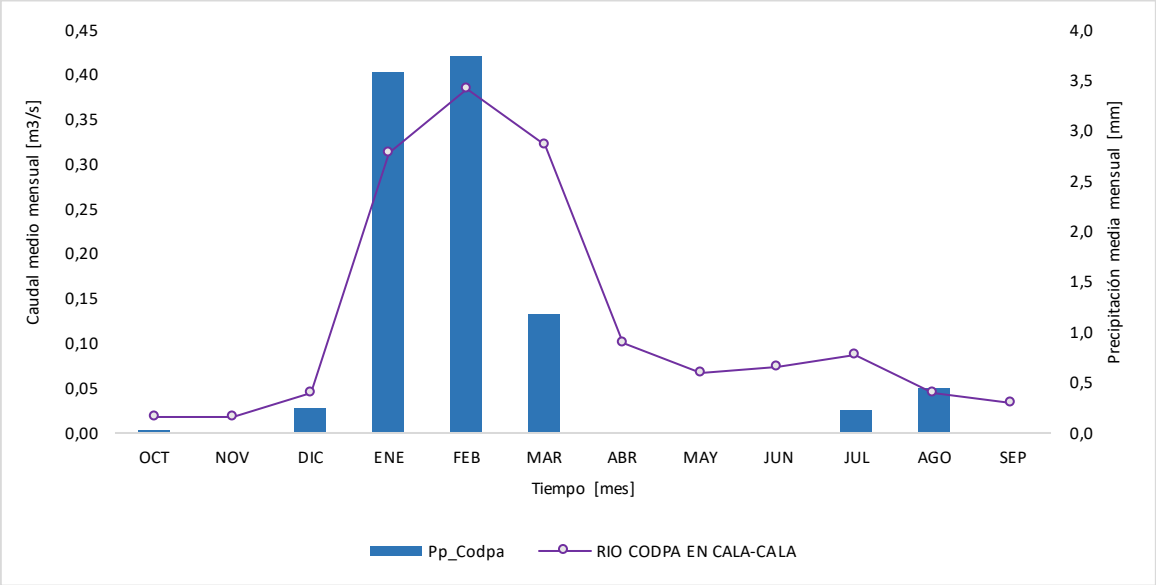


Figura 7.171 Caudal medio mensual en la quebrada Chaca Vítor y su relación con la precipitación media. Fuente: elaboración propia.

ANÁLISIS DE FRECUENCIA DE LOS CAUDALES

Mediante el análisis de frecuencia de las series de caudales mensuales, se determinó si los años secos y los años lluviosos mantienen el mismo comportamiento que el año hidrológico medio. En el Anexo VI se detalla la metodología. Para ello se graficaron curvas de variación estacional definidas para distintas probabilidades de excedencia.

En la Tabla 7.98 y Figura 7.172, se presentan los caudales mensuales para las probabilidades de excedencia del 15% (año muy húmedo), 85% (año muy seco) y caudal medio en la estación Rio Codpa en Cala-Cala.

Tabla 7.98 Caudales mensuales asociados a probabilidad de excedencia. Fuente: elaboración propia.

Estación: Río Codpa en Cala-Cala													
Pexc (%)	T (años)	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep
15	6,7	0,10	0,10	0,10	0,80	0,70	0,70	0,20	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
85	1,2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Promedio		0,02	0,02	0,04	0,31	0,38	0,32	0,10	0,07	0,07	0,09	0,04	0,03

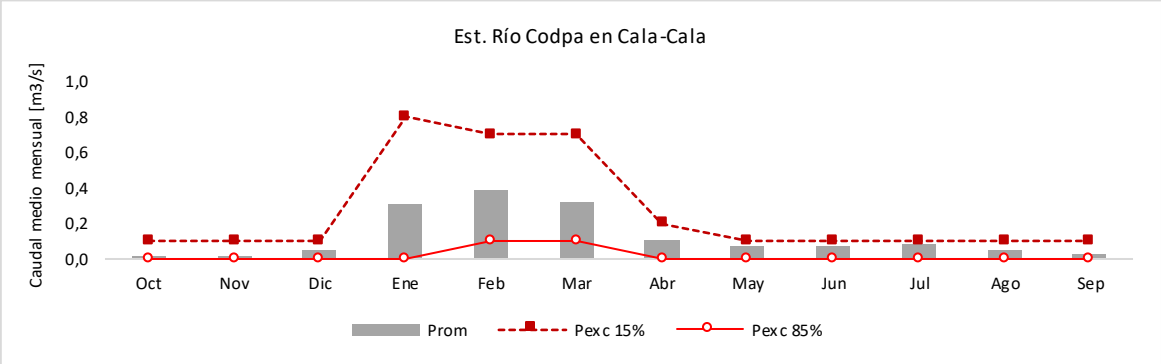


Figura 7.172 Curvas de variación estacional asociadas a probabilidad de excedencia de 15% y 85% y caudal medio mensual en la estación fluviométrica Río Codpa en Cala-Cala. Fuente: elaboración propia.

Analizando la Figura 7.172, se observa un comportamiento similar entre los caudales de un año medio con los caudales de un año húmedo (Pexc 15%). Sin embargo los caudales de un año húmedo superan dos veces en magnitud al año normal, aun considerando que sobre la cuenca escurre caudales de pequeña magnitud, menor a los 1000 l/s en un año húmedo.

Por el contrario, no hay variación de los caudales en los meses del año seco (Pexc 85%), a excepción del mes de Marzo, siendo en su mayoría 0 m^3/s el caudal de escurrimiento. Se podría indicar que el río Codpa bajo esta probabilidad de excedencia que quedaría básicamente seco.

7.5.1.5 Levantamiento Hidrológico

Para el presente estudio se realizaron cuatro campañas de terreno, en donde se seleccionaron 10 puntos de medición, incluyendo la quebrada Chaca Vítor como cauce principal y afluentes de importancia para la escorrentía de la cuenca. Los métodos de aforo utilizados fueron el molinete y de forma manual. Por otra parte, existen registros históricos de aforos, los cuales se tuvieron en cuenta para caracterizar de mejor forma la hidrología de la cuenca en corrientes sin control fluviométrico.

En la Tabla 7.99 se especifican las coordenadas de los puntos aforados tanto históricos como recientes y en las Figura 7.173 y Figura 7.174 se muestra su localización en la cuenca. Los resultados de las campañas hidrométricas de los puntos aforados, se presentan en las Tabla 7.100 y Tabla 7.101.

Tabla 7.99 Coordenadas de los puntos aforados en estudios de referencia y campaña reciente. Fuente: elaboración propia.

Sitio de Aforo	ID	UTM Este	UTM Norte	Año	Estudio de referencia
Chaca alto	A1	381.941	7.916.965	2013	Mayco Consultores (2013)
Chaca bajo antes de Garza	A2	376.692	7.920.677		
Chaca bajo después de Garza	A3	376.620	7.929.691		
Chaca bajo después Panamericana	A4	376.457	7.920.585		
Q. Vítor	A5	372.564	7.922.958		
Codpa	VIAS-07	421.658	7.917.593	2015 - 2016	ICASS (2016)
Ofragia	VIAS-09	416.856	7.917.610		
Guañacagua	VIAS-10	425.230	7.918.944		
Pozón Chitita	VIAS-11	426.927	7.918.580		
Chitita	VIAS-12	429.543	7.918.069		
-	VIAS-90	459.668	7.927.536		
-	VIAS-91	461.893	7.925.875		
-	VIAS-92	473.239	7.927.415		
-	VIAS-108	370.065	7.923.773		
	VIAS-150	466.027	7.930.163		

Como se observa en las Figura 7.173 y Figura 7.174, existe similitud en la localización de algunos aforos históricos con aforos recientes realizados en la cuenca. A continuación se comenta en detalle.

El aforo VIAS-108 se ubica en la parte baja de la quebrada Vítor, este coincide con el aforo histórico A5 (Mayco, 2013). A nivel mensual es consecuente el mes de febrero, para el año 2013 se aforó un caudal de 37 l/s y en el año 2016 el caudal fue de 378,9 l/s, mostrando con esta gran diferencia que el caudal aforado sólo representa un instante específico y adicionalmente que el año 2013 se presentó baja precipitación.

Los aforos realizados en la parte media de la cuenca, en especial los sitios VIAS-10 y VIAS-12, registraron los caudales más altos en la segunda campaña (Feb/2016), atribuidos a las fuertes precipitaciones del invierno altiplánico. En la cuarta campaña (Ago 2016), los caudales aforados fueron similares, de 86 y 87 l/s respectivamente.

En el sitio VIAS-90, ubicado sobre un afluente de la parte alta, los caudales aforados fueron similares durante las tres campañas (Nov/2015, May y Ago/2016). Siendo este de 16 a 22 l/s, lo que podría deberse al caudal base constante de su nacimiento.

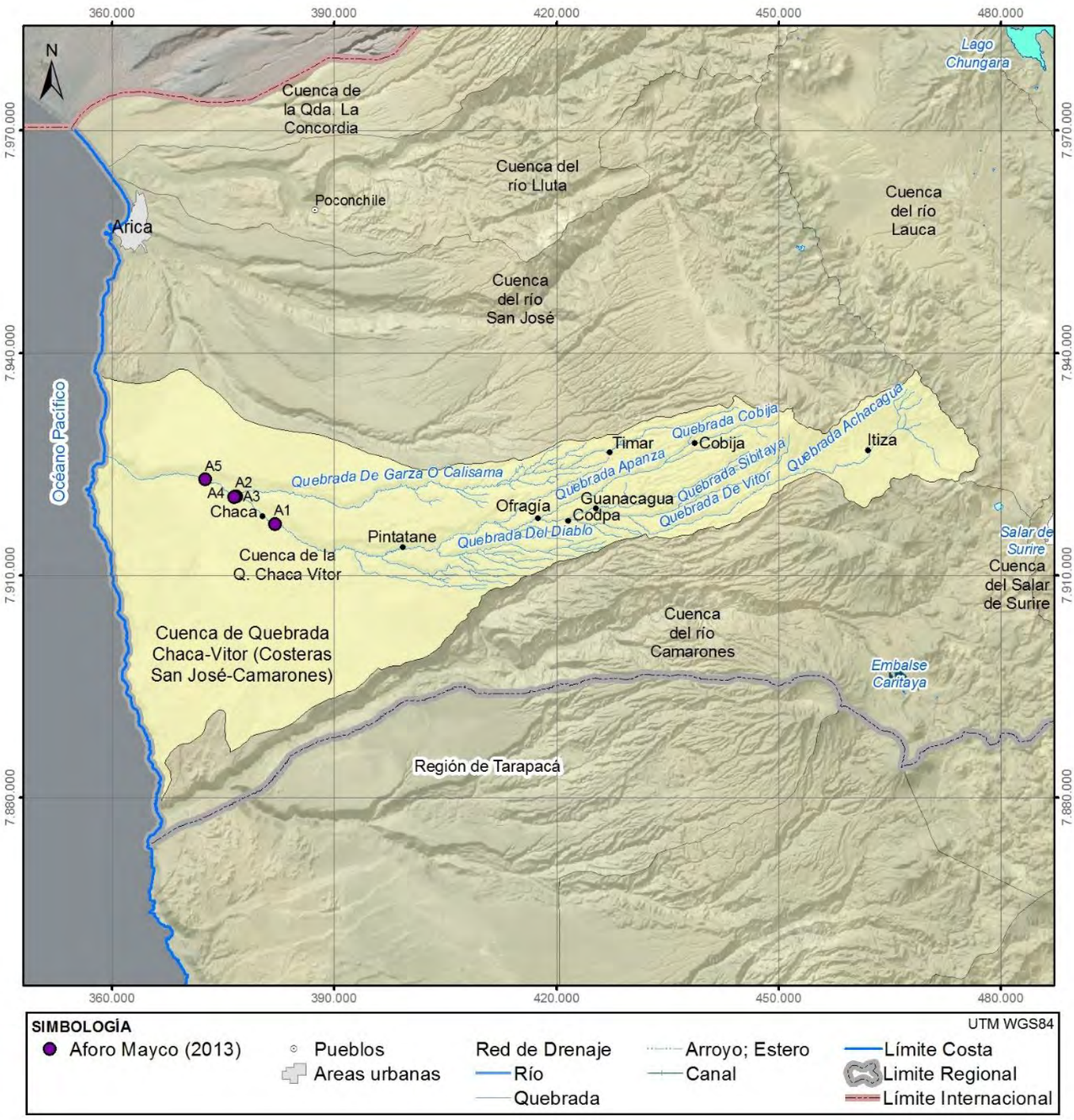


Figura 7.173 Localización de los aforos históricos encontrados en la cuenca de la quebrada Chaca Vítor. Fuente: elaboración propia.

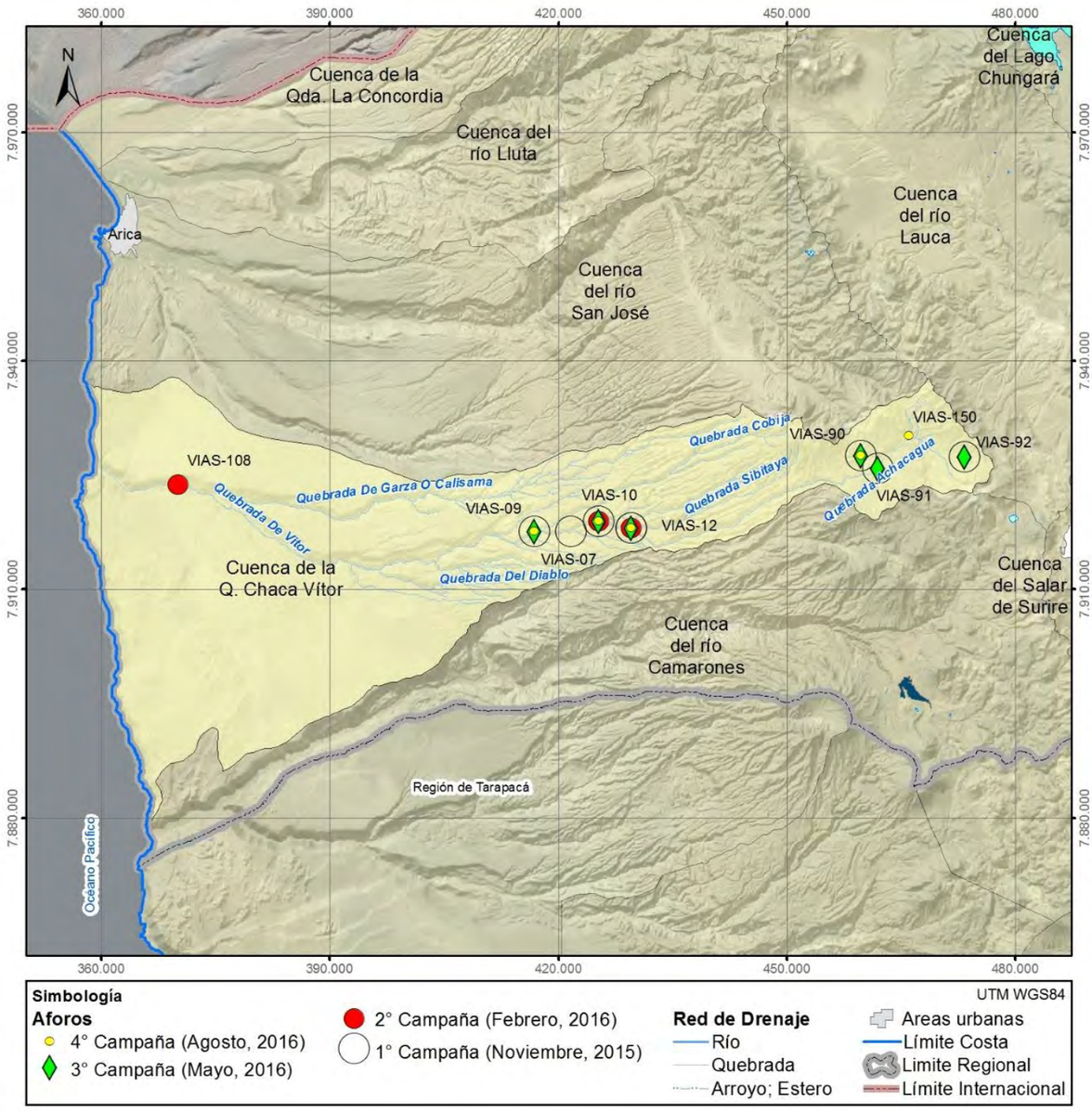


Figura 7.174 Localización de los aforos en las cuatro campañas este estudio en la cuenca de la quebrada Chaca Vítor. Fuente: elaboración propia.

Tabla 7.100 Caudales obtenidos de las campañas de aforos en la cuenca de la quebrada Chaca Vítor. Fuente: elaboración propia.

No	Sitio de aforo	CAUDAL AFORADO							
		Campaña I 10-11 Nov 2015		Campaña II 21-23 Feb 2016		Campaña III 09-10-14 Mayo 2016		Campaña IV 3-4-6 Agosto 2016	
		Método	Q [l/s]	Método	Q [l/s]	Método	Q [l/s]	Método	Q [l/s]
1	VIAS-07	Manual	2,1						
2	VIAS-09	Manual	0,3			Manual	50,6	Molinete	54,5
3	VIAS-10	Manual	10,0	Molinete	465,5	Molinete	202,7	Molinete	86,1
4	VIAS-11	Manual	5,0	Molinete	635,6				
5	VIAS-12	Manual	30,0			Molinete	94	Molinete	87,1
6	VIAS-90	Manual	20,0			Manual	16,1	Manual	21,9
7	VIAS-91	Manual	40,0			Manual	460,5		
8	VIAS-92	Manual	5,0			Manual	1,25		
9	VIAS-108			Molinete	378,9				
10	VIAS-150							Manual	44,5

Tabla 7.101 Registro de los aforos históricos encontrados de la cuenca de la quebrada Chaca Vítor. Fuente: elaboración propia.

ID Sitio Aforado	Año	CAUDAL AFORADO [l/s]											
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
A1	2013		287										
A2			79										
A3			79										
A4			78										
A5			37										

7.5.1.6 Modelación hidrológica

Las generalidades del modelo hidrológico HEC-HMS utilizado para la modelación hidrológica de la cuenca se describen en el Anexo VI. A continuación se detalla el planteamiento concebido, información base, parámetros calibrados y resultados obtenidos del modelo.

PLANTEAMIENTO DEL MODELO

MODELO DE CUENCA

De la cuenca de la quebrada Chaca Vítor se delimitó una subcuenca de la parte alta (río Codpa hasta Cala-Cala), a partir de la estación fluviométrica del mismo nombre, ubicada en el sector de precordillera. Se decidió no incluir en la modelación la parte media-baja de la cuenca, por no contar con estación de control fluviométrico a la salida de la cuenca.

Para representar el movimiento del agua en la subcuenca se utilizó un conector "Reach" que sirve para calcular el tránsito del hidrograma a medida que circula por el cauce, para las extracciones de agua superficial se utilizó el ícono "diversión" y a la salida de la cuenca se utilizó un sumidero o "Sink". Ver esquema de la cuenca en Figura 7.175.

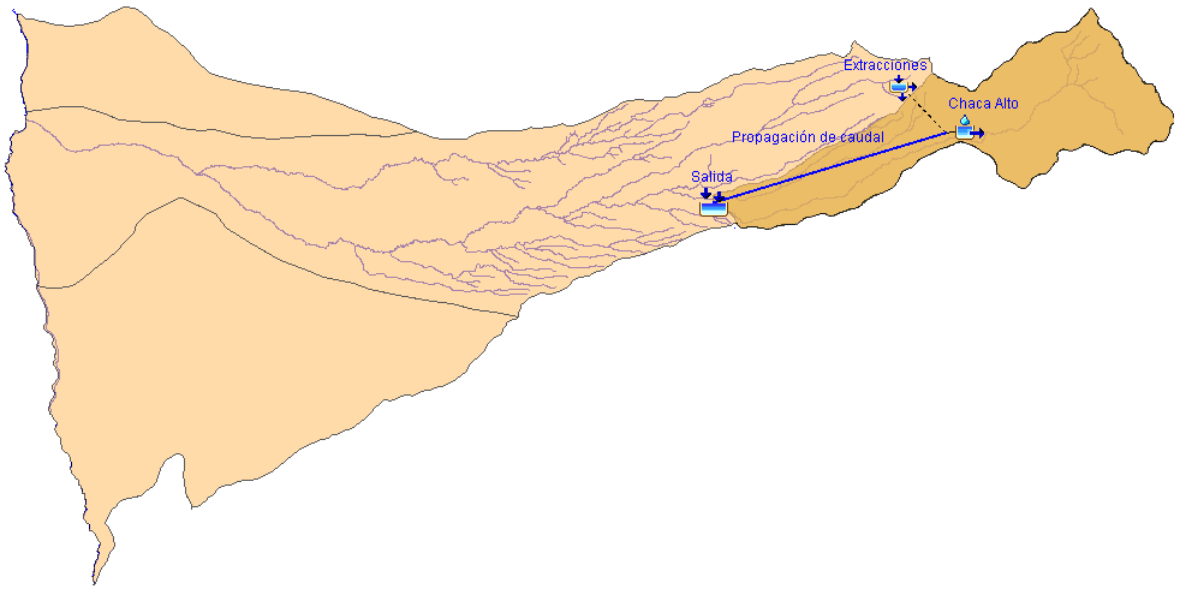


Figura 7.175 Esquema en el modelo hidrológico HEC-HMS de la cuenca de la quebrada Chaca Vítor. Fuente: elaboración propia.

MODELO METEOROLÓGICO

Las series meteorológicas utilizadas en cada subcuenca se describen a continuación:

- *Precipitación diaria:* Los registros corresponden a la estación meteorológica BELEN.

- *Evaporación media mensual:* Los registros corresponden a la estación meteorológica CODPA.

ESPECIFICACIONES DE CONTROL

El intervalo del tiempo modelado es diario, la fecha de inicio fue 01-ene-1985 y la fecha de finalización fue 31-dic-2014.

INFORMACIÓN BASE

Se requiere ingresar parámetros físicos de la cuenca definidos por el modelo continuo seleccionado, así como información antrópica que eventualmente modifica las condiciones naturales del agua en la cuenca y registros fluviométricos para la posterior calibración. Las series de tiempo utilizadas se describen a continuación:

- El tiempo de retardo se determinó para cada subcuenca como el 60% del tiempo de concentración, aplicando la ecuación de *California Highways* en base a la longitud del cauce y al delta altitudinal.
- *Caudal de extracción:* se utilizó el registro de concesiones de agua superficial de la DGA otorgadas en la cuenca, considerando que éste caudal es constante y de uso consuntivo, además de que no fuera mayor al disponible en el río.
- *Caudal diario observado*: para la calibración del modelo se utilizaron series de caudales diarios para el mismo periodo de la simulación de la estación Río Codpa en Cala-Cala.

Dado que no se cuenta con mediciones directas de todos los parámetros físicos requeridos para representar adecuadamente el comportamiento hidrológico de la cuenca, estos fueron objeto de calibración y los escogidos finalmente fueron los que mejor representaron los caudales simulados al comparar con los observados. En la Tabla 7.102 se presentan los parámetros físicos definidos para el modelo SMA.

El análisis estadístico de dicha comparación fue basado en los resultados del coeficiente Nesh-Sutcliffe, ampliamente utilizado en la calibración de modelos hidrológicos para el chequeo de la bondad de ajuste. En la subcuenca río Codpa hasta Cala-Cala este valor fue 0,54, siendo un ajuste bueno ≥0,4.

Tabla 7.102 Parámetros utilizados para el modelo SMA en la cuenca de la quebrada Chaca Vítor. Fuente: elaboración propia.

Zonas definidas en el modelo hidrológico	Parámetro	Unidad	Subcuenca río Codpa hasta Cala-Cala
Intercepción vegetación	Almacenamiento inicial en vegetación	[%]	10
	Capacidad almacenada por intercepción de vegetación	[mm]	5
Acumulación en depresiones del terreno	Almacenamiento inicial en depresiones	[%]	10
	Capacidad almacenada en depresiones	[mm]	5
	Infiltración máxima	[mm/h]	8
Zona no saturada (Matriz de Suelo)	Almacenamiento inicial en matriz de suelo	[%]	5
	Capacidad almacenada en el suelo	[mm]	8
	Capacidad almacenada en la zona de tensión del suelo	[mm]	3,2
	Percolación máxima del suelo hacia acuífero libre	[mm/h]	6
Zona saturada (acuífero superficial)	Almacenamiento inicial en acuífero superficial	[%]	5
	Capacidad almacenada en acuífero superficial	[mm]	10
	Percolación máxima del acuífero superficial hacia el acuífero profundo	[mm/h]	2
	Coeficiente de almacenamiento del acuífero superficial	[h]	80
Zona saturada (acuífero profundo)	Almacenamiento inicial en acuífero profundo	[%]	5
	Capacidad almacenada en acuífero profundo	[mm]	10
	Percolación máxima del acuífero profundo	[mm/h]	2
	Coeficiente de almacenamiento del acuífero profundo	[h]	80

RESULTADOS MODELO HIDROLÓGICO

Se compararon a nivel diario los caudales observados con los caudales simulados, existiendo similitud en algunos y diferencias en otros para todo el periodo analizado. Sintetizando dicha información, se calculó el caudal medio anual en los años con más de 9 meses de información en el caso de los datos observados. Los registros incompletos de la estación Río Codpa en Cala-Cala fueron los años 1993-1994, 1997-1999, 2001, 2004 y 2009-2012. Según estudio SDT N° 306 (DEP-DGA, 2010), la discontinuidad en los registros en la estación son debido a los daños sufridos producto de las crecidas veraniegas.

Los resultados del caudal observado y caudal simulado a nivel medio anual se muestran en la Figura 7.176. Allí se observa que los caudales simulados en los

periodos 1985-1987 y 2006-2008, estarían subestimados en comparación con los caudales observados, situación que podría atribuirse a la regulación de las extracciones aguas arriba, las cuales fueron consideradas constantes, además el cauce pudo haber recibido escurrimientos adicionales por crecidas instantáneas que superan los valores medios.

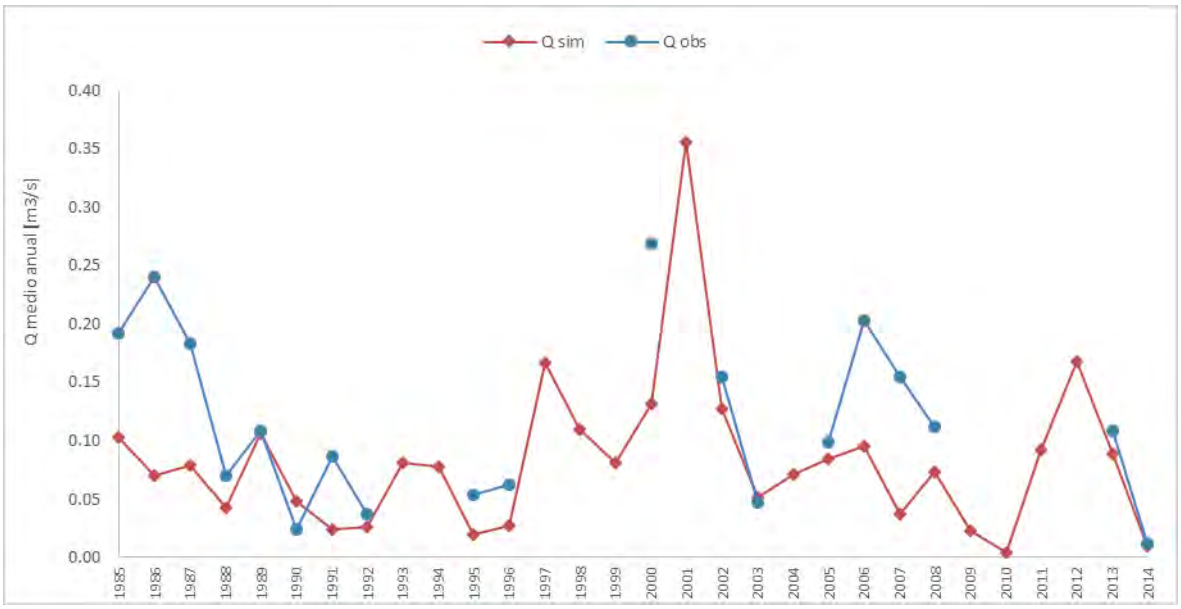


Figura 7.176 Comparación caudales medios anuales observados y simulados en la subcuenca río Codpa hasta Cala-Cala. Fuente: elaboración propia.

7.5.1.7 Estimación de la recarga de aguas subterráneas

La principal fuente de recarga del acuífero de la quebrada Chaca Vítor, proviene de las crecidas veraniegas del río Codpa, producto de las precipitaciones durante el Invierno Altiplánico, y en menor proporción, son los aportes del agua que infiltra desde depresiones. En la parte baja de la cuenca, ocurre el mayor aprovechamiento de los recursos subterráneos.

ANTECEDENTES

En el estudio SIT N° 312 - Mayco Consultores (2013), se realizó un balance hídrico en sectores acuíferos de la parte baja de la cuenca, los cuales fueron sectorizados como zonas potenciales de recarga (acuífero Intermedio y acuífero Costero), en la Figura 7.177 se resalta con cuadro rojo las áreas analizadas. A continuación se mencionan algunos de los supuestos considerados en el estudio:

- Toda el agua que escurre hacia Caleta Vítor (punto de salida de la cuenca), es propia de los recursos que maneja la cuenca. Se considera que no existen transvases de cuencas vecinas.
- El punto de referencia del caudal que entra a la cuenca es la estación rio Codpa en Cala-Cala. Este supuesto es consiste con el estudio Mayco (2013). Sin embargo, se tiene presente que aguas arriba de la estación fluviométrica existe un canal de regadío, cuyo caudal medio anual es de 10 l/s y la capacidad máxima es de 30 l/s.
- El sector denominado "acuífero intermedio", se localiza entre la unión de las quebrada Chaca Vítor y Garza por el poniente, hasta 6 km aguas arriba. Posee un ancho medio de 500 m y una pendiente del 2%.
- El sector denominado "acuífero costero", se localiza a 6 km aguas arriba de la desembocadura de la quebrada Chaca Vítor en Caleta Vítor. Posee un ancho medio de 350 m y una pendiente del 2%.

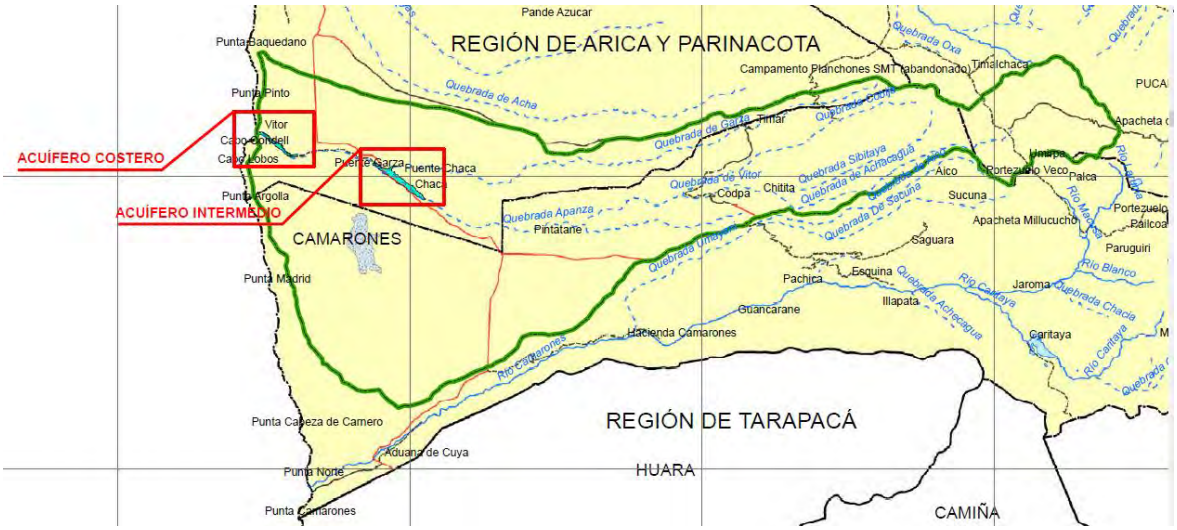


Figura 7.177 Zonas de interés seleccionadas (recuadros rojos) como áreas acuíferas, en donde se produce la principal recarga al acuífero regional en la cuenca de la quebrada Chaca Vítor. Fuente: Mayco (2013).

Uno de los métodos utilizados en el estudio para la estimación de la recarga, fue denominado "estimación de oferta por infiltración", en donde básicamente se realizó un balance hídrico, reescrito así:

$$P \cdot A = Q + ETo \cdot A + c \cdot P \cdot A$$

Donde; P: precipitación [L/T], A: área de control [L^2], Q: caudal superficial en cuenca [L^3/T], ETo: evapotranspiración [L/T], c: coeficiente de infiltración [Adimensional].

Para determinar el coeficiente de infiltración, Mayco (2013) tomó rangos de referencia de literatura, y a su vez, fueron relacionados con coeficientes de evapotranspiración. El caudal medio anual considerado para la calibración del modelo fue de 150 l/s, el cual es el registrado en la estación río Codpa en Cala-Cala. En la Tabla 7.103 se presentan los resultados obtenidos en la estimación de la recarga a escala media anual por zonas de interés en la cuenca de la quebrada Chaca Vítor.

Tabla 7.103 Valores de recarga estimados en la cuenca de la quebrada Chaca Vítor. Fuente: elaboración propia.

Sitio referenciales	Coord. UTM Norte	Coord. UTM Este	Valor recarga estimado * [l/s]
Inicio acuífero intermedio	7.916.877	382.164	195
Junta quebrada Garza con acuífero Intermedio	7.920.812	376.199	197
Inicio de acuífero Costero	7.922.899	363.937	210
Salida al mar del acuífero Costero	7.926.021	359.474	210

* Valores adaptados de Mayco (2013)

Para la estimación de la recarga media anual, se implementó una metodología regional ampliamente desarrollada para las cuencas altiplánicas y precordilleranas de vertiente pacífica, como referencia principal se contó con el estudio SDT n° 317 liderado por DEP-DGA (2011). Adicionalmente, para distribuir la recarga a nivel mensual, en este proyecto se plantea una metodología simplificada basada en los procesos hidrológicos que predominan en la región. Los detalles del procedimiento realizado en las cuencas de la región de Arica y Parinacota se presenta en el anexo VI.

Con relación a las subcuencas analizadas en la cuenca de la quebrada Chaca Vítor, en la Tabla 7.104 se presenta la información base utilizada. Cabe mencionar que el cálculo de la precipitación media anual se realizó utilizando el método de las isoyetas, descrito en el capítulo "Hidrometeorología" del Análisis Regional y para el caudal medio anual se contó con la información de la estación fluviométrica río Codpa en Cala-Cala.

Tabla 7.104 Información base utilizada de la subcuenca del río Codpa hasta Cala-Cala. Fuente: elaboración propia.

Subcuencas	Coord. UTM N del Centroide	Altitud media [msnm]	Área [km^2]	Pp media anual [mm/año]	Pp media anual [l/s]	Q medio anual [l/s]
Río Codpa hasta Cala - Cala	7.925.350	3.647	381	154	1.860,5	130

Para la estimación de la recarga neta, se estableció una relación entre el promedio de los caudales mínimos decadales (meses de junio, julio y agosto) y los caudales medios observados, y lo mismo pero con los caudales calculados. Lo anterior se adoptó siguiendo las hipótesis y conceptos hidrológicos del estudio SIT N° 317, a continuación se describen:

- Los flujos subterráneos son despreciables y los caudales superficiales controlados a la salida de la cuenca representan la escorrentía total.
- Se entenderá como "recarga neta de la cuenca", aquella parte de la escorrentía total de salida de una cuenca, compuesta por el agua que ha infiltrado al menos una vez y que ha transitado subterráneamente en algún momento, tal que su permanencia dentro de la cuenca es superior a la de un año hidrológico.
- Esta recarga neta o caudal base interanual de salida de la cuenca puede ser estimada, como el promedio de los mínimos decadales observados entre los meses de junio, julio y agosto. Existe consenso en interpretar las series hidrológicas del norte de Chile, bajo la perspectiva de ciclos hidrológicos decadales, a partir de los cual es razonable estimar el flujo base como el promedio de los 4 mínimos decadales observados históricamente.

De acuerdo a las correlaciones obtenidas, es factible asumir que la recarga neta en las cuencas altiplánicas de la XV Región, corresponde entre el 43% y el 46% de la escorrentía total. Adicionalmente, Aquaterra Ingenieros Ltda. (2011) en el estudio SIT N° 251, encontraron que los flujos subterráneos en las cuencas del río Lluta Alto y río Lluta bajo río Azufre son despreciables frente al caudal de salida observado. En la Tabla 7.105 se muestran los valores de la estimación de la recarga neta.

Tabla 7.105 Caudales considerados en la correlación y estimación de la recarga neta. Fuente: elaboración propia.

Subcuencas	Q obs [l/s]	Q cal [l/s]	Q min decadal prom [l/s]	Recarga neta [l/s] (40% - Estudio SDT 137)	Recarga neta [l/s] (43% - Propuesto Actual)
Río Codpa hasta Cala - Cala	130	156	25	52	56

SÍNTESIS DE LA ESTIMACIÓN DE LAS PRINCIPALES RECARGAS

Una vez revisados los antecedentes de la cuenca de la quebrada Chaca Vítor, relacionados con la estimación de la recarga y de analizar conceptualmente las componentes que condicionan el tránsito del agua hasta llegar al acuífero, fue adoptada la metodología regional propuesta por el estudio SIT N° 317 para la parte alta y en la parte baja se adoptó los resultados obtenidos en el estudio SIT N° 312- Mayco Consultores (2013).

Cabe mencionar que el valor obtenido de la recarga media anual en la cuenca, es un referente que consideró varias hipótesis y simplificaciones, anteriormente descritas. Sin duda la principal limitante en el análisis es la cantidad de información disponible, alguna de esta desconocida y/o no controlada. En la Tabla 7.106 se presenta de manera resumida las principales fuentes de recarga, el método utilizado y los valores estimados a nivel anual. Seguidamente en la Tabla 7.107 se presenta la distribución de la recarga estimada a nivel mensual, concentrándose esta en los meses con mayor registro precipitación, de enero a marzo.

Tabla 7.106 Síntesis de las principales estimaciones de recarga al acuífero en la cuenca de la quebrada Chaca Vítor. Fuente: elaboración propia.

Principales fuentes de recarga al acuífero	Método	Valor Estimado Anual [l/s]		
		Río Codpa hasta Cala-Cala	Parte Baja	
			Sector acuífero Intermedio	Sector Acuífero Costero
Percolación de la PRECIPITACIÓN que a su vez contribuye a la escorrentía	Relación precipitación-escorrentía. Metodología adoptada del estudio SIT N° 317- DEP-DGA (2011)	56	-	-
Recarga neta anual del FLUJO BASE en la caja de la quebrada Chaca Vítor en la parte alta				
Aporte de FLUJO SUBTERRÁNEO pasante desde la parte alta y recarga potencial durante los periodos de CRECIDAS	Se adoptó los resultados en el estudio SIT N° 312 – Mayco consultores (2013)	-	197	210

Tabla 7.107 Valores de la recarga media mensual estimada en la cuenca de la quebrada Chaca Vítor. Fuente: elaboración propia.

Subcuencas	Distribución mensual de la recarga estimada [l/s]											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Río Codpa hasta Cala - Cala	16	29	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0

7.5.2 Marco geológico

La cuenca de la quebrada Vítor abarca las siguientes unidades geomorfológicas: la Cordillera de la Costa, la Depresión Intermedia, la Precordillera y en el extremo este una fracción de la Cordillera Occidental.

GEOLOGÍA

El arco jurásico de la Cordillera de la Costa se evidencia en la cuenca de la quebrada Vítor con los Intrusivos del Jurásico Medio-Superior (Jmsi), y el trasarco con la Formación Camaraca (Jmc), que aflora a lo largo de la Cordillera de la Costa y, sobreyaciéndola en discordancia angular, la Formación Suca (Kis), que tiene pequeños afloramientos entre las localidades de Chaca y Pintatane. La roca del periodo Cretácico que aflora en la cuenca de la quebrada Vítor es un pequeño intrusivo (KPi) al sureste de la localidad de Codpa.

Las rocas del Oligoceno-Holoceno cubren la mayor parte de la depresión central. La Formación Azapa (Oa) aflora en el curso bajo de la quebrada Chaca, además de unos pequeños afloramientos entre Chaca y Pintatane. La Ignimbrita Lauca (Pll) presenta algunos afloramientos discontinuos. Sin embargo, la mayor extensión queda cubierta por la Formación Oxaya (OMo) y la Formación El Diablo (Mimd).En la Cordillera Occidental, el Oligoceno-Holoceno se expresa en la Formación Lupica (OMl) y la Formación Macusa (Mmsm), que afloran en el límite este de la cuenca. Los volcanes y remanentes de volcanes del Mioceno Medio (Mmv) y Superior (Msv) y los volcanes y centros eruptivos menores del Plioceno (Plv) se ubican en la Precordillera, en el sector este de la cuenca.

Los depósitos fluviales del Pleistoceno (Pf) se observan en algunos sectores a lo largo de la Cordillera de la Costa, mientras que los depósitos fluviales del Holoceno (Hf) se ubican en el último tramo de la quebrada Vítor. En caleta Vítor hay un pequeño

depósito litoral (Ql). Los depósitos aluviales de la Cordillera de la Costa (OMma, MsPla) se presentan rellenando depresiones. En la Depresión Central se depositan principalmente depósitos salinos (Qsdc) y depósitos eólicos (Qe), en la parte occidental. Los depósitos de remoción en masa (PlQr) y los depósitos coluviales (Qc) se observan principalmente en la quebrada Vítor. Los depósitos aluviales (Pa, Ha) se disponen esencialmente en zonas de la depresión central como mantos, y en las quebradas de la Precordillera. Los depósitos que se encuentran en la Cordillera Occidental corresponden a los depósitos glaciales (Qg), ubicados esencialmente en los flancos de los edificios volcánicos y los depósitos palustres (Hp), ubicados en la quebrada Itiza, al este de la localidad homónima.

TECTONICA Y ESTRUCTURAS

Durante la tercera etapa tectónica (Oligoceno-Holoceno) se producen los mayores cambios en el relieve. La deformación Miocena-holocena en la quebrada Vítor se evidencia con las siguientes estructuras: en la Cordillera de la Costa, las fallas inversas de las minas Santo Domingo y Noruega cortan en la superficie a las formaciones Azapa, Oxaya y El Diablo (Oa, OMo y Mimd) y a los depósitos aluviales del Oligoceno-Mioceno Medio (OMa). Entre las quebradas Vítor y Camarones, algunas de las fallas noreste-suroeste subverticales cortan los depósitos aluviales del Oligoceno al Plioceno (OMa y MsPla) y producen desplazamientos verticales de hasta 100 m y separaciones horizontales sinextrales, de quebradas con actividad intermitente, de hasta 150 m. Esta red de fallas noreste-suroeste podría representar la parte interna de una estructura mayor con características de 'dúplex', tal como las reconocidas más al sur de la zona de estudio, en el Sistema de Falla Atacama. En la Depresión Central, en la quebrada Garza, se exponen flexuras de rumbo NNW a NNE, largo menor a 15 km y desplazamientos verticales inferiores a 50 m. En la Precordillera, el monoclinal Sucuna está inclinado levemente (2-3°) al oeste y plegado internamente en anticlinales cortos y suaves.

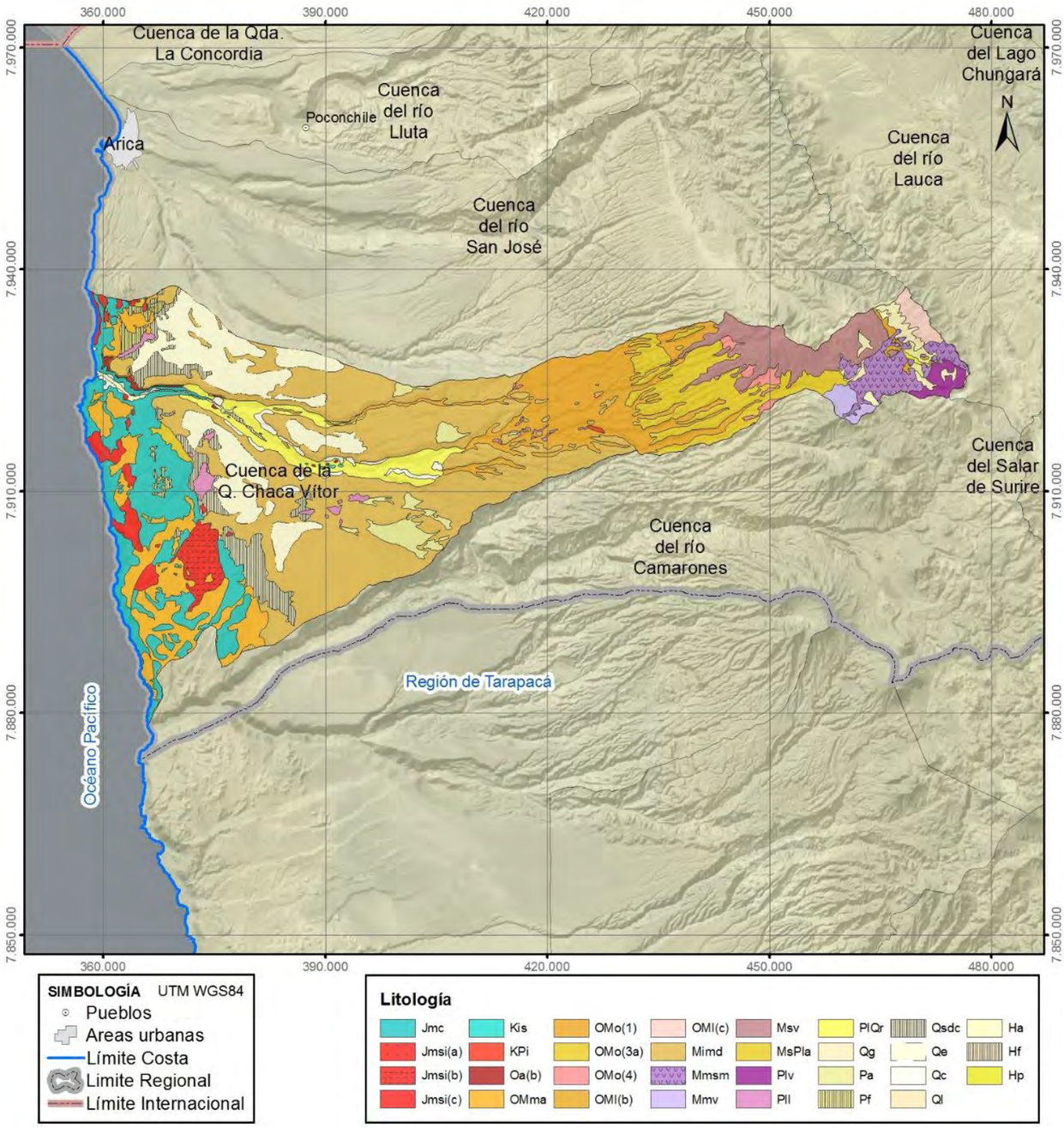


Figura 7.178 Mapa geológico de la cuenca de la quebrada Chaca-Vítor. Fuente: modificado de García *et al* (2004).

7.5.3 Caracterización Hidrogeológica

7.5.3.1 Estudios existentes

La información hidrogeológica de la cuenca de la quebrada Chaca-Vítor es bastante acotada y localizada al sector bajo de cuenca. En la Figura 7.179 se muestra, mediante un rectángulo rojo, donde se localiza la mayor parte de la información existente.

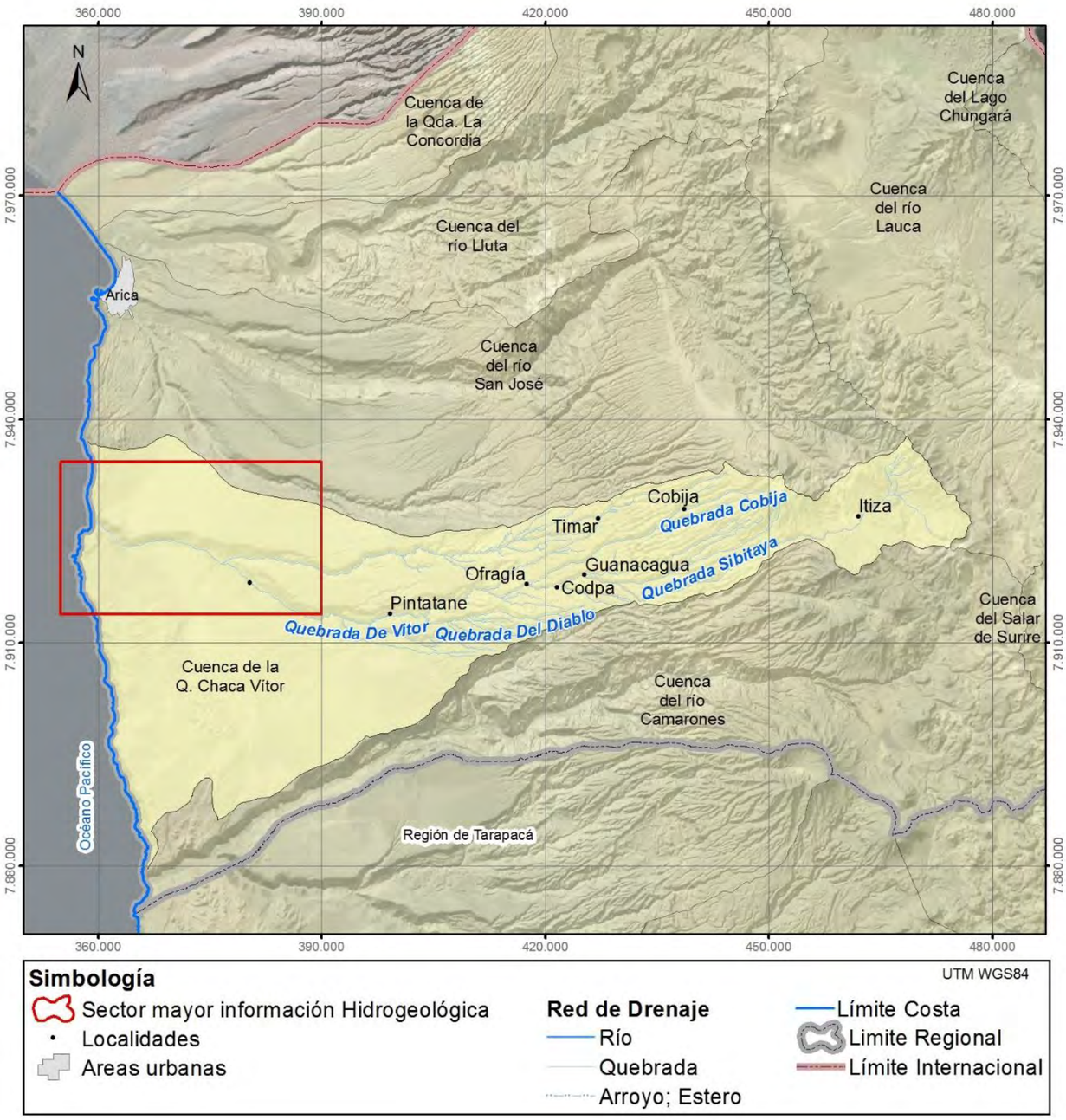
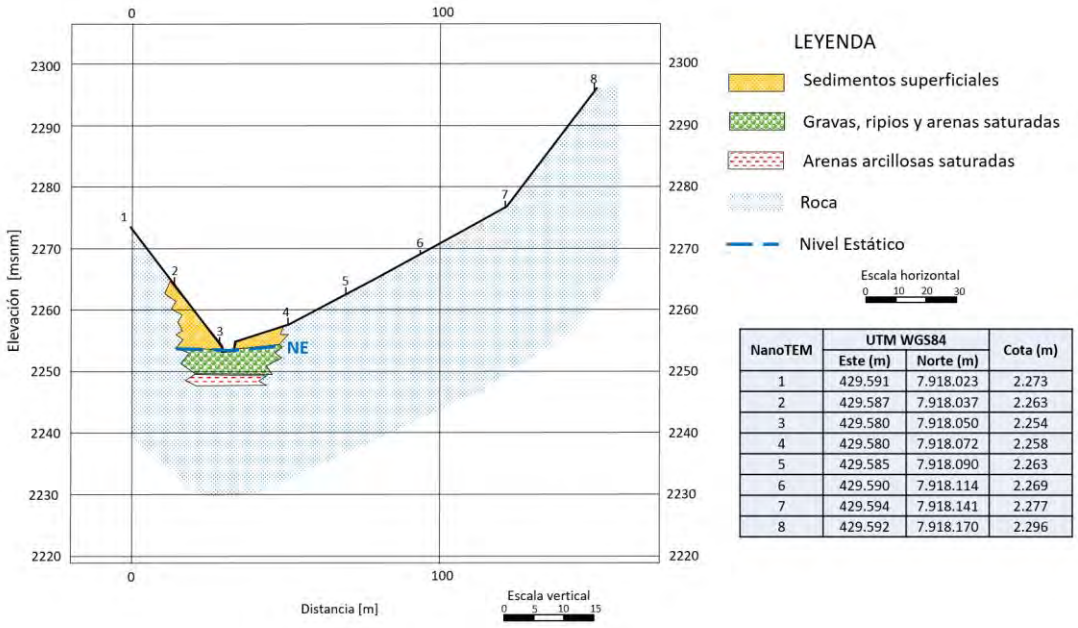


Figura 7.179 Ubicación de la quebrada Vítor destacado en rectángulo rojo. Fuente: elaboración propia.

En el informe de AC ING. y AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (2002) se analizó la granulometría de 5 calicatas que se realizaron en la cuenca y en éstas se definieron las curvas granulométricas de las capas a 1 m y otra a 2 m de profundidad de la calicata realizada en Codpa. De acuerdo a este estudio, a la fecha de realización del mismo no existían antecedentes de recursos hídricos subterráneos, disponiendo únicamente de catastros de pozos. De acuerdo a esta información, la empresa ESSAT habría sido dueña en la época de dos pozos de agua potable en la localidad de Codpa, sin embargo, no se conocen mayores antecedentes al respecto.

En el estudio a escala regional de GCF (2010) se asignaron zonas de permeabilidad similares en base a las descripciones del mapa geológico de Chile 1:1.000.000. De acuerdo a esto, se han asignado 3 zonas de permeabilidad en el tramo desde el río Codpa hasta Cala-Cala. A la zona 1 se le estimó una permeabilidad de 0,864 m/día, a la zona 2 de 0,043 m/día y, por último, a la zona 3 una permeabilidad de 0,016 m/día. Sin embargo, esta estimación se realizó mediante ensayos de infiltración puntuales, lo cual no se puede extrapolar a toda la unidad hidrogeológica.

Posteriormente, en el estudio de Aquaterra (2011) se calcularon la recarga y balances hídricos en ciertas cuencas altiplánicas, dentro de las cuales se encuentra el sector alto de la cuenca de la quebrada Chaca-Vítor, llamada cuenca "Río Codpa hasta Cala-Cala". En el marco de este estudio se desarrolló una campaña geofísica, en la Figura 7.180 se incluye el perfil geofísico de la sección de salida del tramo "Río Codpa en Cala-Cala".



NanoTEM	UTM WGS84		Cota (m)
	Este (m)	Norte (m)	
1	429.591	7.918.023	2.273
2	429.587	7.918.037	2.263
3	429.580	7.918.050	2.254
4	429.580	7.918.072	2.258
5	429.585	7.918.090	2.263
6	429.590	7.918.114	2.269
7	429.594	7.918.141	2.277
8	429.592	7.918.170	2.296

Figura 7.180 NanoTem in**terpretado en sección de salida de subcuenca "Río** Codpa en Cala-**Cala".** Fuente: Aquaterra (2011).

El estudio más reciente desarrollado es el de MAYCO (2013), en el cual se realizó una campaña de geofísica de detalle a lo largo de estos acuíferos. La prospección geofísica consistió en un perfil longitudinal a lo largo del cauce principal de la quebrada Chaca-Vítor y 71 perfiles transversales al mismo cauce, mediante el método Magneto Telúrico o AMT STRATAGEM, con el fin de caracterizar la geometría de los acuíferos. A partir de esta información se definieron dos acuíferos ubicados en la parte baja de la cuenca: intermedio y costero. El acuífero intermedio se localiza entre la unión de las quebradas de Chaca Vítor y Garza por el poniente, y hasta 6 km aguas arriba, con ancho medio de 500 m y un ancho máximo de 700 m, una pendiente de 2%, y una superficie aproximada de 5,84 km^2. Mientras que el acuífero costero se localiza entre aproximadamente 6 km aguas arriba de la desembocadura de la quebrada de Chaca-Vítor en Caleta Vítor, y esta última. Posee un ancho medio de 350 m y un ancho máximo de 500 m, una pendiente de 2% y una superficie de 2,74 km^2.

MAYCO (2013) describió 3 zonas hidrogeológicas que corresponden a regiones de estructura geológica e historia tectónica homogénea y con una secuencia idéntica de unidades hidroestratigráficas, Figura 7.181. En cada una de estas regiones se han descrito cualitativamente dos unidades hidrogeológicas de acuerdo a su importancia relativa (A1, A2, B1, B2, C1 y C2):

- Región Pampa: se localiza desde la desembocadura de la cuenca en el océano hasta el pie de la Cordillera de los Andes. Está constituida por unidades litológicas que presentan un flujo intergranular. La importancia hidrogeológica relativa es baja en la Pampa, y media a alta en el relleno sedimentario de las quebradas.
- Región Cordillera: se localiza en la zona de pendiente de vertiente pacífica de la Cordillera de los Andes. Está constituida por unidades litológicas que exhiben flujo a través de fracturas. La importancia hidrogeológica relativa es baja.
- Región Altiplano: se localiza al oriente de la parte alta de la Cordillera de los Andes. Está constituida por unidades litológicas con flujo en fracturas o con un limitado o nulo recurso de agua subterránea. La importancia hidrogeológica relativa es baja a muy baja. Sin embargo, esta región no se encuentra en la cuenca de la quebrada Chaca-Vítor.

Los acuíferos costero e intermedio han sido estudiados en detalle en MAYCO (2013), quienes a partir de los antecedentes mencionados anteriormente realizan el mapa piezométrico de los acuíferos costeros e intermedio.

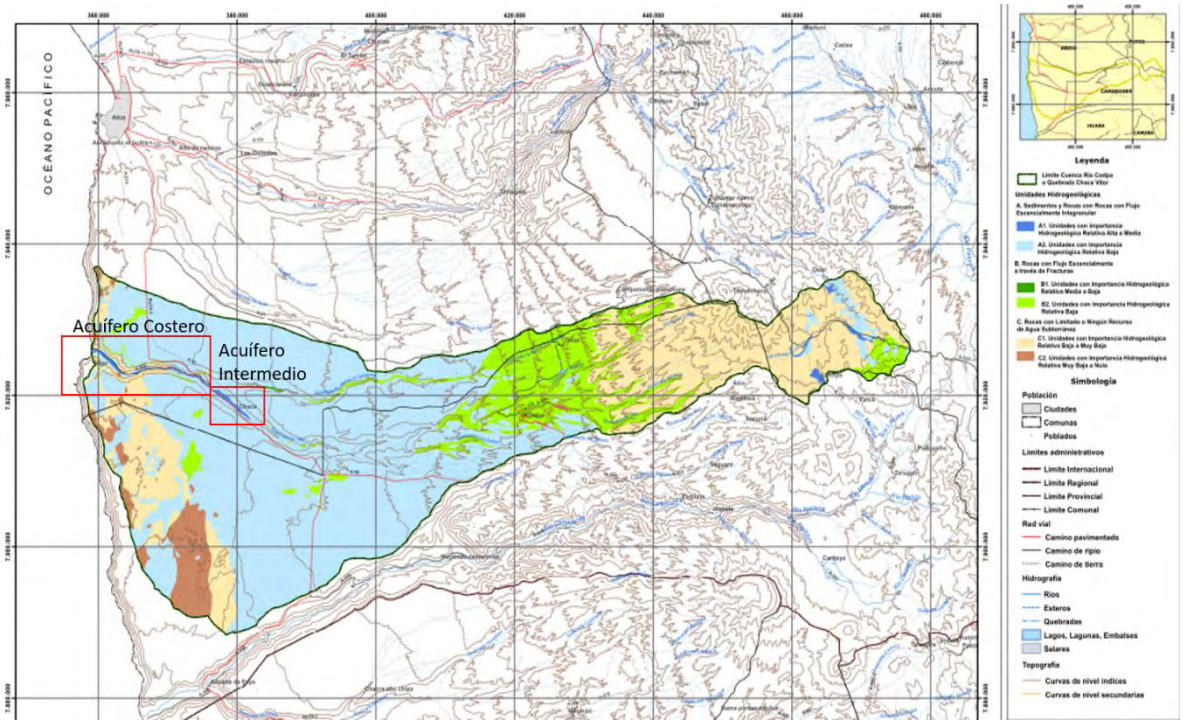


Figura 7.181 Mapa de las unidades hidrogeológicas presentes en la cuenca de la quebrada Chaca-Vítor. Fuente: modificado de MAYCO (2013).

7.5.3.2 Definición y caracterización de las unidades hidrogeológicas

La definición y caracterización de las unidades hidrogeológicas se realizó a partir del informe de MAYCO (2013), del mapa geológico y de los perfiles geológicos escala 1:250.000 de García *et al.* (2004) y del mapa hidrogeológico 1.000.000 (DGA, 1989). Estas corresponden a las unidades hidrogeológicas que se encuentran en la cuenca de la quebrada Chaca-Vítor:

- Unidad Hidrogeológica I (importancia alta): corresponde a los depósitos aluviales y fluviales del Pleistoceno y del Holoceno. Estos depósitos son materiales detríticos no consolidados que afloran en las laderas de volcanes, en depresiones, quebradas o ríos. Esta unidad hidrogeológica se caracteriza por ser un medio con permeabilidad primaria y de carácter libre
- Unidad Hidrogeológica II (importancia media-alta): considera los volcanes del Mioceno Superior y Plioceno. Los volcanes Margarita, Familiari y Anocarire tienen una permeabilidad primaria baja a nula, pero por fracturación presentan una importancia hidrogeológica media-alta. Se caracterizan por tener familias de fracturas conectadas que originan acuíferos colgados y/o recargan otras unidades hidrogeológicas.
- Unidad Hidrogeológica III (importancia media): constituida por los depósitos salinos. Esta unidad se ubica en la Depresión Central. Corresponden a mantos subhorizontales de sales, limos y costras salinas, de espesor centimétrico a métrico, y colores blanco y amarillo, los cuales se distribuyen en la parte occidental de la depresión Central. Esta unidad constituye un medio de porosidad primaria y secundaria por disolución de sales y contiene salmuera.
- Unidad Hidrogeológica IV (importancia media-baja): corresponden a materiales detríticos semiconsolidados o consolidados. Compuesta por los depósitos glaciares y coluviales del cuaternario, de remoción en masa del Plioceno-Cuaternario, a la Formación El Diablo y Azapa y a depósitos aluviales de la Cordillera de la Costa. Esta unidad se caracteriza por presentar una porosidad intergranular.
- Unidad Hidrogeológica V (importancia baja): comprende a estratos de tobas, remanentes de volcanes del Mioceno y la Formación Macusa. Las tobas corresponden a la_Ignimbrita Lauca, Ignimbrita Oxaya, Sucuma y Aico de la Formación Oxaya y a las dos ignimbritas que constituyen la

Formación Lupica (Ignimbrita del Cordón de Belén y otro miembro de ignimbrita, areniscas y conglomerados). La porosidad intergranular de estos materiales es muy baja, sin embargo pueden presentar puntualmente fracturas conectadas.

- Unidad Hidrogeológica VI (importancia baja a muy baja): engloba a las secuencias volcánicas y volcanosedimentarias del Jurásico y Cretácico. Se ubica en el sector bajo de la cuenca y está compuesta por la Formación Camaraca, Los Tarros, Atajaña y Suca. Se caracteriza por presentar una porosidad primaria nula y bajo grado de fracturación
- Basamento: corresponde a los materiales intrusivos del Jurásico y Cretácico.

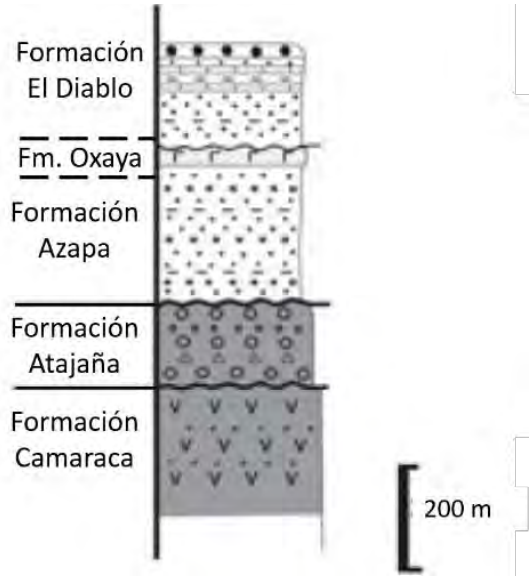


Figura 7.182 Columna estratigráfica de la quebrada Chaca Vítor en el sector bajo de la cuenca. Fuente: García *et al.* (2004).

En la Tabla 7.108 se resumen las unidades hidrogeológicas según la importancia hidrogeológica y el tipo de permeabilidad presente en la cuenca de la quebrada Chaca-Vítor.

Tabla 7.108 Resumen de las unidades hidrogeológicas de la cuenca de la quebrada Chaca-Vítor. Fuente: elaboración propia.

Cuenca	Unidad Hidrogeológica	Descripción	Tipo de permeabilidad	Importancia hidrogeológica	Tipo de Unidad
Quebrada Chaca-Vítor	I	Depósitos aluviales y fluviales	Primaria	Alta	Acuífero
	II	Complejos volcánicos	Secundaria	Alta-media	Acuíferos fracturados
	III	Depósitos salinos	Primaria Secundaria	Media	Supuestamente Acuitardo
	IV	Depósitos coluviales Depósitos glaciares Depósitos de remoción en masa Depósitos aluviales de la Cordillera de la Costa Formación El Diablo Formación Azapa	Primaria	Media-baja	Supuestamente Acuitardo
	V	Ignimbrita Lauca Ignimbrita Formación Oxaya Formación Lupica Formación Macusa Remanentes de volcanes del Mioceno	Secundaria	Media-Baja	Supuestamente Acuitardo
	VI	Formación Camaraca Formación Los Tarros Formación Atajaña Formación Suca	Secundaria	Baja	Supuestamente Acuícludo

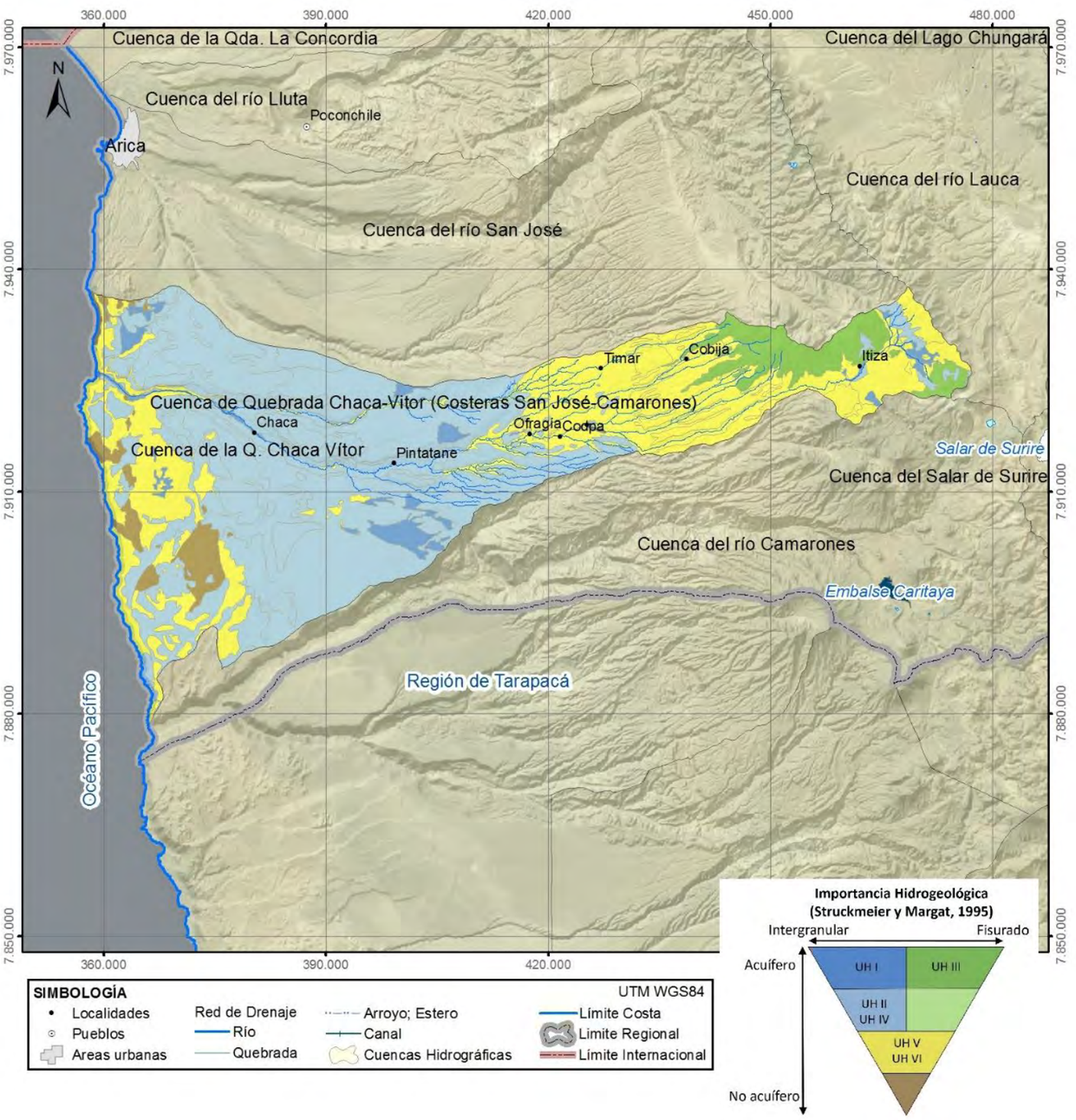


Figura 7.183 Mapa de las unidades según la importancia hidrogeológica presentes en la cuenca de la quebrada Chaca-Vítor. Fuente: elaboración propia.

7.5.3.3 Parámetros hidráulicos

Los parámetros hidráulicos de cada una de las unidades hidrogeológicas se estimaron a partir de los antecedentes y de los resultados de las pruebas de bombeo recopiladas, cuyo detalle se puede encontrar en el Anexo VII. En las unidades hidrogeológicas que no presentan antecedentes se consideraron valores referenciales de parámetros hidráulicos de materiales geológicos similares a la bibliografía.

En la Figura 7.184 se puede observar la ubicación de los 5 pozos en que MAYCO (2013) estimó los parámetros hidráulicos a partir de los resultados obtenidos de las pruebas de bombeo efectuadas en el acuífero intermedio y costero (UH1).

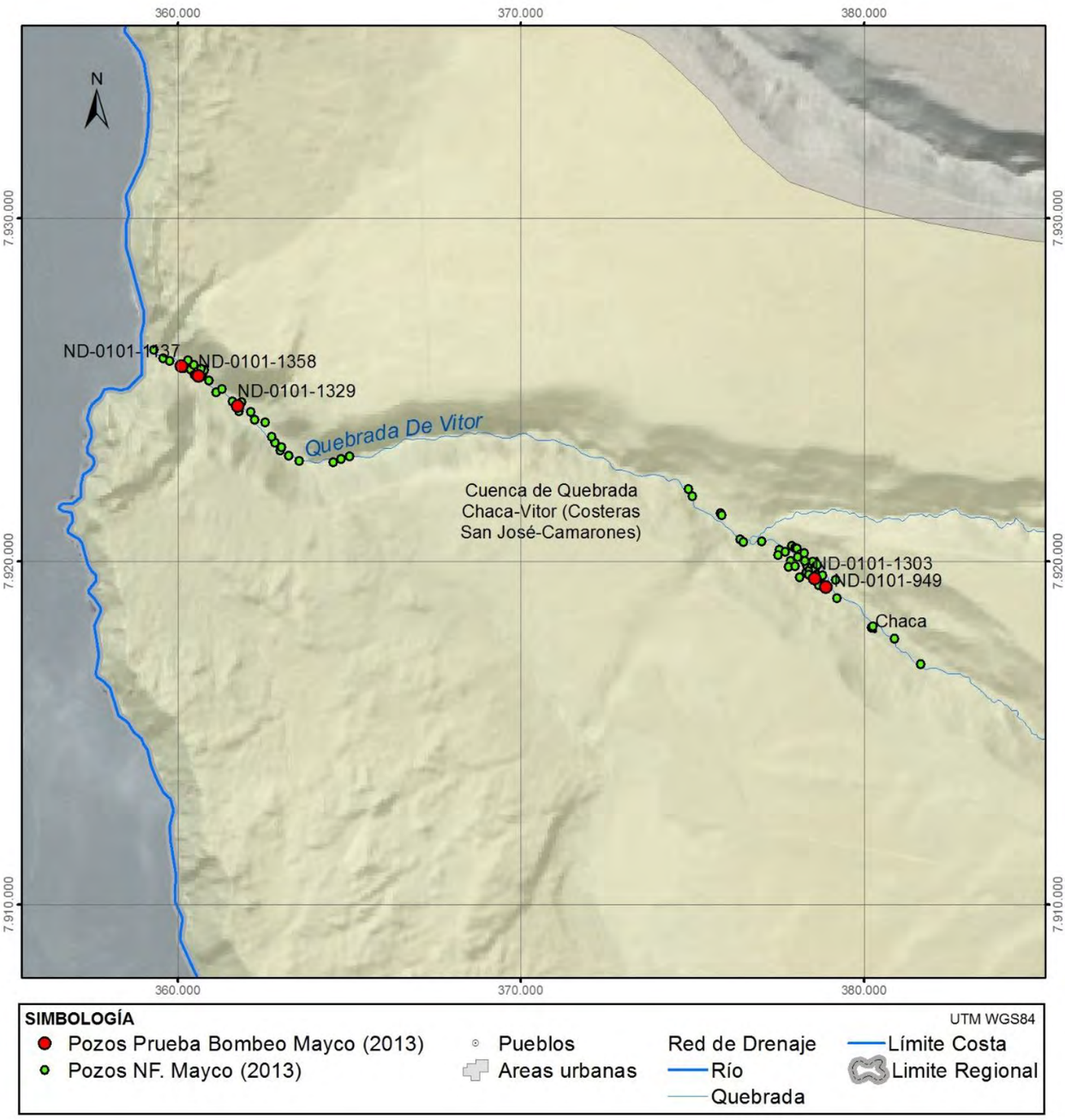


Figura 7.184 Ubicación de los pozos con pruebas de bombeo y pozos con medición de nivel freático en la cuenca de la quebrada Chaca-Vítor. Fuente: elaboración propia.

En el estudio de MAYCO (2013), las pruebas hidráulicas se interpretaron mediante el método de Theis (1935), en el que se calculó la transmisividad, conductividad hidráulica y coeficiente de almacenamiento en el acuífero detrítico asociado al río y en un régimen libre. ICCAS ha reinterpretado las pruebas de bombeo mediante los métodos de Cooper-Jacob y Theis para verificar los resultados anteriores. En la Tabla 7.109 se presentan los valores obtenidos de MAYCO (2013) e ICASS (2016).

Tabla 7.109 Parámetros hidráulicos de los acuíferos intermedio y costero de la cuenca de la quebrada Chaca-Vítor estimados por MAYCO (2013) e ICASS (2016). Fuente: elaboración propia.

ID	Espesor acuífero (m)	T (m^2/día)		K (m/día)		Ss (m^{-1})	
		MAYCO (2013)	ICASS (2016)	MAYCO (2013)	ICASS (2016)	MAYCO (2013)	ICASS (2016)
ND-0101-1358	45	93	55	2	1,2	$7,35x10^{-3}$	-
ND-0101-1329	45	109	106	2	2	$7,35x10^{-3}$	0,16
ND-0101-1303	25	45	36	1,8	1,5	$6,01x10^{-3}$	-
ND-0101-1137	45	1439	11	32	0,3	$2,22x10^{-5}$	0,17
ND-0101-949	45	28	69	0,6	1,5	$3,65x10^{-3}$	-

De acuerdo a lo observado en la Tabla 7.109, existe sólo un pozo en el que la reinterpretación de los parámetros no calza con el orden de magnitud de los interpretados por MAYCO (2013). Este es el caso del pozo ND-0101-1137, el que también se escapaba de los otros pozos interpretados por MAYCO (2013), cuyo orden de magnitud es similar.

En la Tabla 7.110 se resumen los parámetros hidráulicos de cada una de las unidades hidrogeológicas definidas en la cuenca de la quebrada Chaca-Vítor. Los valores de los parámetros hidráulicos de la Unidad Hidrogeológica I se obtuvieron de la interpretación realizada por MAYCO (2013) e ICASS (2016) de las pruebas de bombeo. Aquaconsult (2010) estimó valores de conductividad hidráulica para algunas unidades hidrogeológicas según la geología de cada una unidad y en los casos en que no hay información se consideraron valores de la bibliografía existente.

Tabla 7.110 Resumen de los parámetros hidráulicos de cada unidad hidrogeológica de la cuenca de la quebrada Chaca-Vítor. Fuente: elaboración propia.

Cuenca	Unidad Hidrogeológica	Régimen	T (m^2/d)	K (m/d)	S (m^{-1})	Sy (%)	Observaciones
Quebrada Chaca-Vítor	I	Libre	11-100	2,5-0,2		10-30	T, K Sy por pruebas de bombeo MAYCO (2013) e ICASS (2016)
	II	Libre		$1E^{-2}$-$1E^{2}$	--		K estimado por Aquaconsult (2010) depósitos volcánicos
	III	Libre		$8E^{-7}$ – $2E^{-3}$	--	--	K estimado por Domenico y Schwartz (1990) para rocas sedimentarias
	IV	Libre		$1E^{-6}$ – $5E^{-1}$		--	K estimado por Domenico y Schwartz (1990) para rocas sedimentarias
		Confinado			--		
	V	Libre		$1E^{-5}$-1		--	K estimado por Aquaconsult (2010) de la Fm. Lauca y S por Domenico y Mifflin (1965)
		Confinado			$3E^{-6}$-$7E^{-5}$		
	VI	Libre		$2E^{-6}$-$3E^{-2}$		--	K estimado por Domenico y Schwartz (1990) para basaltos y S por Domenico y Mifflin (1965)
		Confinado			$3E^{-6}$		

7.5.3.4 Piezometría

Los antecedentes vinculados con los niveles piezométricos y el flujo subterráneo se localizan principalmente en el sector bajo, específicamente desde Chaca hasta la línea de costa. La presente piezometría se elaboró tomando en cuenta la piezometría realizada por MAYCO (2013) y la piezometría inferida a partir de los niveles freáticos registrados en los pozos muestreados, medición de aforos en la quebrada Vítor, las observaciones realizadas en terreno, el análisis de imágenes satelitales y mediante las curvas de nivel cada 20 m.

En la Figura 7.185 se muestra que la piezometría de la Unidad Hidrogeológica I en la zona media e inferior de la cuenca de la quebrada Chaca-Vítor, cuyas isopiezas presentan una dirección este-oeste, es decir, desde las cotas altas hacia la línea de costa. Las zonas de recarga se encuentran en la cabecera de la cuenca, donde parte de estas aguas afloran y circulan superficialmente a lo largo de la cuenca, atravesando unidades hidrogeológicas de moderada a baja transmisividad, hasta recargar el acuífero detrítico cuaternario asociado al río en el sector bajo de la cuenca.

En los sectores comprendidos desde Chitita hasta Codpa y en Chaca se captan y canalizan las aguas superficiales mediante canales para el riego de cultivos. Esto impide que se pueda analizar bien la relación río acuífero mediante la medición de aforos, sin embargo, se ha considerado que el río alimenta al acuífero y que este último se encuentra desconectado del río. Además, es relevante mencionar que en el acuífero detrítico cuaternario asociado al río se extrae agua subterránea de este acuífero continuamente, por lo que existen conos de descenso y zonas de recarga por riego de cultivos que varían según el riego efectuado.

En la zona alta de la cuenca también se presentan los niveles piezométricos, que se encuentran asociados a vertientes, escorrentías superficiales y a bofedales. Dado que no se cuenta con mucha información, en la Figura 7.186 se ha trazado una piezometría inferida en base a las vertientes y curvas de nivel cada 20 m. El flujo de agua subterránea es relativamente somero y tiene dirección local en cada una de las quebradas y finalmente dirección este-oeste.

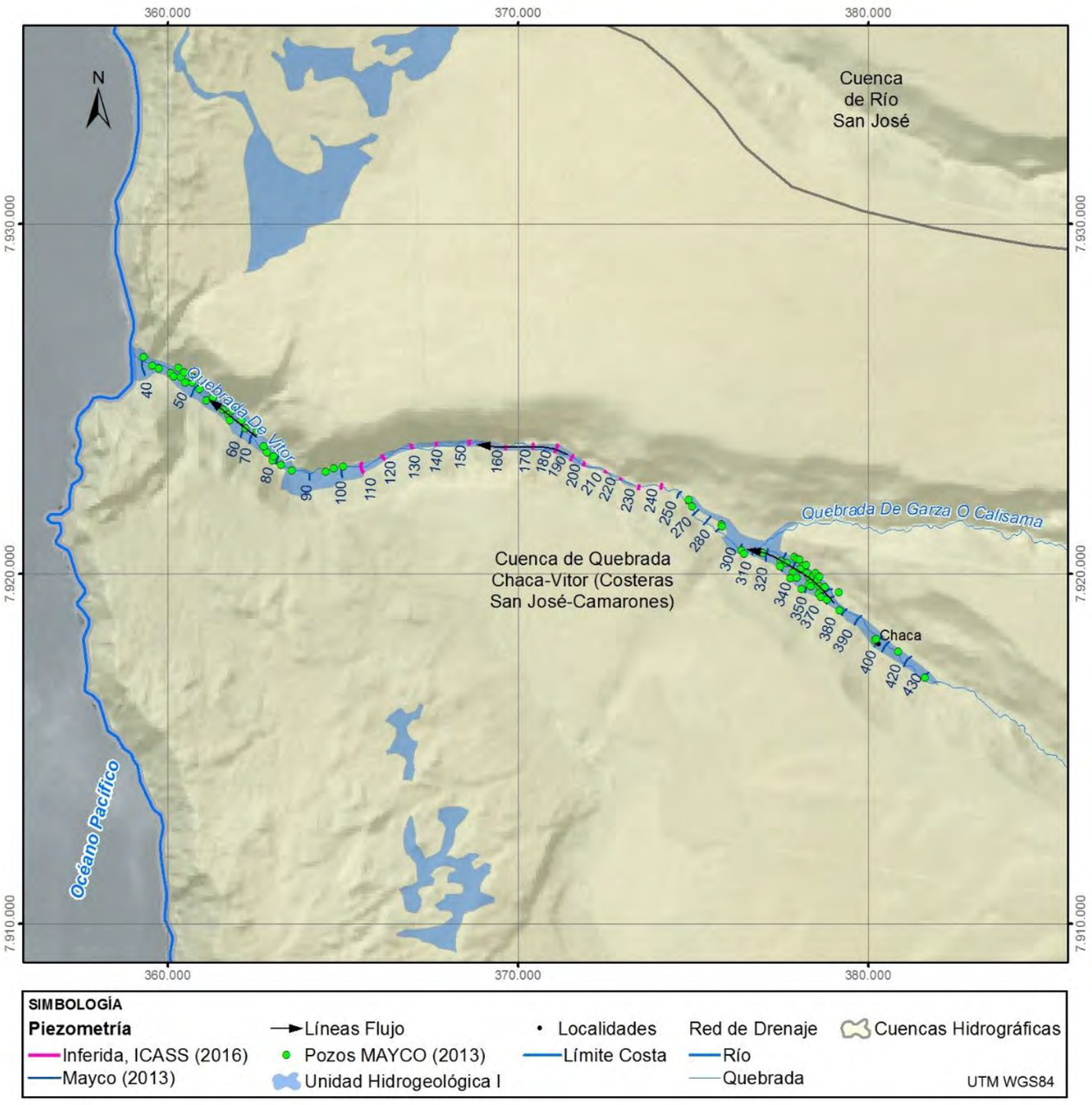


Figura 7.185 Mapa piezométrico de la Unidad Hidrogeológica I en la cuenca de la quebrada Chaca-Vítor. Fuente: elaboración propia.

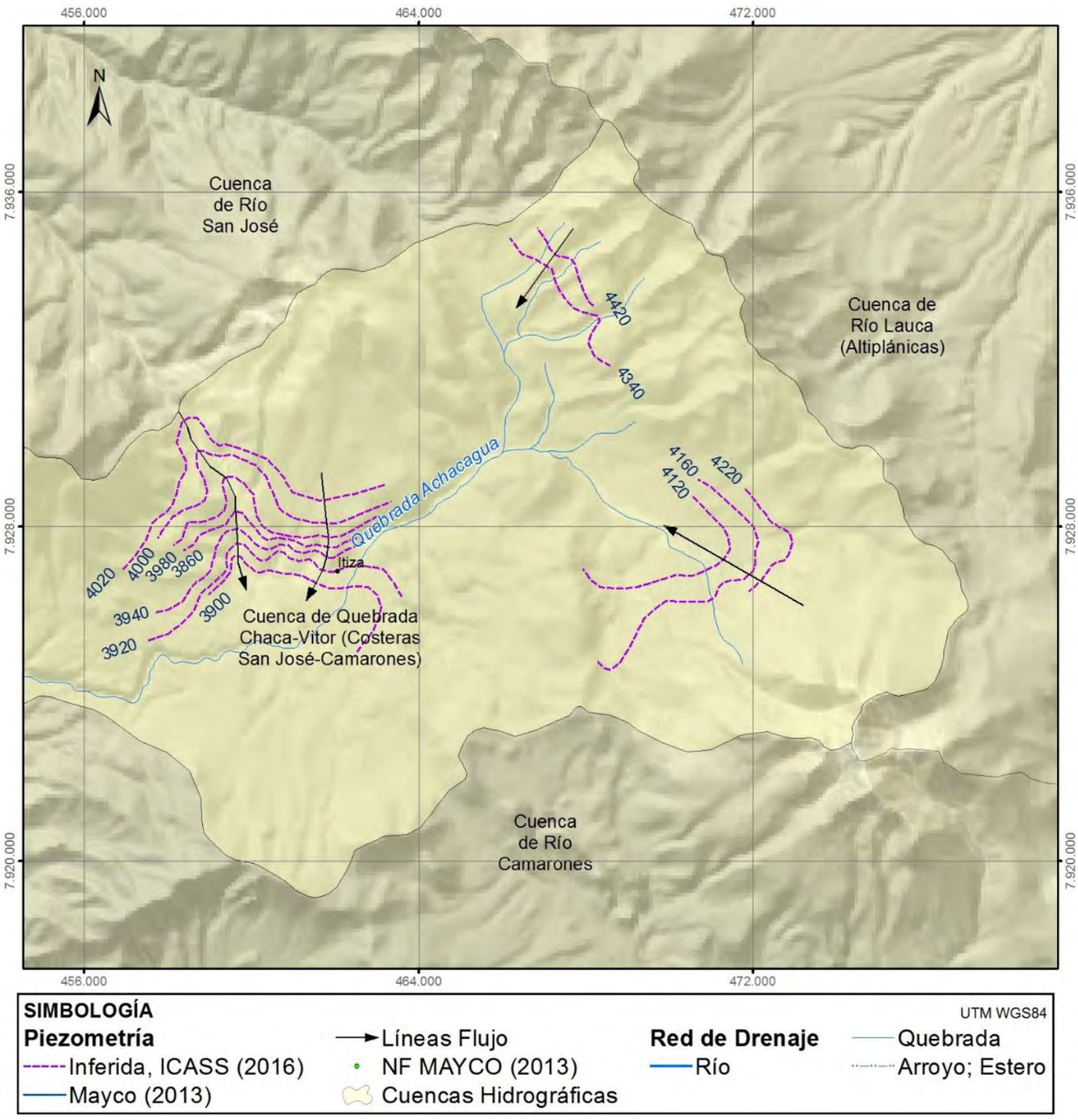


Figura 7.186 Mapa piezométrico inferido en la cabecera de la cuenca de la quebrada Chaca-Vítor. Fuente: elaboración propia.

7.5.4 Caracterización Hidroquímica

A continuación se describen las características de la composición hidroquímica, la calidad de las aguas y del fraccionamiento isotópico de las aguas subterráneas y superficiales de la cuenca de la quebrada Chaca-Vítor a partir de los datos existentes y de las muestras tomadas en ríos, vertientes y pozos durante las 4 campañas de terreno en el periodo 2015-2016.

7.5.4.1 Estudios hidroquímica existentes

La composición química de la cuenca de la quebrada Chaca-Vítor fue evaluada en el informe AC Ing. y Ayala, Cabrera y Asociados (2002) a partir de los datos registrados en la estación de monitoreo de Codpa en Cala-Cala por la DGA. Éste consideró que históricamente el pH de las aguas en esta estación varía entre 7 y 8, con un promedio de pH 7,2, y con una conductividad eléctrica que fluctúa entre 440 y 1.840 µS/cm, obteniendo un promedio de 729 µS/cm. El contenido promedio de arsénico es de 0,006 mg/L, de boro alcanza 0,99 mg/L, de cobre es de 0,06 mg/L y por último de hierro es de 0,6 mg/L.

Posteriormente, se recolectaron 5 muestras de agua superficial para el análisis hidroquímico e isotópico en febrero de 2013 por MAYCO (2013). A continuación se reinterpretaron las 5 muestras que según MAYCO (2013) corresponden a las aguas superficiales provenientes tanto del acuífero intermedio como de aguas arriba del acuífero costero. El balance iónico de la composición hidroquímica de las 5 muestras presentó un error aceptable en dos muestras, MC-1 y MC-3, pero las muestras MC-2, MC-4 y MC-5 tienen un error en el balance iónico de -12,3, -18,6 y -19,3% respectivamente, sin embargo, se reinterpretaron las 5 muestras. Los valores de los parámetros fisicoquímicos medidos en terreno no se exponen en el informe, pero en los certificados de los resultados del laboratorio se presentan los valores de pH y de conductividad eléctrica medidos en el laboratorio. El pH registrado es alcalino, fluctuando entre 8,4 y 8,8, mientras que la conductividad eléctrica, como se observa en la Figura 7.187, aumenta desde aguas frescas (600-900 µS/cm) hacia aguas salobres (2.324 µS/cm) en la muestra MC-5 (Vítor).

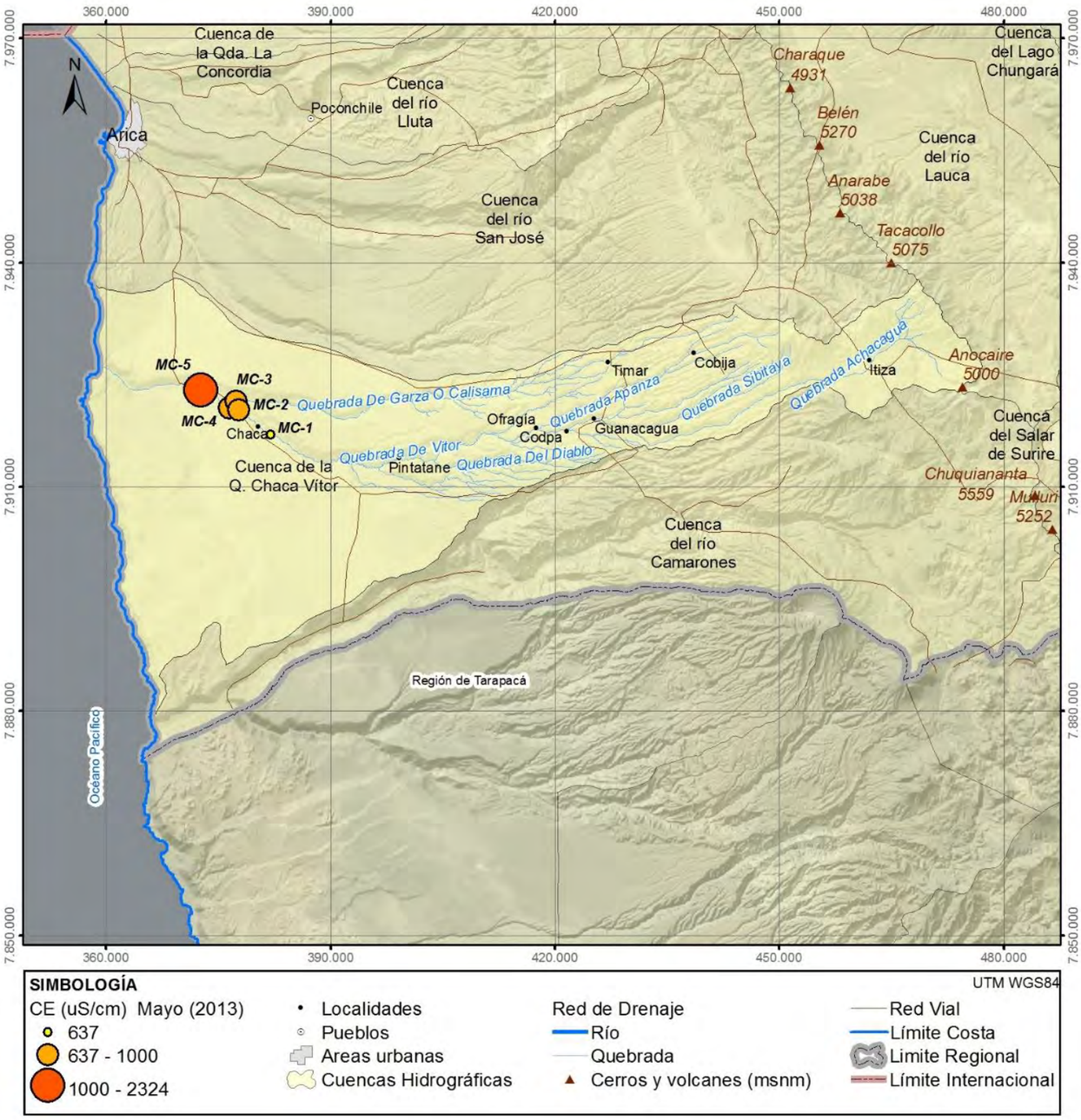
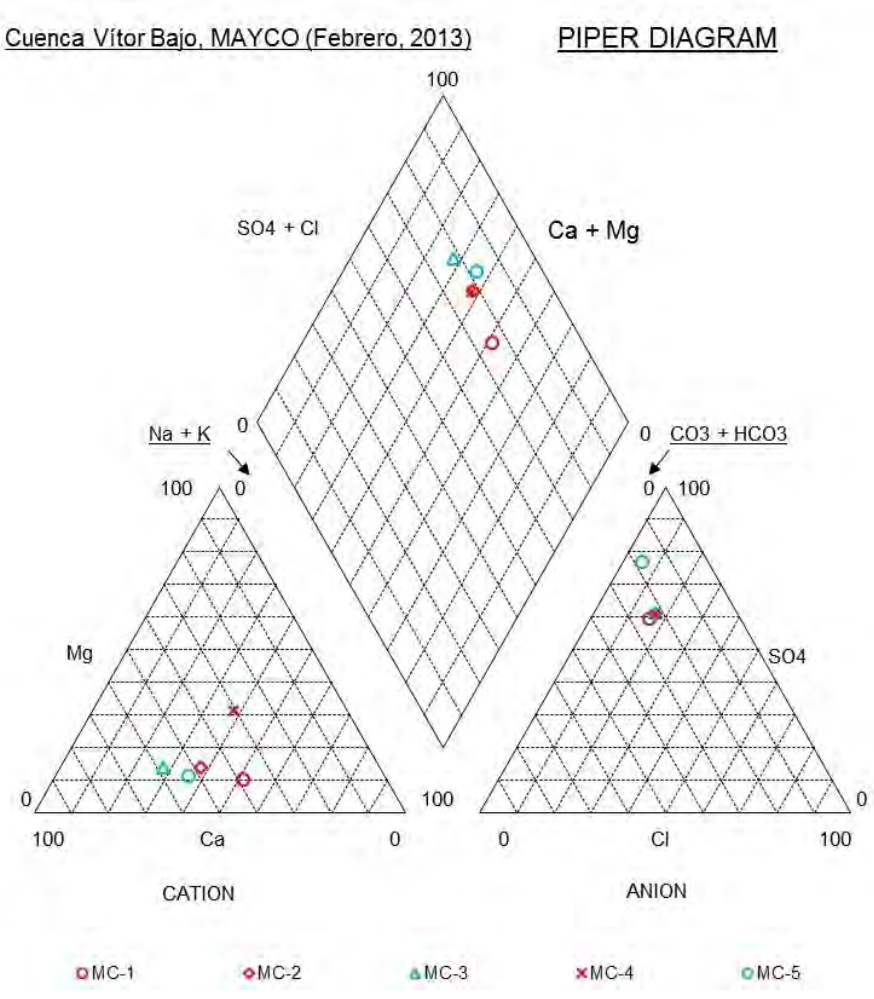


Figura 7.187 Distribución de la conductividad eléctrica de las muestras analizadas por MAYCO (2013). Fuente: elaboración propia.

En la Figura 7.188 se muestran los diagramas de Piper y de Schoeller-Berkaloff de las aguas superficiales analizadas en MAYCO (2013). En el diagrama de Piper, se observa que se tratan de aguas sulfatadas, pero el catión predominante varía ligeramente de unas a otras. La dominancia entre el calcio y sodio varía gradualmente desde la muestra MC-3 que es sulfatada cálcico-sódica, para luego MC-5 y MC-2 y la más sódico-cálcica la MC-1, mientras que la muestra MC-4 es magnésico-sódica. En el diagrama de Schoeller-Berkaloff se identifica que la muestra MC-5 es la más mineralizada de las 5 muestras que están aguas arriba de ésta y la menos mineralizada es la muestra MC-1, la cual es la muestra que está más arriba de las 5 muestras. Según MAYCO (2013) esta clasificación es consistente con aguas alojadas en sedimentos originarios de rocas metamórficas e intrusivas.



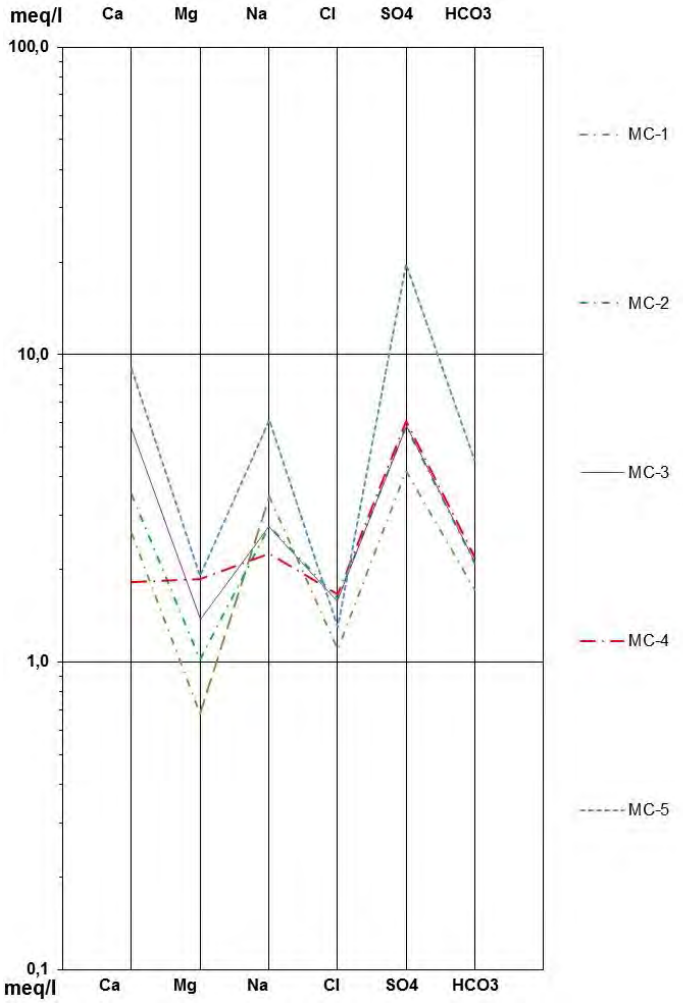


Figura 7.188 Diagramas de Piper y de Schoeller-Berkaloff con las muestras analizadas en MAYCO (2013). Fuente: elaboración propia.

En el estudio de MAYCO (2013) se analizaron isotópicamente las aguas superficiales recogidas en febrero de 2013 en el sector bajo de la cuenca, cuando en el invierno altiplánico se generan precipitaciones en la Precordillera que provocan que en la quebrada Vítor fluya por toda la cuenca hasta la desembocadura al océano Pacífico. En la Figura 7.189 se presenta la reinterpretación de los datos isotópicos obtenidos en dicho informe. Se observa como las 5 muestras se alinean en la recta de pendiente 5, lo cual indicaría que las aguas superficiales sufren un proceso de evaporación a medida que el agua va fluyendo por el río.

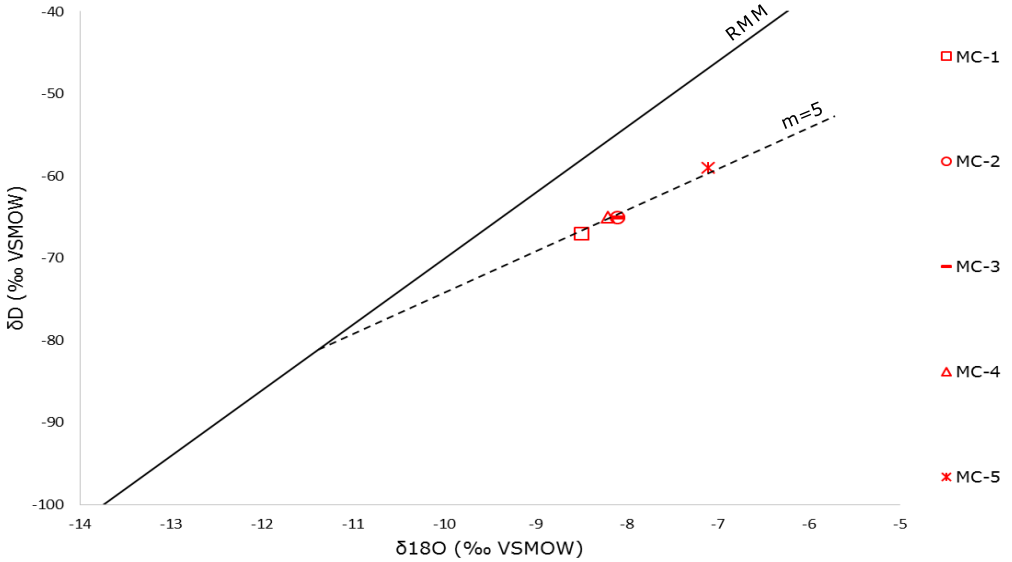


Figura 7.189 **Relación $\delta^{18}O/\delta D$ de las muestras analizadas por MAYCO** (2013) en la cuenca de la quebrada Chaca-Vítor en febrero de 2015. Fuente: elaboración propia.

Por otro lado, la DGA ha registrado en la estación "Río Codpa en Cala-Cala" el contenido de boro, aluminio, arsénico, cadmio, cobre, cromo, hierro, manganeso, mercurio, molibdeno, níquel, plata, plomo, selenio, zinc, cobalto, conductividad eléctrica, temperatura y pH. En la gráfica de la Figura 7.190 se presenta la variación temporal del contenido de arsénico del agua superficial desde 1990 hasta la actualidad y el límite de 0,01 mg/L de arsénico que establece la norma NCh 409/1. En ésta se identificó que generalmente se respeta el límite, superando el máximo con 0,147 mg/L en el año 1999 y en menor magnitud el año 2000, 2001, 2004 y 2011.

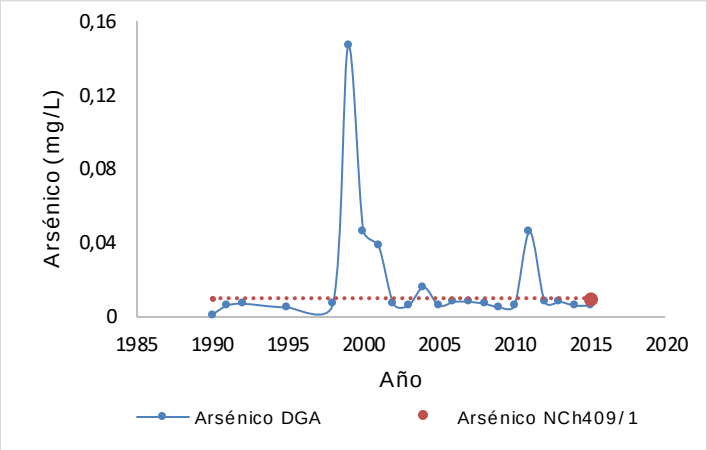


Figura 7.190 **Registro del contenido de arsénico en la estación "Río Codpa en Cala-Cala", periodo 1990-2015.** Fuente: elaboración propia.

7.5.4.2 Campañas de muestreo

En el presente estudio se realizaron 4 campañas de muestreo de aguas superficiales y subterráneas para caracterizar hidroquímica e isotópicamente y determinar la calidad de agua de unos elementos y parámetros según la norma chilena para agua potable NCh 409/1. En el Anexo VIII se describe el protocolo seguido en terreno para la toma de muestras de agua. En la Tabla 7.111 se resume el número de mediciones de los parámetros fisicoquímicos registrados *in situ*, el número de muestras tomadas para el análisis hidroquímico y para el análisis isotópico y en la Figura 7.191 se presenta la ubicación de los puntos muestreados.

Tabla 7.111 Resumen de las actividades realizadas en las campañas de muestreo en la cuenca de la quebrada Chaca-Vítor. Fuente: elaboración propia.

Campaña	Fecha	Medición parámetros fisicoquímicos *in situ*	Muestras para análisis hidroquímico	Muestras para análisis isotópico
Primera	10, 11 y 26 de noviembre de 2015,	16	16	13
Segunda	22, 23 y 24 de febrero de 2016	15	15	12
Tercera	09, 10 y 14 de mayo de 2016	12	12	8
Cuarta	3, 4 y 6 de agosto de 2016	10	10	7

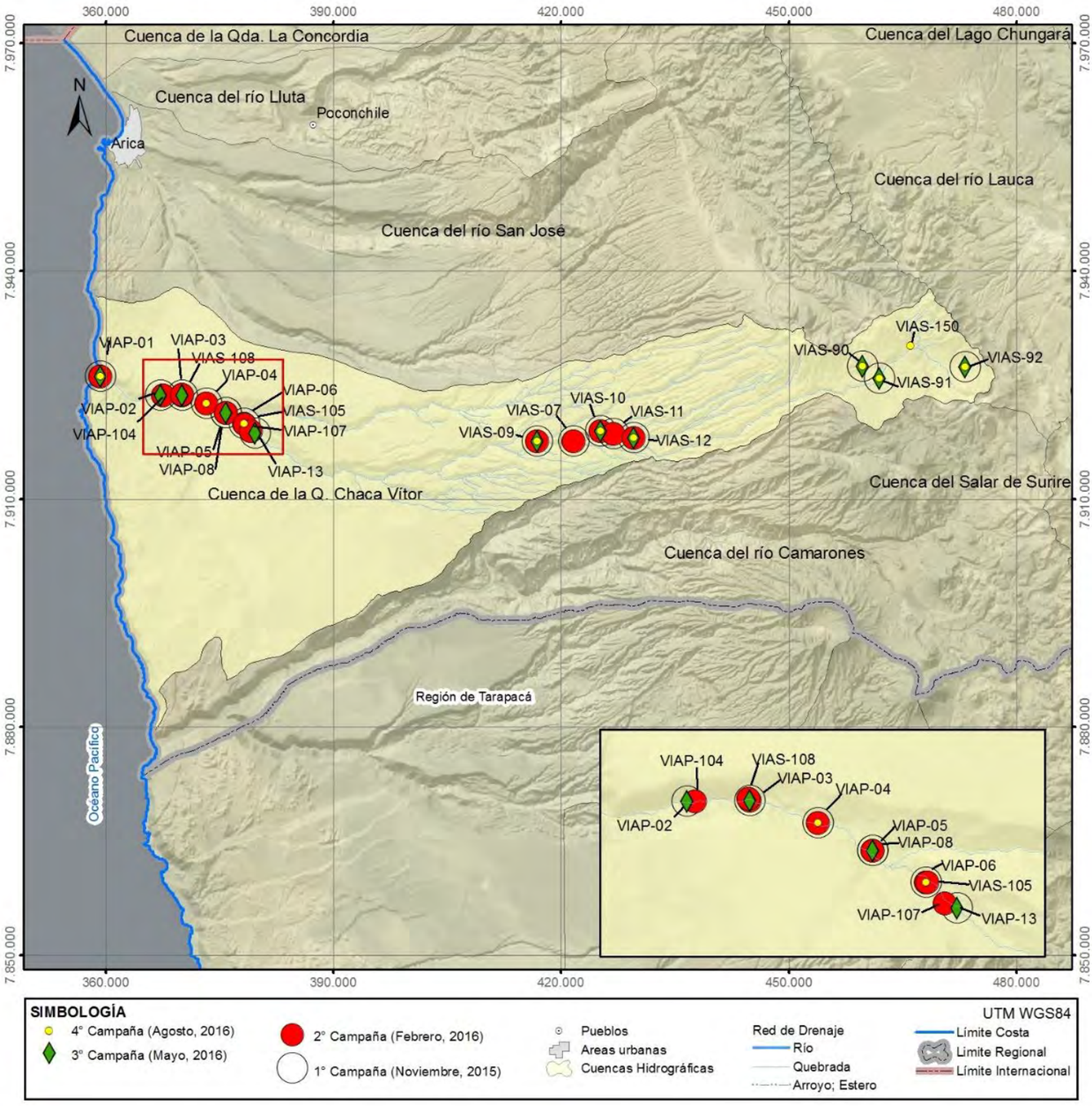


Figura 7.191 Ubicación de los puntos muestreados en la cuenca de la quebrada Chaca-Vítor durante las campañas de muestreo efectuadas en el presente estudio. Fuente: elaboración propia. Fuente: elaboración propia.

7.5.4.3 Parámetros fisicoquímicos *in situ*

En las 4 campañas de terreno se midieron los parámetros fisicoquímicos de las muestras que se tomaron para el análisis hidroquímico e isotópico. En esta sección se evalúan los valores de temperatura, pH, conductividad eléctrica y Sólidos Disueltos Totales (TDS) para caracterizar estos parámetros fisicoquímicos e identificar si existe una variación espacial y estacional de estos en la cuenca de la quebrada Chaca-Vítor.

TEMPERATURA

En la Tabla 7.112 se resumen los valores máximos, mínimos y promedios de temperatura registrados en las cuatro campañas de terreno realizadas en el presente estudio. Se observa que las temperaturas más altas se registran en noviembre de 2015 y febrero de 2016, pero luego disminuyen alcanzando las mínimas en el invierno, en agosto de 2016. La Figura 7.192 muestra que la temperatura de todas las aguas superficiales varía entre 18 y 27°C en noviembre de 2015 y van disminuyendo progresivamente hasta los 10-15°C. Sin embargo, en la Figura 7.193 se observa que la temperatura en las aguas subterráneas es prácticamente constante en el tiempo, oscilando entre 20 y 28°C. Esta diferencia térmica entre aguas superficiales y subterráneas es debido a que las aguas superficiales están influenciadas directamente por las condiciones climáticas mientras que este efecto en las aguas subterráneas es amortiguado por el suelo y sedimentos.

Tabla 7.112 Valores máximos, mínimos y promedio de temperatura registrados en cada campaña de muestreo en la cuenca de la quebrada Chaca-Vítor. Fuente: elaboración propia.

Temperatura (°C)	1°Campaña Noviembre 2015	2°Campaña Febrero 2016	3°Campaña Mayo 2016	4°Campaña Agosto 2016
Máxima	27,3	28,4	25,5	24,8
Mínima	18,3	19,1	14,1	6,6
Promedio	23,8	23,8	19,7	14,9

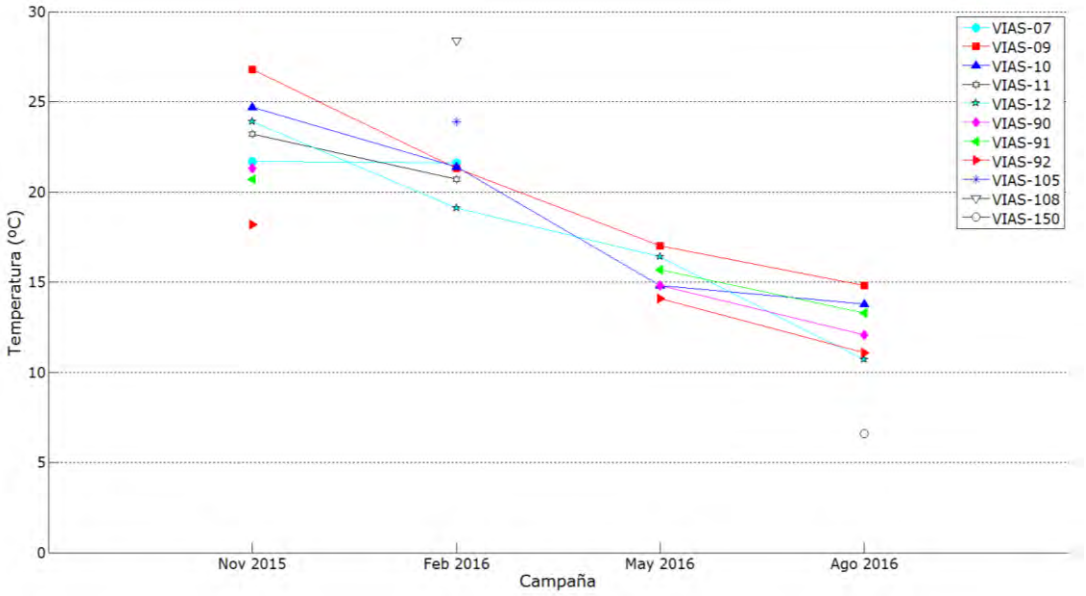


Figura 7.192 Valores de temperatura registrados en las aguas superficiales en las campañas realizadas en la cuenca de la quebrada Chaca-Vítor. Fuente: elaboración propia.

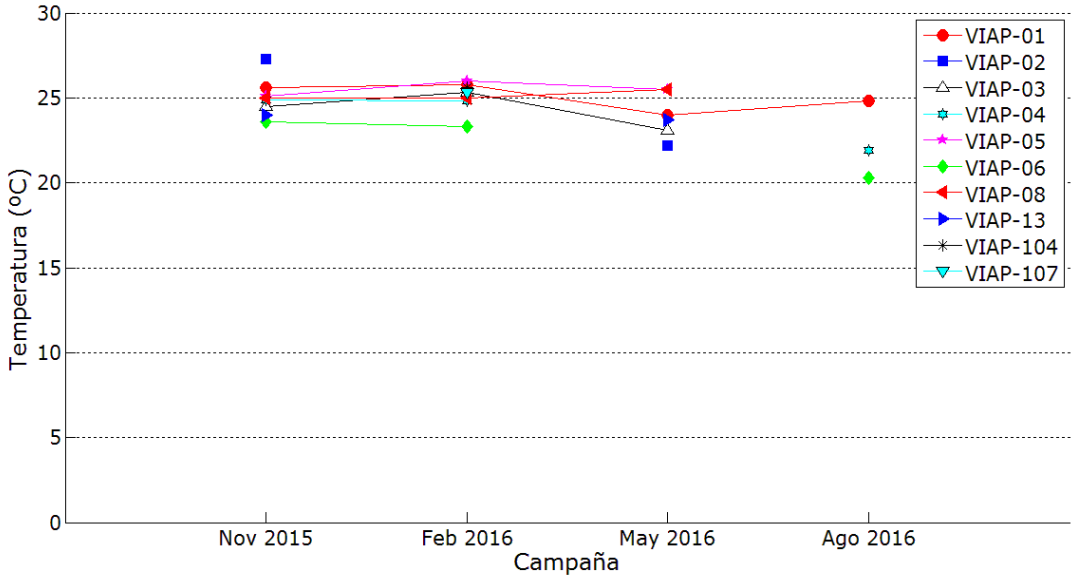


Figura 7.193 Valores de temperatura registrados en las aguas subterráneas en las campañas realizadas en la cuenca de la quebrada Chaca-Vítor. Fuente: elaboración propia.

PH

Los valores registrados de pH en las diferentes campañas de muestreo se resumen en la Tabla 7.113. En la Figura 7.194 se observa que en la primera campaña de muestreo se obtuvieron aguas superficiales de pH alcalino, 7 y 8,3, exceptuando las muestras VIAS-90 y VIAS-91, que tuvieron pH 4,49 y 5,18 respectivamente. El pH bajo de las muestras VIAS-90 y VIAS-91, ubicadas en la cabecera de la cuenca, reflejarían el efecto hidrotermal que existe en los cerros Familiani y Margarita. Durante la segunda campaña de muestreo se observa que el pH de las aguas superficiales es generalmente de 5,5. Esta situación coincide con el invierno altiplánico por lo que probablemente se origine por las abundantes precipitaciones que se producen en las cotas altas de la cuenca que está afectada por la alteración hidrotermal que existe en los cerros. Esta razón explicaría la existencia de un mayor aporte de agua con pH bajo en la parte alta de la cuenca que afectaría aguas abajo. En la tercera campaña de muestreo, en mayo de 2016, se registraron valores de pH alcalinos similares a los de la primera campaña de terreno, sin embargo, estos descendieron a 6 en la cuarta campaña, agosto de 2016.

La Figura 7.195 muestra que el pH de las aguas subterráneas es alcalino y prácticamente constante en el tiempo. Esto demuestra que el flujo de aguas subterráneas es lento y no se ve afectado por fluctuaciones cortas en el tiempo en el pH de las aguas superficiales.

Tabla 7.113 Valores máximos, mínimos y promedio de pH registrados en cada campaña de muestreo en la cuenca de la quebrada Chaca-Vítor. Fuente: elaboración propia.

pH	1°Campaña Noviembre 2015	2°Campaña Febrero 2016	3°Campaña Mayo 2016	4°Campaña Agosto 2016
Máxima	8,13	7,65	8	7,07
Mínima	4,5	5,37	5,53	4,1
Promedio	7,14	6,7	7	6

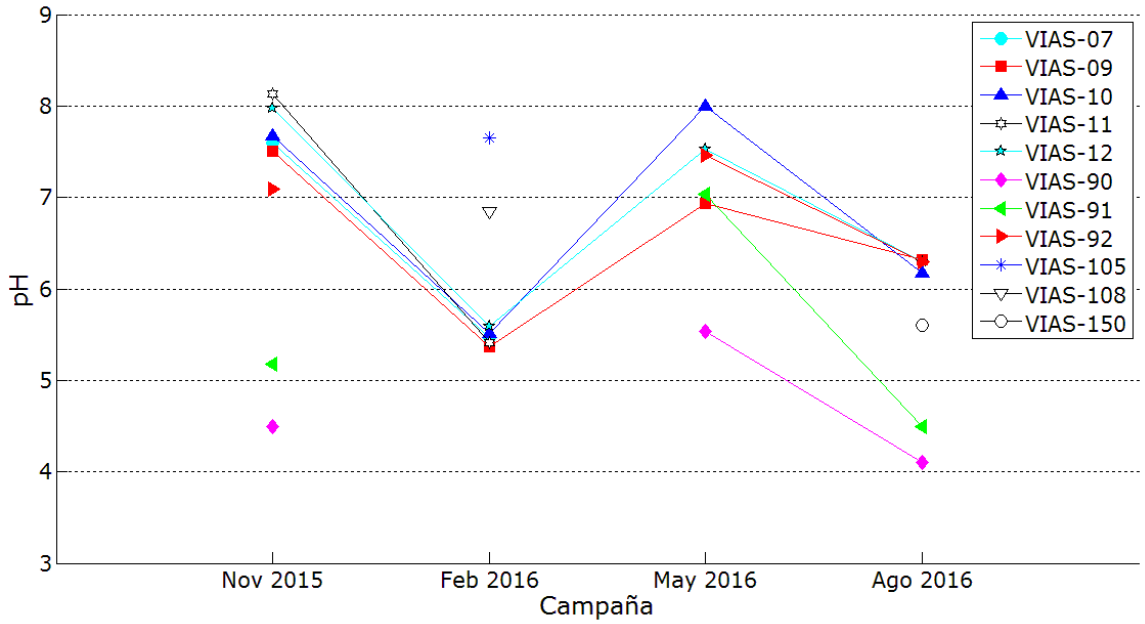


Figura 7.194 Valores de pH registrados en las aguas superficiales en las campañas realizadas en la cuenca de la quebrada Chaca-Vítor. Fuente: elaboración propia.

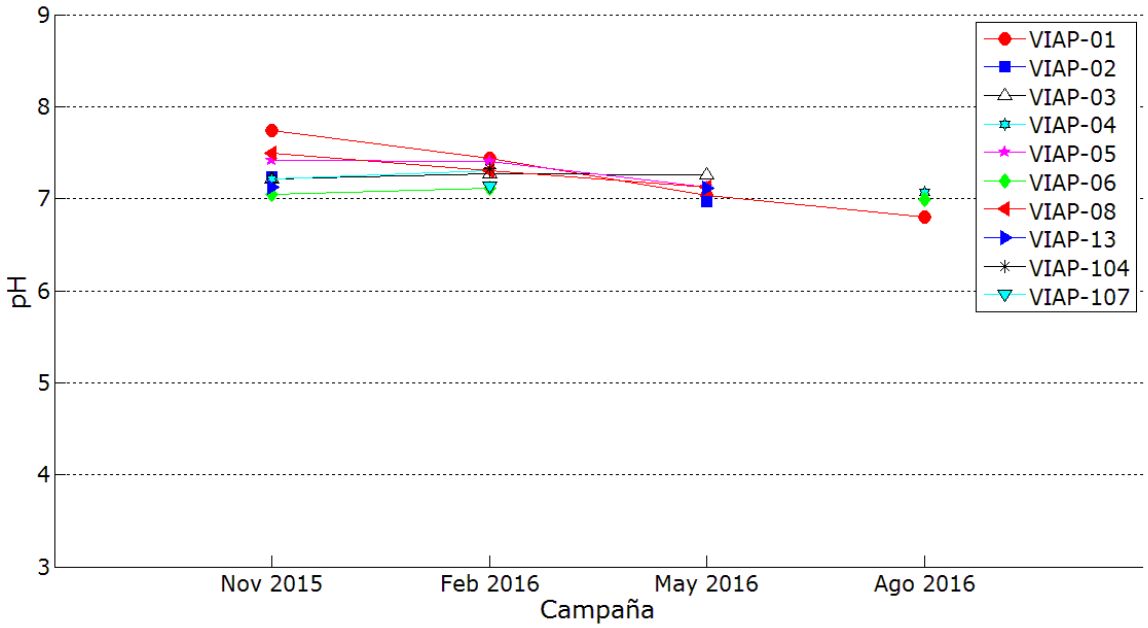


Figura 7.195 Valores de pH registrados en las aguas subterráneas en las campañas realizadas en la cuenca de la quebrada Chaca-Vítor. Fuente: elaboración propia.

CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

La Tabla 7.114 resume los valores máximos, mínimos y promedios de conductividad eléctrica registrados en las cuatro campañas de terreno realizadas en el presente estudio.

En la Figura 7.196 se evidencia que las aguas superficiales de la cuenca de la quebrada Chaca-Vítor son frescas, con valores de conductividad eléctrica inferior a 1.000 µS/cm en todos los puntos muestreados en el tiempo.

Por otro lado, los pozos muestreados se distribuyen a lo largo de los primeros 25 km del valle de la quebrada Chaca-Vítor, sin embargo, la conductividad eléctrica registrada en las aguas subterráneas varía entre 1.000 y 7.000 µS/cm, tal como se observa en la Figura 7.197. Esto se debe a varios factores: son aguas afectadas en diferente grado por la intrusión marina, los pozos tienen diferentes profundidades y en cada pozo se explota un caudal y tiempo diferente.

Tabla 7.114 Valores máximos, mínimos y promedio de conductividad eléctrica registrados en cada campaña de muestreo en la cuenca de la quebrada Chaca-Vítor. Fuente: elaboración propia.

CE (µS/cm)	1°Campaña Noviembre 2015	2°Campaña Febrero 2016	3°Campaña Mayo 2016	4°Campaña Agosto 2016
Máxima	5.930	7.010	4.310	4.520
Mínima	117,8	383	17,8	92,2
Promedio	1.945	2.541	1.364	903

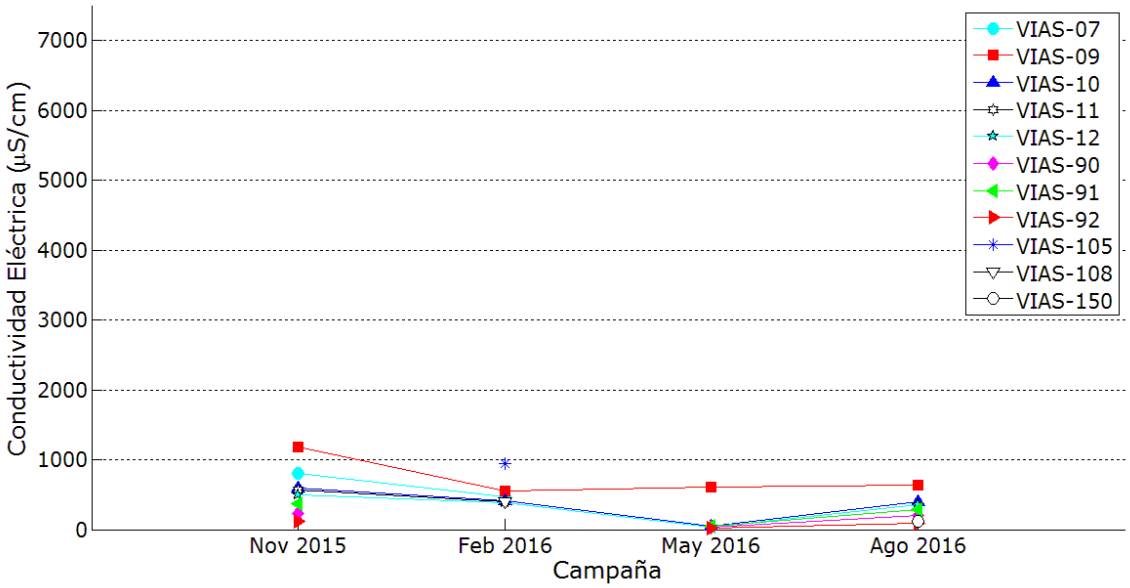


Figura 7.196 Valores de la conductividad eléctrica registrados en las aguas superficiales en las campañas realizadas en la cuenca de la quebrada Chaca-Vítor. Fuente: elaboración propia.

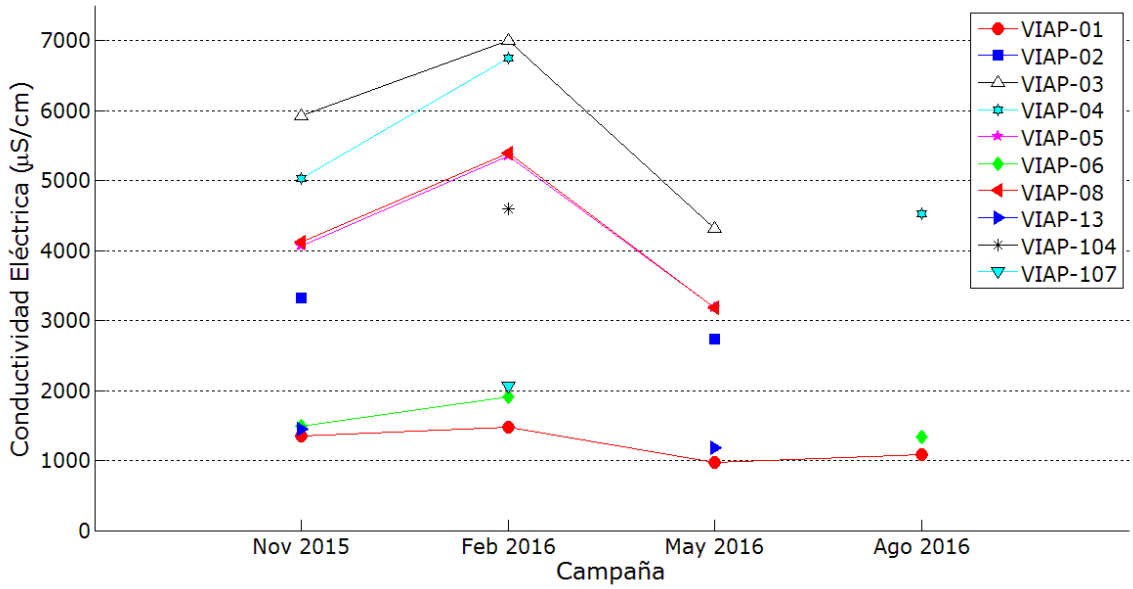


Figura 7.197 Valores de la conductividad eléctrica registrados en las aguas subterráneas en las campañas realizadas en la cuenca de la quebrada Chaca-Vítor. Fuente: elaboración propia.

SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES (TDS)

La Tabla 7.115 resume los valores máximos, mínimos y promedios de sólidos disueltos totales registrados en las cuatro campañas de terreno realizadas en el presente estudio.

Tabla 7.115 Valores máximos, mínimos y promedio de sólidos disueltos totales registrados en cada campaña de muestreo en la cuenca de la quebrada Chaca-Vítor. Fuente: elaboración propia.

TDS (mg/L)	1°Campaña Noviembre 2015	2°Campaña Febrero 2016	3°Campaña Mayo 2016	4°Campaña Agosto 2016
Máxima	3.800	4.490	2.760	2.890
Mínima	75,4	128	11,4	62,8
Promedio	1.246	1.617	873	578

7.5.4.4 Modelo hidroquímico de las aguas

En esta sección se describen los parámetros fisicoquímicos registrados en terreno, se clasificó la composición hidroquímica de las aguas superficiales y subterráneas de la cuenca de la quebrada Chaca-Vítor y se analizó la relación iónica entre los diferentes elementos.

CONTROL DE CALIDAD ANÁLISIS QUÍMICOS

Los valores máximos y mínimos del error del balance iónico de la composición química obtenida en el laboratorio se presentan en la Tabla 7.116. Se observa que en la segunda campaña de muestreo se analizaron elementos totales y se obtuvieron errores en el balance iónico superiores al 10% debido al alto contenido de partículas coloidales y sedimentables, reflejo de las consecuencias del invierno altiplánico. El invierno altiplánico se caracteriza por presentar precipitaciones fuertes y cortas en el tiempo, por lo que debido a la alta velocidad de las aguas superficiales, estas arrastran gran cantidad sedimentos. En el Anexo VIII se muestra que varias muestras de la segunda campaña fueron filtradas posteriormente en el laboratorio y que el error del balance iónico de los elementos disueltos es generalmente inferior al 10%.

Tabla 7.116 Resumen de los valores máximos y mínimos del error del balance iónico de la composición química de las muestras de las cuatro campañas de muestreo en la cuenca de la quebrada Chaca-Vítor. Fuente: elaboración propia.

Error del balance iónico	1°Campaña Noviembre 2015	2°Campaña Febrero 2016	3°Campaña Mayo 2016	4°Campaña Agosto 2016
Máximo	6,03%	18,80%	7,58%	7,99%
Mínimo	-9,15%	-10,86%	-5,21%	-8,59%

Por otro lado, se tomaron dos muestras de agua, VIAP-05 y VIAP-08, en el mismo momento y pozo, para comprobar la calidad de los resultados del laboratorio. Los resultados entregaron valores similares del error del balance iónico de ambas muestras en cada campaña, lo cual verifica la calidad del análisis químico del laboratorio.

ANÁLISIS DE FACIES QUÍMICAS

La muestra VIAS-92 es una muestra que corresponde a una de las vertientes que alimenta a la quebrada Achacagua en la parte alta de la cuenca. Estas aguas son frescas de tipo bicarbonatadas magnésico-cálcicas muy poco mineralizadas, mientras que a 14 km aguas abajo de este punto, las aguas son sulfatadas cálcicas, correspondiente a la muestra VIAS-91. La muestra VIAS-92 corresponde a aguas meteóricas de una vertiente del cerro Anocarire con la misma huella química que las vertientes que alimentan al río Ajatama (cuenca del río Camarones), mientras que el resto de muestras son sulfatadas, pero el catión dominante varía, de cálcico-sódicas a sódico-cálcicas.

En los diagramas de Piper y Schoeller-Berkaloff elaborados en esta sección se representó de color azul las aguas superficiales de la quebrada Vítor, de color naranja las aguas subterráneas tomadas en pozos, de color negro las aguas superficiales recogidas en el canal en Chaca y de color verde a las muestras tomadas en diferentes quebradas precordilleranas.

En la cabecera de la cuenca, las muestras VIAS-90 y VIAS-91 son aguas sulfatadas cálcico-sódicas que proceden de los cerros Familiani y Margarita. Son aguas sulfatadas y de pH entre 5 y 4,5, lo cual refleja la alteración hidrotermal que existe en estos cerros volcánicos, del mismo modo que sucede en las muestras SJAS-88 y SJAS-89 en el otro lado de la divisoria de aguas que crean estos volcanes, cuenca del río San José.

Aguas abajo, en el sector de Codpa, las aguas superficiales VIAS-07, 09, 10,11 y 12 se caracterizaron por tener la misma composición química, siendo aguas sulfatadas cálcico-sódicas, en las que dominan los cationes de calcio y magnesio. Es destacable, que en el muestreo realizado en febrero de 2016, estas aguas son muy similares a las aguas sulfatadas VIAS-90 y VIAS-91 analizadas en noviembre de 2015 debido al lavado y arrastre de minerales que producen las abundantes precipitaciones durante el invierno altiplánico en las zonas de alteración.

Por último, en el tramo desde Chaca hasta la caleta Vítor las aguas subterráneas extraídas en los pozos del valle sufren un incremento de contenido de calcio, siendo sulfatadas entre cálcico-sódicas y sódico-cálcicas, tal como se puede observar en la Figura 7.198. La composición química de las aguas subterráneas se mantiene constante durante todas las campañas de muestreo. En febrero de 2016 escurría agua superficial por la quebrada Vítor hasta la desembocadura en el océano Pacífico, lo cual permitió analizar y comparar químicamente las aguas del acuífero y las aguas superficiales de la quebrada. En la Figura 7.199 se puede observar como las aguas de la quebrada Vítor desde Chaca hacia aguas abajo presentan una composición química intermedia entre las aguas subterráneas del acuífero y las aguas superficiales en el sector de Codpa.

En el diagrama de Schoeller-Berkaloff se observa como las aguas de la vertiente de la cabecera de la cuenca son aguas frescas muy poco mineralizadas mientras que aguas abajo van aumentando el contenido de elementos mayoritarios, siendo las aguas subterráneas de la parte baja de la cuenca las aguas más mineralizadas. En el tramo desde Chaca hasta caleta Vítor no presentó un aumento progresivo de la mineralización siendo la muestra VIAP-03 la más mineralizada. Esto puede deberse a la diferencia de profundidades de los pozos y a la cuña salina, pero no se observa una intrusión marina en la caleta Vítor.

Las huellas hidroquímicas obtenidas en las 4 campañas de terreno son similares y del mismo modo sucede al compararlas con las aguas analizadas por MAYCO (2013) en la parte baja de la cuenca. Esto implica que no existe una variación en la composición hidroquímica importante en las aguas de la cuenca Chaca-Vítor.

En el Anexo VIII se presentan los diagramas de Piper y de Schoeller-Berkaloff de la tercera y cuarta campaña de terreno, es decir, en mayo y agosto de 2016.

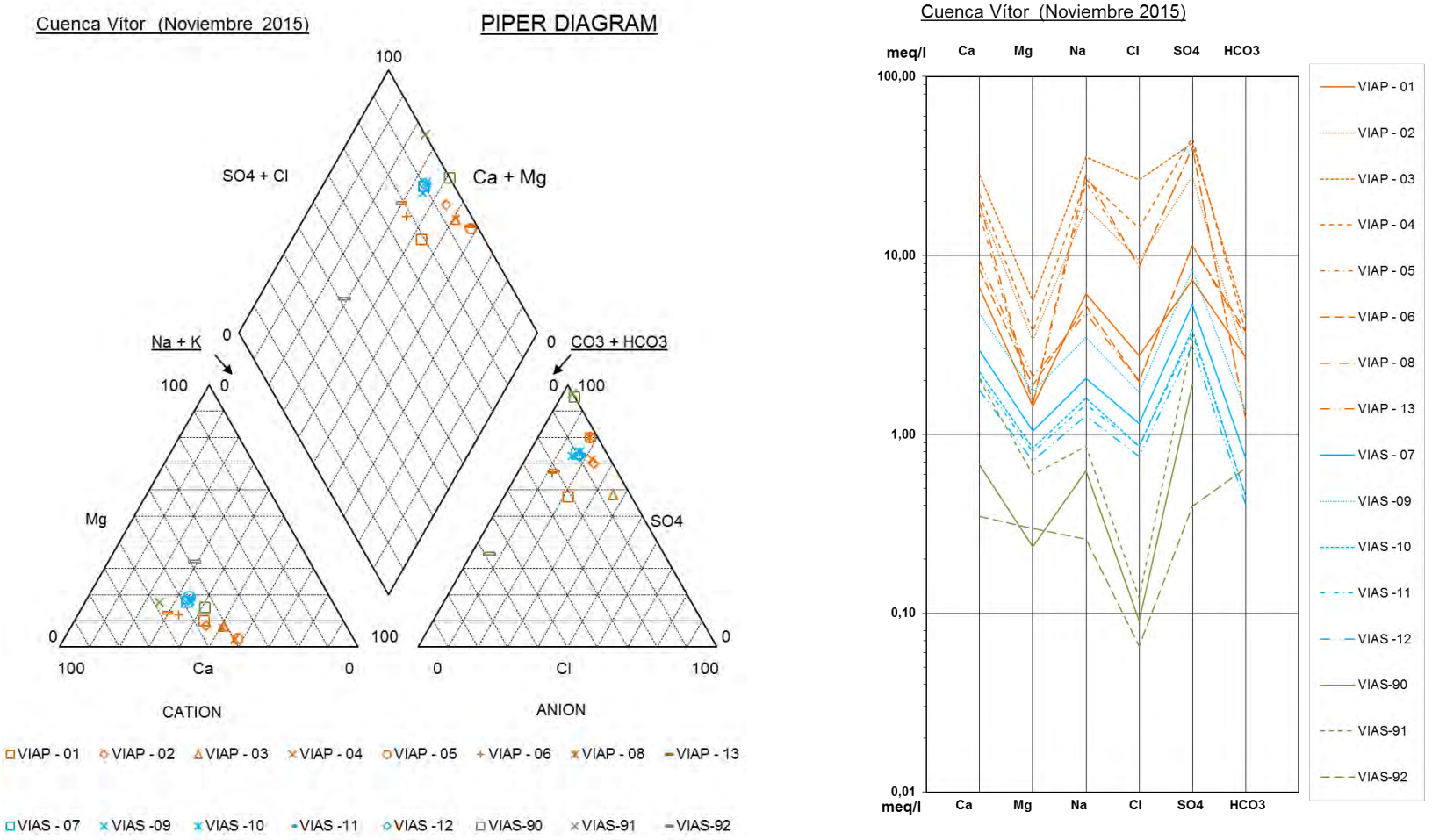


Figura 7.198 Diagramas de Piper y de Schoeller-Berkaloff de la composición hidroquímica de la cuenca de la quebrada Chaca-Vítor, noviembre de 2015. Fuente: elaboración propia.

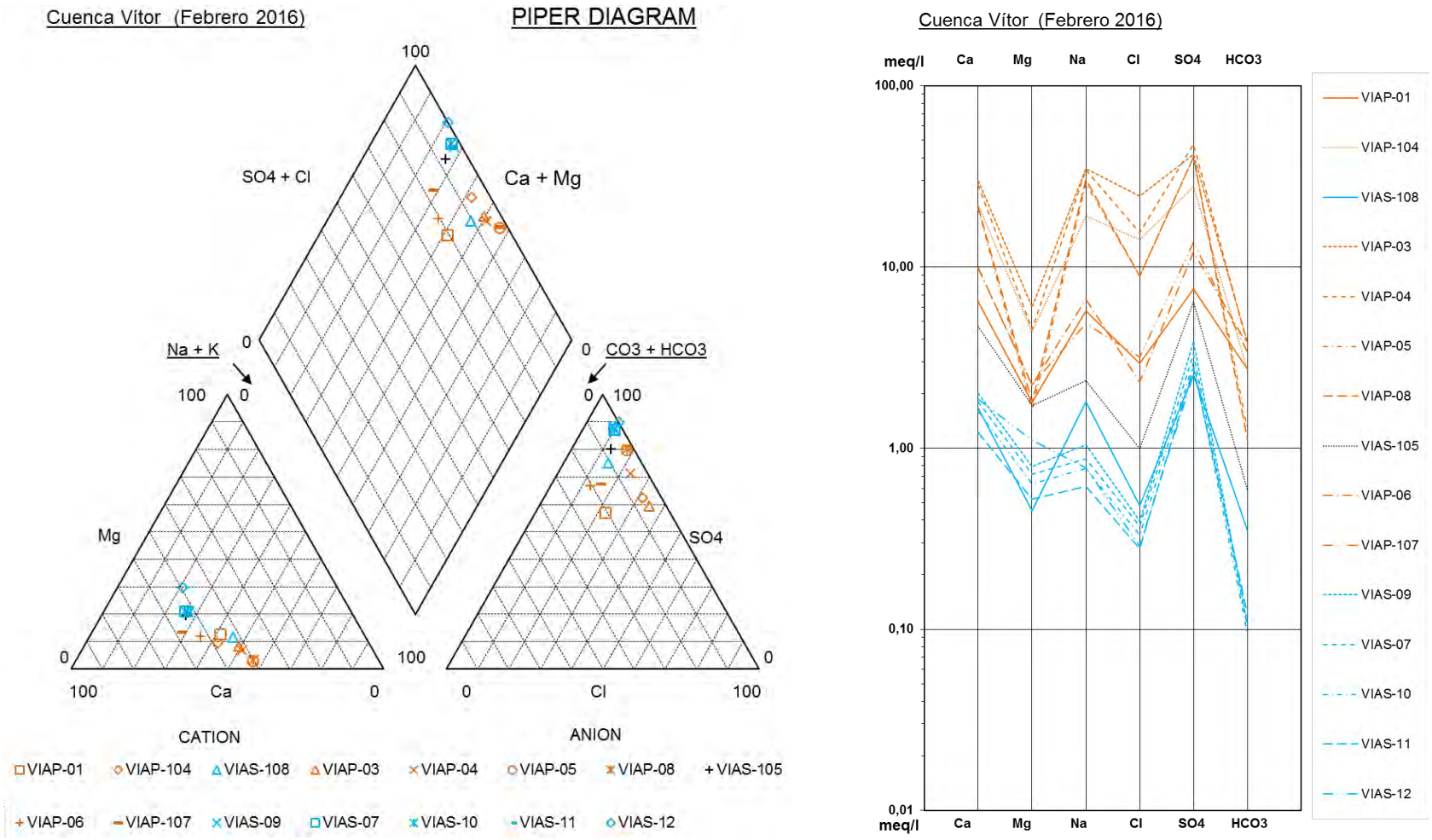


Figura 7.199 Diagramas de Piper y de Schoeller-Berkaloff de la composición hidroquímica de la cuenca de la quebrada Chaca-Vítor, febrero de 2016. Fuente: elaboración propia.

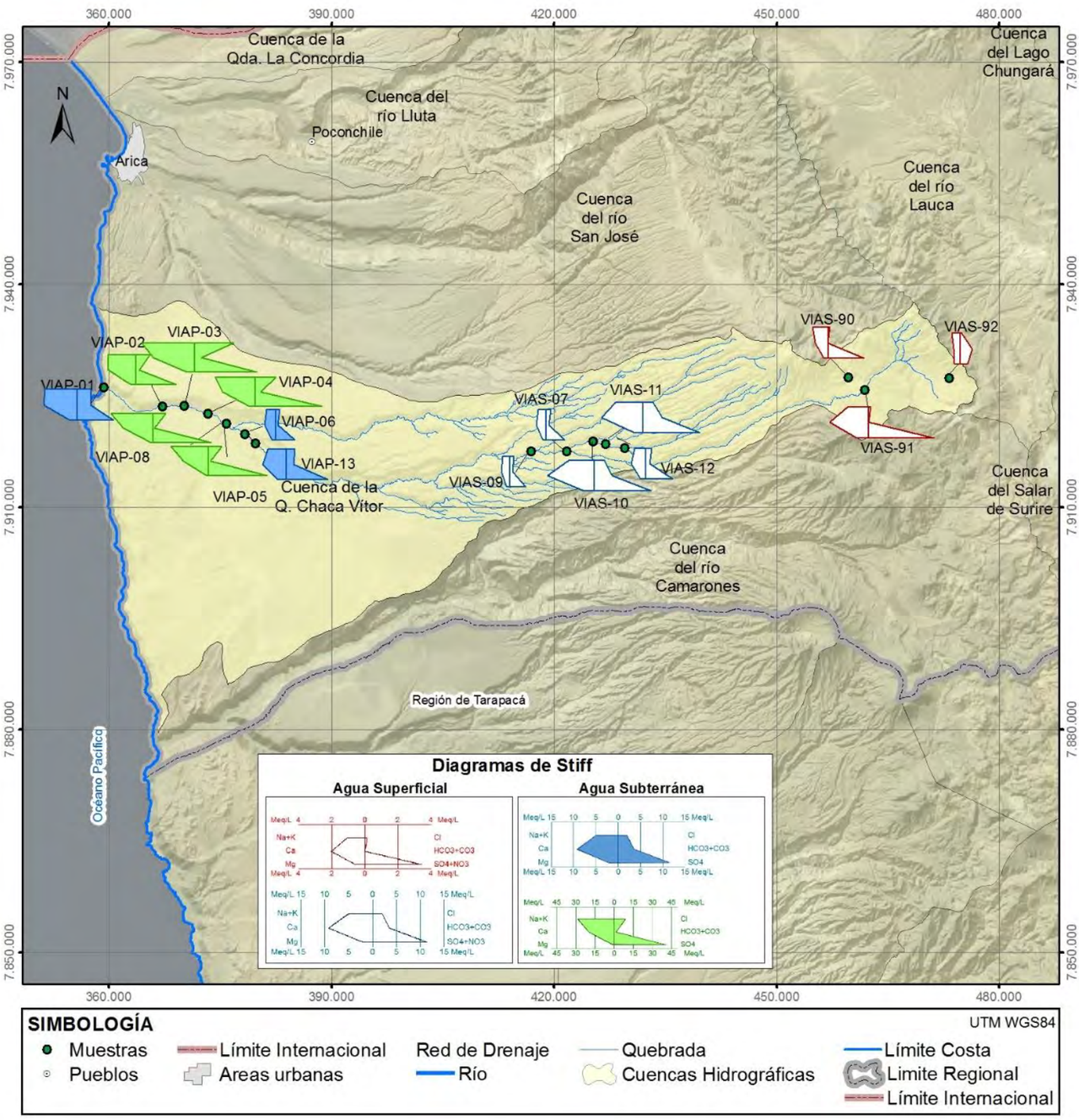


Figura 7.200 Mapa con los diagramas de Stiff de la composición química de las muestras recogidas en la cuenca de la quebrada Chaca-Vítor en noviembre de 2015. Fuente: elaboración propia.

En el Anexo VIII se presentan los gráficos del contenido de elementos mayoritarios y minoritarios obtenidos en las diferentes campañas. Ninguna muestra presentó niveles de zinc, plomo, cobre, selenio, mercurio, hierro, cromo, cianuro, cadmio y amonio, excepto en el análisis efectuado en febrero de 2016 cuando se produjo un aumento del contenido de estos elementos.

El nivel de aluminio fue inferior a 3 mg/l, sin embargo, hubo un aumento importante en las aguas superficiales tomadas en febrero de 2016, de 100-500 mg/l. Los valores de arsénico fueron bajos, pero superiores en las aguas subterráneas que en las superficiales, menos en la campaña de febrero 2016 en que incrementó el nivel de arsénico en las aguas superficiales y en el pozo VIAP-03. El contenido de litio varía según el tipo de agua que sea, es decir, las aguas superficiales tienen menos de 0,1 mg/L mientras que las aguas subterráneas muestreadas en los pozos presentan entre 0,11 y 0,31 mg/L de Li.

Las aguas subterráneas presentaron mayor cantidad de boro, bromuros, calcio, cloruros, fluoruros, magnesio, potasio, nitratos, sodio y sulfatos que en las aguas superficiales. Esto es debido a que las aguas subterráneas son aguas más mineralizadas que las aguas superficiales, ya que las aguas subterráneas son aguas con circulación más lenta y de mayor interacción agua-roca.

EVOLUCIÓN DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS AGUAS

En las aguas de la cuenca de la quebrada Chaca-Vítor la variación estacional de la temperatura se refleja en las aguas superficiales, pero no en las subterráneas, ya que en estas últimas el efecto es amortiguado por la unidad geológica. Las aguas de la cuenca de la quebrada Chaca –Vítor son alcalinas excepto en la cabecera de la cuenca que son aguas ácidas. Sin embargo, en las aguas superficiales se identifica un descenso en el pH en la segunda campaña de terreno, febrero de 2016. Esta situación coincide con el invierno altiplánico por lo que probablemente se origine por las abundantes precipitaciones que se producen en las cotas altas de la cuenca que está afectada por la alteración hidrotermal que existe en los cerros. Esta razón explicaría que la existencia de un mayor aporte de agua con pH bajo en la parte alta de la cuenca que afectaría aguas abajo.

Respecto a la conductividad eléctrica, las aguas superficiales son aguas dulces, generalmente de conductividad eléctrica inferior a 1.000 µS/cm en todos los puntos muestreados en el tiempo, sin embargo la conductividad registrada en las aguas subterráneas varía entre 1.000 y 7.000 µS/cm. El amplio rango de conductividad eléctrica de las aguas subterráneas se debe a varios factores como: son aguas afectadas en diferente grado por la intrusión marina, los pozos tienen diferentes profundidades y en cada pozo se explota un caudal y tiempo diferente.

La cuenca de la quebrada Chaca-Vítor se caracteriza por presentar generalmente aguas sulfatadas, pero el catión dominante varía de cálcico-sódicas a sódico-cálcicas. En el sector alto de la cuenca las aguas son frescas que a medida que circulan por la cuenca van aumentando de conductividad eléctrica y de grado de mineralización.

La muestra VIAS-92, ubicada en el nacimiento de la quebrada Achacagua, son bicarbonatadas magnésico-cálcicas, de pH 7 y conductividad de 117 µS/cm, muy poco mineralizadas. Corresponden a aguas meteóricas, aguas jóvenes, de una vertiente del cerro Anocarire con la misma huella química que las vertientes que alimentan al río Ajatama (cuenca del río Camarones). Aguas abajo, las muestras VIAS-90 y VIAS-91 son aguas sulfatadas cálcico-sódicas que proceden de los cerros Familiani y Margarita. Estas últimas son aguas sulfatadas, de pH entre 5 y 4,5 y conductividad eléctrica de 220-370 µS/cm, lo cual refleja la alteración hidrotermal que existe en estos cerros volcánicos compuestos de andesitas y dacitas del Mioceno superior. Del mismo modo que sucede en las muestras SJAS-88 y SJAS-89 en el otro lado de la divisoria de aguas que crean estos volcanes, cuenca del río San José. Por otro lado, otra manifestación de la influencia de la zona de alteración hidrotermal que existe en los cerros Familiani y Margarita de origen volcánico y fracturados adicionan el contenido de metales como cadmio, aluminio, hierro, zinc, cobre, cromo, manganeso, mercurio y plomo existente en la litología de las formaciones rocosas y el bajo valor del pH (5-4), las cuales por procesos de lixiviación superficial y percolación de las aguas subterráneas adicionan estos metales a las aguas superficiales de la quebrada Vítor.

En el sector de Chitita-Codpa, las aguas superficiales de la quebrada Vítor son sulfatadas cálcico-sódicas y de baja conductividad eléctrica (500-1.000 µS/cm) producto del flujo base que escurre por la quebrada. Sin embargo, en febrero de 2016 dominan los cationes de calcio y magnesio y la conductividad es inferior (380-550 µS/cm). Es destacable que, durante el muestreo y análisis efectuado en febrero de

2016, las aguas eran muy similares químicamente a las aguas sulfatadas VIAS-90 y VIAS-91 analizadas en noviembre de 2015. Esta variación química es consecuencia del lavado y arrastre de minerales que producen las abundantes precipitaciones durante el invierno altiplánico en las zonas de alteración. Esta situación también se ve reflejada en el valor del pH, en el análisis realizado en noviembre las aguas presentaron un pH que osciló entre 7,5 a 8,1, pero en febrero descendió a un pH de 5,5, similar a las muestras VIAS-90 y VIAS-91.

En el sector bajo de la cuenca, desde Chaca hasta la caleta Vítor, las aguas subterráneas tomadas en los pozos son sulfatadas entre cálcico-sódicas y sódico-cálcicas, un pH constante (7,2) y una conductividad eléctrica que asciende hasta alcanzar los máximos valores en los pozos ubicados aguas abajo de la carretera Panamericana, sin sufrir variación temporal entre las campañas de muestreo. Las aguas subterráneas del sector Chaca-Vítor no contienen significativamente metales más que hierro. En la campaña realizada en febrero de 2016 se pudo muestrear y analizar las aguas superficiales que fluían hasta la desembocadura del océano Pacífico, observándose que las aguas superficiales en el tramo Chaca-Caleta Vítor presentan una composición química intermedia entre las aguas subterráneas del acuífero y las aguas superficiales en el sector de Codpa.

Las aguas subterráneas son aguas más mineralizadas (mayor contenido de elementos) que las aguas superficiales, ya que las aguas subterráneas son aguas con circulación más lenta y de mayor interacción agua-roca. Por otro lado, las aguas superficiales muestreadas en febrero de 2016 contienen mayor cantidad de elementos que el resto del año debido al arrastre de sedimentos producido por las fuertes precipitaciones del invierno altiplánico.

7.5.4.5 Calidad de las aguas

En la primera campaña de terreno, noviembre de 2015, se analizaron los contenidos de elementos mayoritarios y minoritarios disueltos en las aguas superficiales y subterráneas para poder comparar con el contenido de elementos mayoritarios y minoritarios totales analizados en el resto de campañas de muestreo. En el Anexo VIII se presentan los resultados de las mediciones de parámetros *in situ* y análisis de laboratorio, y dentro de cada tabla se remarcaron en rojo aquellos valores que sobrepasan la norma chilena para uso de agua potable

NCh409 y en verde los resultados de aluminio y boro que superen los límites establecidos en la norma de riego NCh1.333.

Los resultados obtenidos de las 26 muestras analizadas en noviembre de 2015 manifiestan que estas aguas no superan los límites establecidos en la norma chilena de agua potable NCh 409/1 en el contenido de cadmio, cianuros, cobre, cromo, hierro, mercurio, nitratos, nitritos, relación nitratos/nitrito, amoniaco, plomo, selenio, zinc y pH. De las 26 muestras de agua analizadas en los elementos disueltos, 6 muestras presentan buena calidad y aptas para el consumo humano, ya que no exceden el límite de ningún elemento considerado en la NCh 409. Sin embargo, el resto de las muestras superan el contenido de manganeso, sulfatos, sólidos disueltos totales, arsénico y/o fluoruros. Las aguas aptas para el consumo humano se ubican en un pozo en la caleta Vítor, en el sector de Codpa y en una de las vertientes de la parte alta de la cuenca. En los resultados de la composición química de las muestras analizadas en la primera campaña de terreno, se destaca que el contenido de nitratos es inferior a 1 mg/L en las aguas superficiales, pero superior a 4 mg/L en las aguas subterráneas, excepto en el pozo VIAP-01. En particular, la muestra VIAP-03 presenta el mayor contenido de elementos mayoritarios y minoritarios de las muestras tomadas en noviembre de 2015.

En febrero de 2016 se analizaron los elementos mayoritarios y minoritarios totales de 8 muestras de aguas subterráneas tomadas en pozos y 7 muestras de aguas superficiales. Ninguna de las 15 muestras de agua son aptas para el consumo humano, según los límites establecidos en la norma chilena NCh 409, excediendo el contenido en hierro, sulfatos, mercurio, manganeso, plomo, cadmio, arsénico, cromo, sólidos disueltos totales y/o están por debajo del rango de pH. Además, 8 de las muestras excede el límite de boro y otras 8 exceden el nivel de aluminio indicado en la norma de riego NCh 1.333.

El análisis hidroquímico realizado en mayo de 2016 determinó que la muestra tomada en el pozo próximo a Caleta Vítor (VIAP-01) es agua apta para el consumo humano, pero no respeta el límite de boro establecido en la norma de riego NCh 1.333. El resto de las muestras exceden el nivel de arsénico, cloruros, fluoruros, hierro, manganeso, sulfatos, sólidos disueltos totales y/o pH que indica la norma NCh 409 y en 8 de las 12 muestras superan el límite de boro determinado en la norma de riego NCh 1.333.

Los resultados obtenidos en la campaña de muestreo realizada en agosto de 2016 indicaron que el pozo próximo a Caleta Vítor (VIAP-01) y las muestras VIAS-92 y VIAS-150 son aguas aptas para el consumo humano, sin embargo, la muestra VIAP-01 contiene mayor cantidad de boro que el límite establecido en la norma NCh 1.333. El resto de muestras analizadas superan el nivel de arsénico, cloruros, hierro, manganeso, sulfatos, sólidos disueltos totales y/o pH que indica la norma NCh 409. De las 10 muestras analizadas, 5 de ellas sobrepasan el nivel de boro que define la NCh 1.333.

Es destacable que todas las muestras tomadas en pozos y en todas las campañas, el nivel de boro supera el límite establecido en la norma de riego NCh 1.333.

7.5.4.6 Isotopía de las aguas

A continuación se analiza la composición isotópica de oxígeno 18 ($\delta^{18}O$) y deuterio (δD) de las aguas de la cuenca de la quebrada Chaca-vítor muestreadas en MAYCO (2013) y en las 4 campañas de muestreo durante el presente estudio. En la Figura 7.201 se presenta la ubicación de los puntos de agua superficial y subterránea muestreados en cada campaña de terreno con el fin de analizar isotópicamente la molécula del agua.

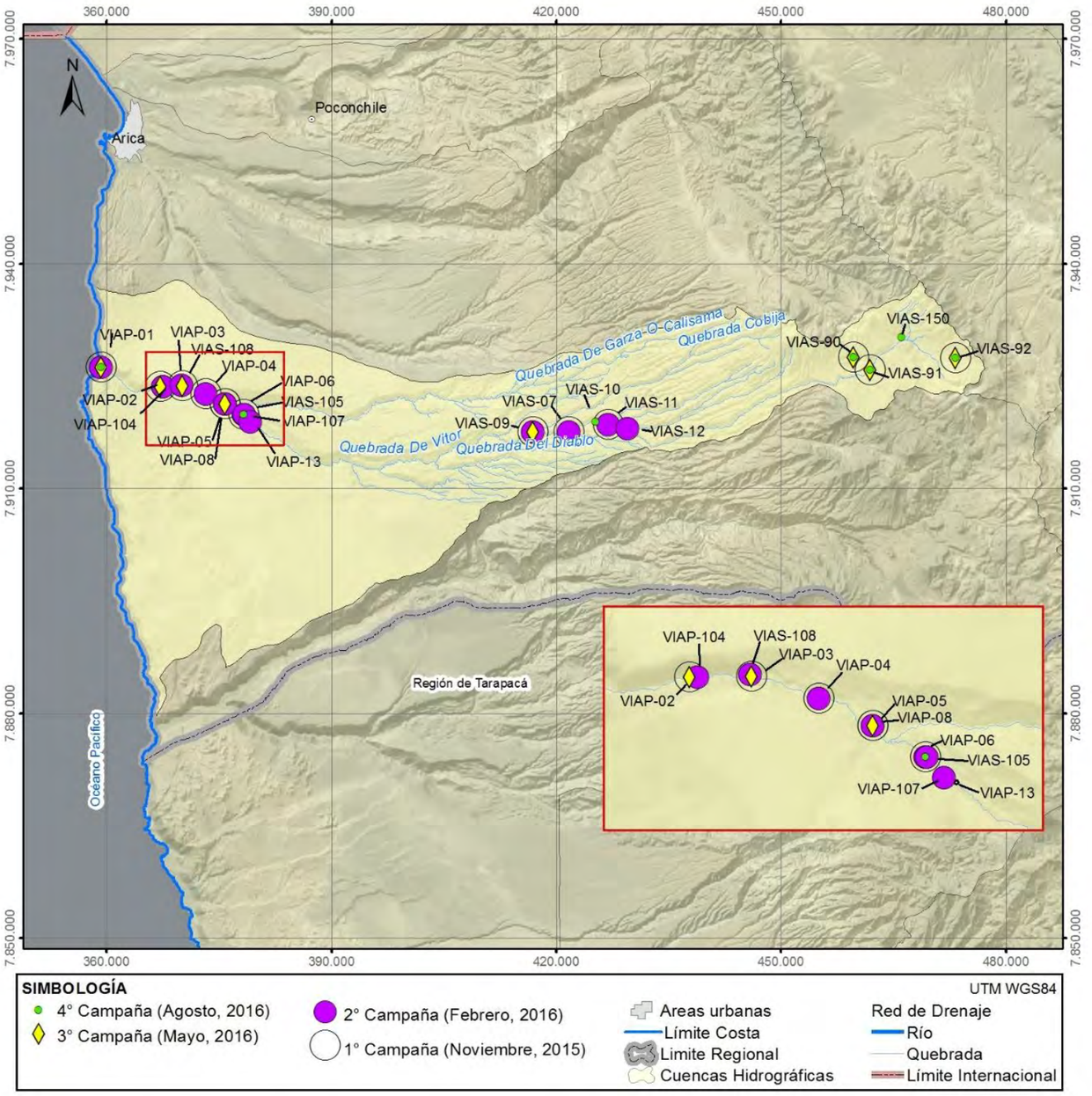


Figura 7.201 Ubicación de las muestras analizadas isotópicamente en la cuenca de la quebrada Chaca-Vítor en las campañas de terreno. Fuente: elaboración propia.

En las siguientes figuras se han interpretado los análisis isotópicos de cada campaña mediante gráficos que muestran la relación entre $\delta^{18}O$ VSMOW y δD VSMOW, en el que de color azul se presentan las aguas analizadas en noviembre de 2015, de naranjo las muestras tomadas en febrero 2016, de color verde las aguas muestreadas en mayo 2016 y de color rojo las aguas analizadas isotópicamente en agosto de 2016. Hay que considerar que las muestras VIAP-05 y VIAP-08 son una muestra doble para comprobar la calidad de los resultados del laboratorio, siendo muy similares los resultados en ambos casos. En la Tabla 7.117 se indican los valores máximos y mínimos de oxígeno y deuterio obtenidos en cada campaña de muestreo.

Tabla 7.117 Resumen de los valores máximos y mínimos de oxígeno y deuterio obtenidos en las cuatro campañas de muestreo en la cuenca de la quebrada Chaca-Vítor. Fuente: elaboración propia.

		1°Campaña Noviembre 2015	2°Campaña Febrero 2016	3°Campaña Mayo 2016	4°Campaña Agosto 2016
$\delta^{18}O$‰ SMOW	Máximo	-7,9	-7,6	-7,8	-9,2
	Mínimo	-13,1	-10,7	-13,3	-13,3
δD‰ SMOW	Máximo	-60,2	-48,6	-60,5	-68,44
	Mínimo	-95,2	-75,6	-96,2	-96,0

En las Figura 7.202 se observa que la mayoría de las aguas superficiales analizadas han sufrido evaporación, por lo que la relación entre D y ^{18}O se ha modificado alejándose de la RMM. La muestra VIAS-92 en las 3 campañas se ajusta a la RRM, por lo que no ha sufrido ningún efecto que provoque modificaciones en el contenido de D y ^{18}O (evaporación, interacción agua-roca, entre otros), la cual indicaría que es agua más liviana, es decir, más empobrecida isotópicamente que el resto de las muestras. Esto corrobora que son aguas meteóricas. La composición isotópica de las muestras VIAS-90 y VIAS-91, ubicadas en la cabecera de la cuenca, refleja la interacción con las zonas de alteración hidrotermal.

El resto de las muestras no se ajustan a la RMM, y se aproximan a rectas con pendiente 4 y 5, por lo que implicaría que han sufrido uno o varios procesos que modificaron la composición isotópica, probablemente por evaporación.

Si se compara la composición isotópica de las aguas superficiales de las diferentes campañas, se concluye que en febrero de 2016 las aguas del sector de Codpa son aguas frescas, menos fraccionadas, ya que reciben precipitaciones directas del invierno

altiplánico en la zona alta de la cuenca y no están evaporadas por ser flujos de agua rápidos. Por otro lado, las muestras que se han tomado en el mismo punto durante la primera y la tercera campaña se observa que la composición isotópica es similar o que las aguas tomadas en noviembre de 2015 reflejan mayor evaporación que las recogidas en mayo de 2016. Sin embargo, las aguas tomadas en la cabecera de la cuenca en agosto de 2016 se ajustan a la RMM, indicando que son aguas similares a las precipitaciones que recargan el acuífero, excepto la muestra tomada en la quebrada Vítor en la localidad de Guañacagua, que presenta una composición isotópica afectada sólo por evaporación.

La relación entre D y ^{18}O de las aguas subterráneas indican el efecto de evaporación, ya que se ajustan a las rectas con pendiente 4 y 5, tal como se muestra en la Figura 7.203. Si se compara la composición isotópica obtenida en cada campaña se determina que no existe una variación importante. Por lo tanto, las aguas subterráneas del valle de Chaca-Vítor al mostrar evaporación implican que las aguas antes de recargar al acuífero, infiltrarse, ya habrían sufrido el proceso de evaporación.

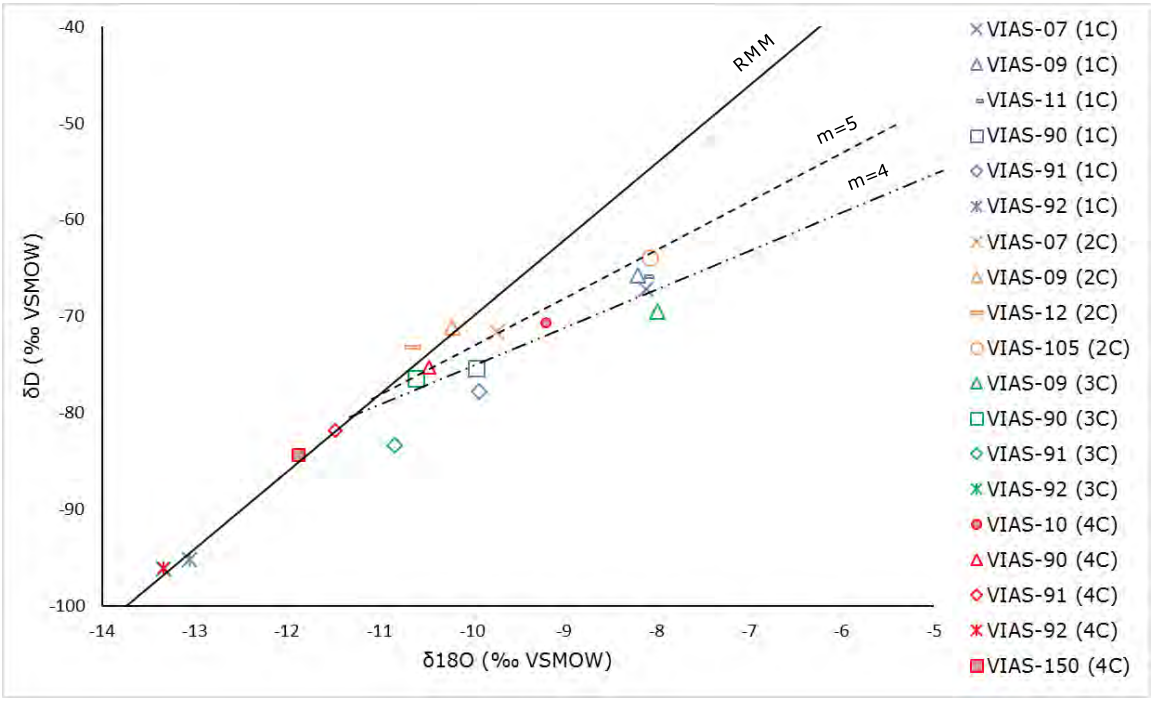


Figura 7.202 **Relación $\delta^{18}O/\delta D$ de las** aguas superficiales analizadas en la cuenca de la quebrada Chaca-Vítor en las diferentes campañas. Fuente: elaboración propia.

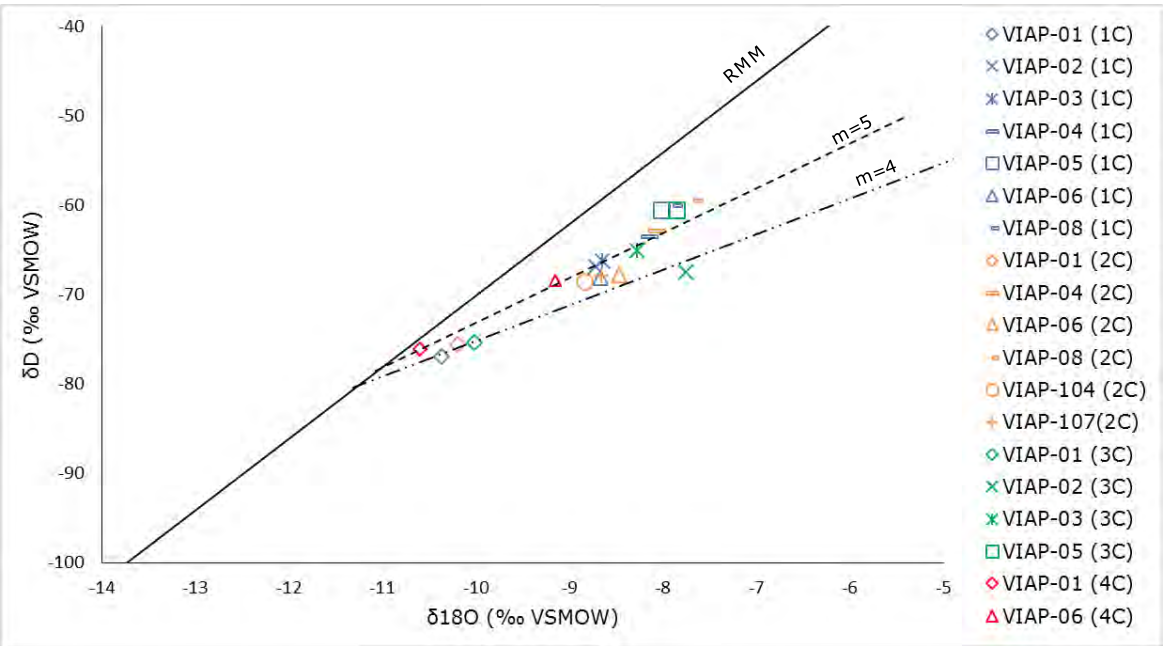


Figura 7.203 **Relación $\delta^{18}O/\delta D$ de las** aguas subterráneas analizadas en la cuenca de la quebrada Chaca-Vítor en las diferentes campañas. Fuente: elaboración propia.

7.5.5 Modelo Conceptual

La cuenca de la quebrada Chaca Vítor tiene una superficie de 2.769 km^2. Limita al norte con la cuenca del río San José, al sur con la cuenca del río Camarones, al este con la cuenca altiplánica del río Lauca y al oeste con el océano Pacífico. Esta cuenca presenta un gran desnivel, variando su altura entre los 5.050 msnm en los cerros de Anocarire hasta el nivel del mar en su desembocadura.

Los principales usos del suelo en la cuenca de la quebrada Chaca-Vítor son áreas sin vegetación (73%), praderas matorrales (25%) y terrenos agrícolas (2%), por lo tanto la evapotranspiración desde el suelo juega un papel importante como principal pérdida natural de la precipitación antes de llegar a la superficie.

Las mayores precipitaciones registradas en la cuenca se presentan en la parte alta y disminuyen con el gradiente altitudinal hacia la costa. La precipitación media anual en la cuenca, estimada a partir del método de las isoyetas es de 32 mm/año, siendo la cuenca de la quebrada Chaca-Vítor una de las cuencas de la región de Arica y Parinacota que menor precipitación recibe en el año.

El agua que precipita en la parte alta, escurre superficialmente por los cauces y una parte es retenida en depresiones. La porción de agua que logra infiltrarse es la que recarga al acuífero. De los cauces que conforman la red hidrográfica de la cuenca, el único que tiene escurrimiento permanente es la quebrada Vítor, cuya escorrentía superficial sólo se presenta en la zona alta y algo en la parte media, con un caudal medio anual de 130 l/s en la estación río Codpa en Cala-Cala. La razón radica en el hecho de que ésta quebrada tiene afluentes por encima de los 4.000 msnm. Sin embargo, la quebrada Vítor sólo fluye hasta la desembocadura durante un leve periodo del invierno altiplánico, ya que el resto del año se infiltra por completo antes de la localidad de Chaca.

Las precipitaciones que se producen principalmente durante el invierno altiplánico en la cabecera de la cuenca, recargan los acuíferos fracturados de los volcanes Margarita, Familiari y Anocarire del Mioceno Superior y Plioceno.

Las vertientes que existen en las cotas altas crean un cauce superficial que aguas abajo, en las localidades de Chitita, Guañacagua, el pueblo de Codpa y Ofragía son desviadas mediante un sistema de canales para un aprovechamiento agrícola. Aguas abajo de la localidad de Ofragía, las aguas superficiales de la quebrada Vítor se van infiltrando progresivamente en la unidad acuífera de mayor importancia hidrogeológica de la cuenca.

La unidad acuífera más importante corresponde a los depósitos aluviales y fluviales del Pleistoceno y del Holoceno. Estos depósitos son materiales detríticos no consolidados que se caracterizan por ser un medio con permeabilidad primaria y de carácter libre. Mediante pruebas de bombeo se estimó una transmisividad que varía entre 11 y 100 m^2/día, una conductividad hidráulica de 2,5 y 0,2 m/día y un coeficiente de almacenamiento de 10 al 30%. A nivel de cuenca, el flujo de agua subterránea es relativamente somero y tiene dirección local en cada una de las quebradas y finalmente, en el valle, una dirección este-oeste.

Las aguas de la cuenca de la quebrada Chaca–Vítor son alcalinas excepto en la cabecera de la cuenca que son aguas ácidas. Respecto a la conductividad eléctrica, las aguas superficiales son aguas dulces, generalmente con conductividad eléctrica inferior a 1.000 µS/cm en todos los puntos muestreados en el tiempo, sin embargo la conductividad registrada en las aguas subterráneas varía entre 1.000 y 7.000 µS/cm.

El amplio rango de conductividad eléctrica de las aguas subterráneas se deber a varios factores como: son aguas afectadas en diferente grado por intrusión marina, los pozos tienen diferentes profundidades y en cada pozo se explota un caudal y tiempo diferente.

La cuenca de la quebrada Chaca-Vítor se caracteriza por presentar generalmente aguas sulfatadas, pero el catión dominante varía, entre cálcico-sódicas y sódico-cálcicas. Destaca que las aguas que afloran en el nacimiento de la quebrada Achacagua, son neutros, frescas y bicarbonatadas magnésico-cálcicas, muy poco mineralizadas, correspondiendo a aguas meteóricas. Aguas abajo, las aguas son ácidas y sulfatadas cálcico-sódicas que proceden de los cerros Familiani y Margarita, lo cual refleja la alteración hidrotermal que existe en estos cerros. Del mismo modo que sucede en el otro lado de la divisoria de aguas que crean estos volcanes en la cuenca del río San José. En el sector de Chitita-Codpa, las aguas superficiales de la quebrada Vítor son sulfatadas cálcico-sódicas y de baja conductividad eléctrica (500-1.000 µS/cm)

En el sector bajo de la cuenca, desde Chaca hasta la caleta Vítor, las aguas subterráneas tomadas en los pozos son neutras y sulfatadas entre cálcico-sódicas y sódico-cálcicas y una conductividad eléctrica que asciende hasta alcanzar los máximos valores en los pozos ubicados aguas abajo de la carretera Panamericana, sin sufrir variación temporal durante el estudio. Las aguas subterráneas del sector Chaca-Vítor no contienen prácticamente metales más que hierro.

La calidad de las aguas superficiales y subterráneas de la cuenca de la quebrada Vítor indica que no son aptas para el consumo humano, excepto el pozo próximo a la Caleta Vítor y algunas muestras recogidas en la cabecera de la quebrada Achacagua.

En la Figura 7.204 se muestra el esquema del modelo conceptual de la cuenca quebrada Chaca-Vítor, cuyas entradas principales estarían dadas por las precipitaciones y recargas al acuífero. En ésta se muestra que la principal fuente de recarga para los acuíferos corresponde a la infiltración de la escorrentía superficial, producto de la precipitación generada en las partes altas de la cuenca y que son producto del invierno altiplánico, concentrándose en los meses de enero y febrero, y del aporte desde la quebrada Vítor al acuífero detrítico. Por otro lado, la principal descarga corresponde a extracciones artificiales, tales como canales de riego y pozos

de bombeo, a la evapotranspiración de las zonas de cultivo y praderas, y a la salida de agua subterránea de la cuenca hacia el Océano Pacífico.

Las demandas actuales del sistema superficial de la zona de Codpa, lo constituyen la red de canales para riego y para agua potable. Y del sector medio y bajo del sistema subterráneo de la zona de Chaca lo constituyen también el riego.

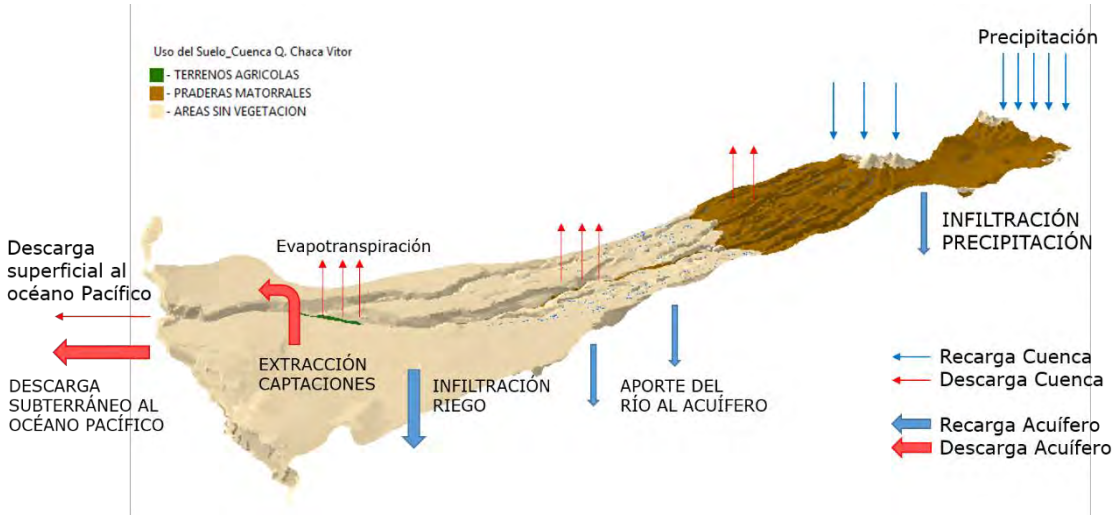


Figura 7.204 Esquema del modelo conceptual hidrogeológico de la cuenca de la quebrada Chaca-Vítor. Fuente: modificado de la capa uso del suelo tomada del portal web del SINIA http://ide.mma.gob.cl/.

7.6 Cuenca del Río Camarones

La cuenca del río Camarones drena una superficie que alcanza los 2.223 km^2. Limita por el norte con la cuenca de la quebrada Vítor, por el sur con la quebrada Tana o Camiña, hacia el este limita con la cuenca del Salar de Surire y por el oeste con el Océano Pacífico. El río Camarones nace a la altura de los 2.900 msnm de la confluencia entre los ríos Caritaya y Ajatama, a partir de allí el río Camarones escurre por un estrecho valle aluvial con un desarrollo de 95 km, en dirección suroeste, durante el recorrido recibe aportes intermitentes de las quebradas Saguara y Humallani. Finalmente, el río Camarones desemboca en el Océano Pacífico en el sector denominado Caleta Camarones. A poca distancia de finalizar el recorrido el río Camarones, existe un afluente temporal, la quebrada Chiza, que presenta escurrimiento sólo en época de lluvias estivales altiplánicas. Cabe mencionar que el ancho del valle aluvial varía entre los 25 y 700 m.

En la Figura 7.205 se presenta la ubicación de la cuenca del río Camarones y su red de drenaje.

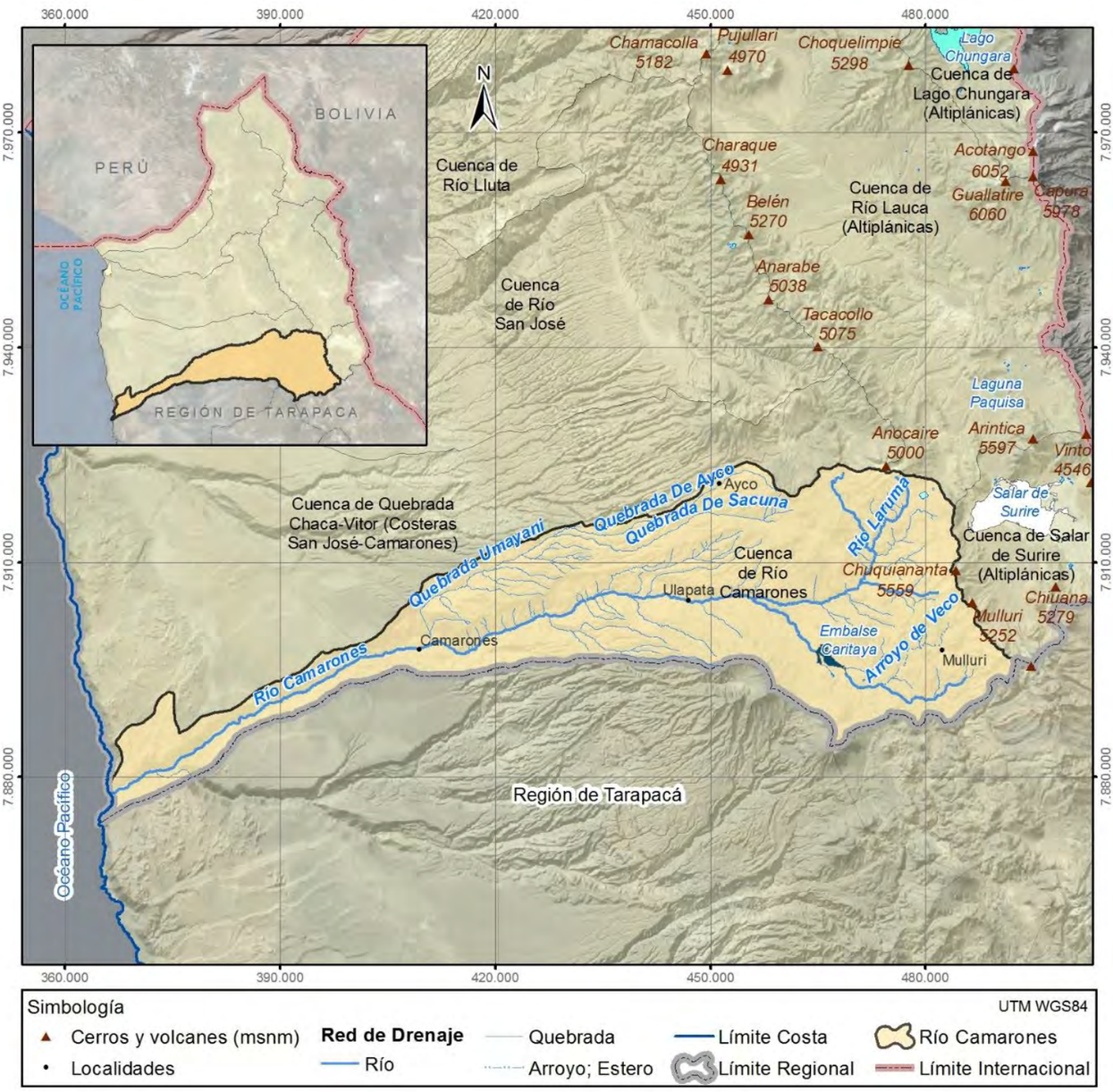


Figura 7.205 Ubicación de la cuenca del río Camarones. Fuente: elaboración propia.

7.6.1 Caracterización Hidrológica

7.6.1.1 Definición y caracterización de la cuenca del río Camarones

De acuerdo a Niemeyer (1980), el régimen de escurrimiento es permanente a lo largo del cauce, sin embargo, en sequías prolongadas suelen sumirse sus aguas en las arenas en la parte baja.

Como se indicó, los únicos afluentes importantes que recibe el río Camarones de forma permanente son los ríos Ajatama y Caritaya. El río Ajatama se forma de la unión entre el río Macusa y la quebrada Chacia, los cuales nacen en el cordón montañoso cordillerano y tiene un recorrido aproximadamente de 14 km hasta su junta con el río Caritaya. Por su parte, el río Caritaya nace aguas arriba de la confluencia del arroyo Veco y la quebrada Guaiguasi. En el tramo inferior del río Caritaya se ubica el Embalse Caritaya, en el sector donde anteriormente existía la Laguna Pareacota.

En la cabecera de la cuenca del Río Camarones, a una altura de 3.600 msnm y a unos 10 km aguas arriba de la confluencia del río Caritaya con el río Ajatama, se localiza el embalse Caritaya, el cual fue construido tras la Crisis del Salitre, entre los años 1931 y 1935.

Durante el año 2009, el embalse Caritaya fue sometido a un complejo plan de reparación encargado por la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH), para recuperar su capacidad de acumulación de agua. Esta obra hidráulica permite garantizar una seguridad de riego al valle de Camarones y a su vez colabora en la regulación de las crecidas generadas en los veranos, producto del fenómeno climático denominado "invierno altiplánico".

DELIMITACIÓN DE LA CUENCA

En la Figura 7.205 se muestra la delimitación y red de drenaje de la cuenca del río Camarones. El criterio utilizado para la delimitación se explicó en el apartado "Definición y Caracterización de las Cuencas de la Región" en el capítulo de "Análisis Regional". De manera resumida el criterio es básicamente topográfico.

CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS DE LA CUENCA

La morfología de la cuenca del río Camarones es un referente para establecer la dinámica esperada de la escorrentía superficial y se caracteriza por el análisis de tres parámetros, los relativos a la forma, al relieve y a la red de drenaje. Éstos se calcularon con el uso de SIG, además de utilizar expresiones matemáticas para este fin. La metodología se muestra en detalle en el Anexo VI.

En relación a la forma, la cuenca tiene un coeficiente de compacidad (K_G) de 2,08, por tanto su forma es rectangular. De acuerdo a Con Potencial Consultores Spa (2016), el río Camarones tiene una pendiente promedio de 3% entre la costa y el Embalse Caritaya.

La densidad del drenaje de la cuenca del río Camarones definida como la longitud total de los cauces sobre el área de la cuenca, es en este caso de 0,25 km/km^2 que corresponde a una densidad de drenaje pobre, normalmente asociada a cuencas con materiales del suelo resistentes a la erosión, muy permeables y de baja pendiente.

Es necesario destacar que este parámetro representa la densidad de drenaje promedio en la cuenca, lo cual no excluye que existan cauces o quebradas al interior de la cuenca que dispongan de un drenaje muy desarrollado y por tanto, ocurra una respuesta rápida de transformación lluvia-escorrentía.

Para construir la curva hipsométrica de la cuenca fue necesario reclasificar las bandas del DEM y calcular las áreas acumuladas intermedias. Según la curva hipsométrica (Figura 7.206), la cuenca tiene un topografía variable iniciando desde la cota mínima de 0 msnm hasta la máxima de 5.579 msnm. Sin embargo, el 50% de la cuenca tiene una altura superior a 3.487 msnm.

De acuerdo a la metodología presentada en el Anexo VI, esta curva hipsométrica se clasifica de tipo B y corresponde a una cuenca en equilibrio que está en la fase de madurez.

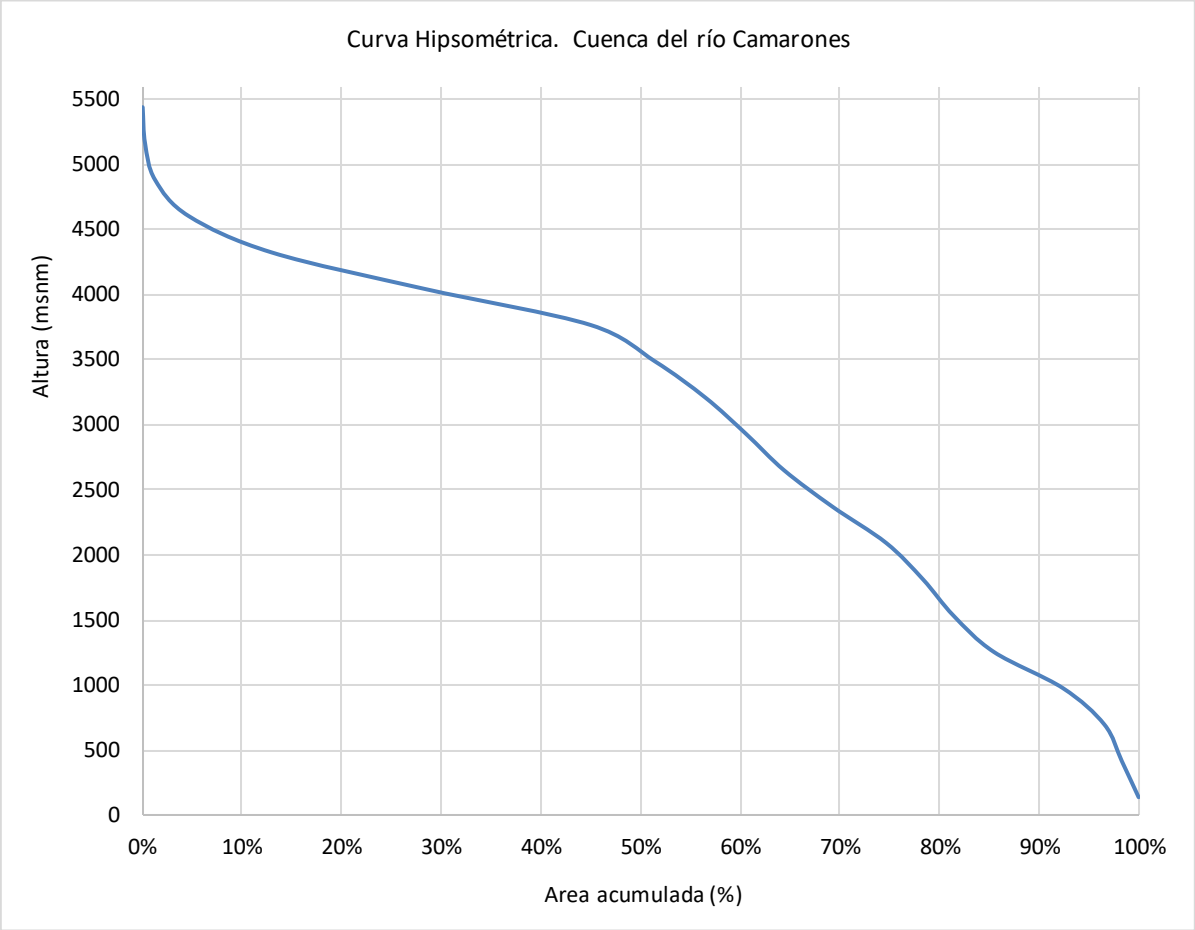


Figura 7.206 Curva hipsométrica de la cuenca del río Camarones. Fuente: elaboración propia.

7.6.1.2 Caracterización de la red de drenaje

Para el presente estudio se adoptó el diagrama unifilar del río Camarones del estudio "Diagnóstico de disponibilidad hídrica en la cuenca del río Camarones" liderado por Con Potencial Consultores SPA (2016). Se considera que el estudio en referencia es reciente y no han ocurrido cambios significativos en la cuenca. El diagrama Unifilar del río Camarones se indica en la Figura 7.207, en este se incluye los canales, los ríos y las quebradas aportantes.

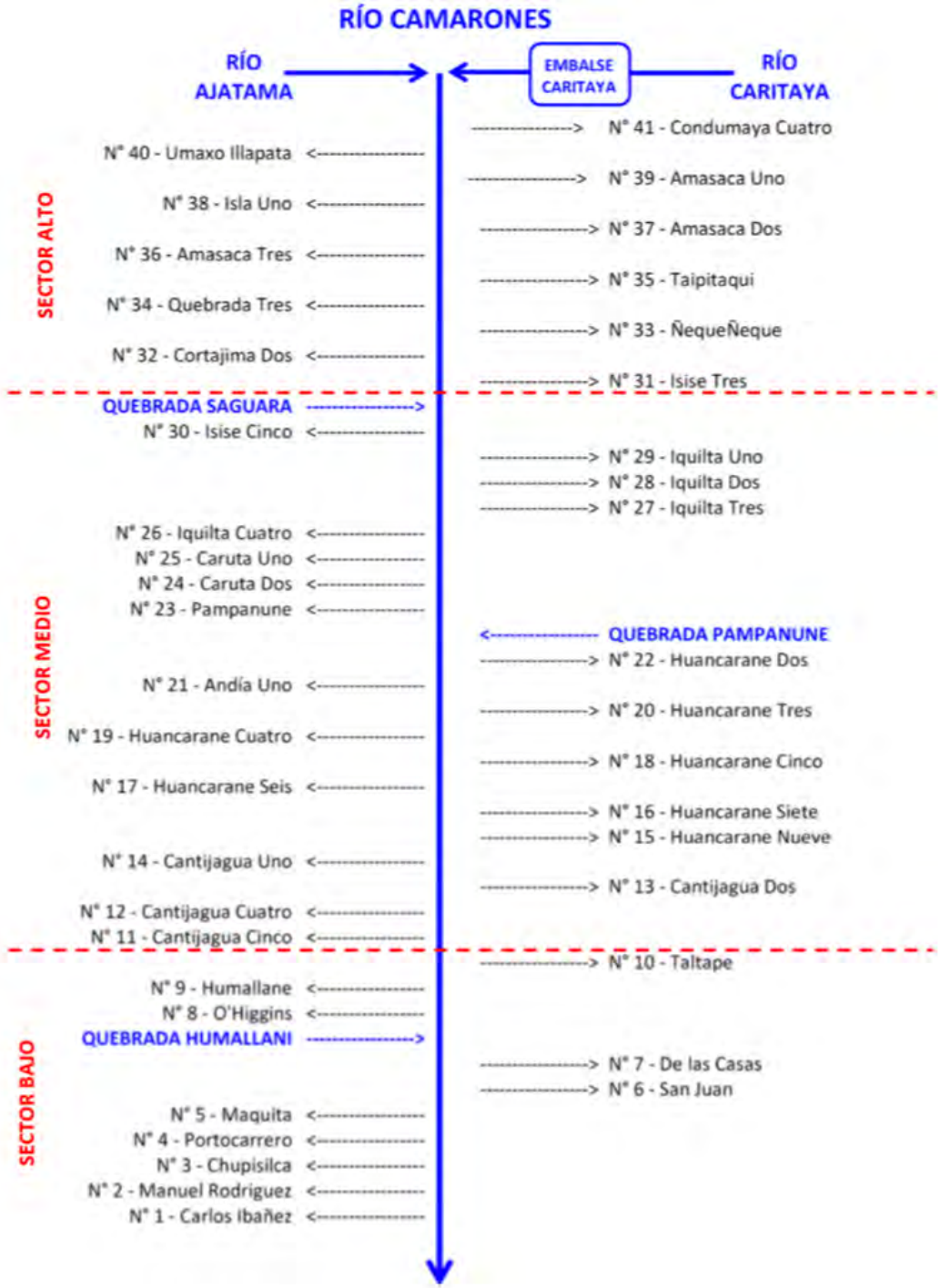


Figura 7.207 Diagrama unifilar del río Camarones. Fuente: Con Potencial Consultores Spa (2016).

7.6.1.3 Hidrometeorología

La cuenca del río Camarones cuenta con una red de monitoreo administrada por la DGA de 4 estaciones meteorológicas (Caritaya Embalse, Cuya, Esquiña y Río

Camarones en Chilpe), dos de ellas están activas (Esquiña y Río Camarones en Chilpe). Sin embargo, a pesar de tener categoría de meteorológicas sólo cuentan con información pluviométrica. La localización y periodos de información disponibles de las estaciones se presentan en la Tabla 7.118.

En adelante el análisis de las variables hidrometeorológicas de la cuenca se realiza a nivel regional, con la finalidad de incluir un mayor número de estaciones localizadas en cuencas con características hidrológicamente similares.

Tabla 7.118 Coordenadas y periodo de información de las estaciones meteorológicas en la cuenca del río Camarones. Fuente: elaboración propia.

Estación Meteorológica DGA	Código BNA	UTM Este	UTM Norte	Altitud	Periodo	Años	Estado
Esquiña	01502007-5	443.905	7.905.542	2.170	1975-2014	40	V
Río Camarones En Chilpe	01502008-3	434.751	7.905.359	1.565	2006-2014	9	V
Caritaya Embalse	01501001-0	464.629	7.896.403	3.600	1932-1965	34	S
Cuya	01502006-7	381.463	7.886.435	200	1965-1979	15	S

V: Vigente, S: suspendida.

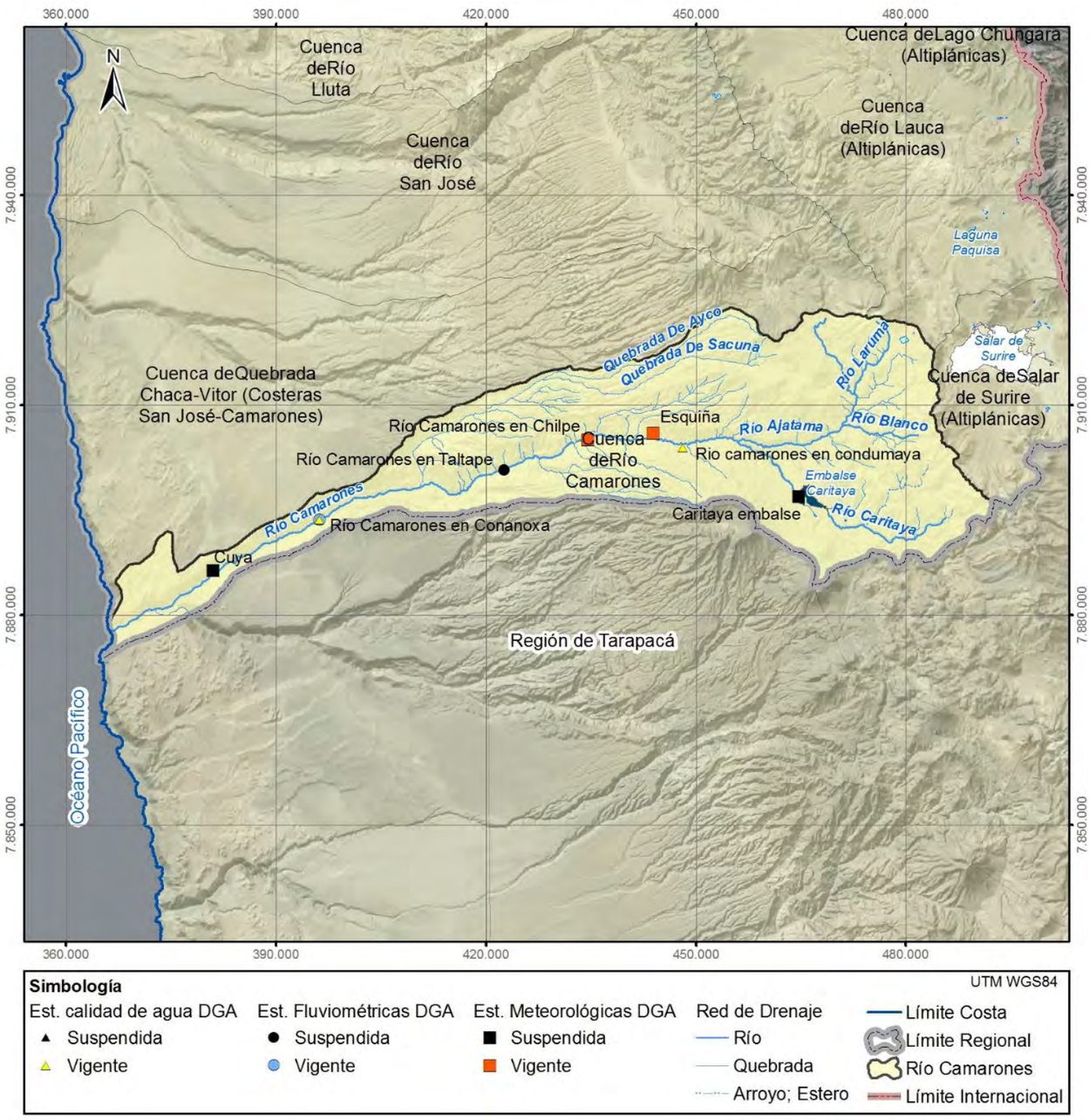


Figura 7.208 Ubicación estaciones de calidad, fluviométricas y meteorológicas en la cuenca del río Camarones. Fuente: elaboración propia.

PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL Y MEDIA MENSUAL

A nivel regional se trazaron las isoyetas de precipitación media anual, construidas a partir de los datos registrados en 28 estaciones meteorológicas, 24 de ellas ubicadas en la XV Región de Arica y Parinacota y las 4 restantes en la I Región de Tarapacá. La información utilizada de las estaciones fue previamente completada y analizada, como se explicó en el subcapítulo "Análisis de las variables espacial y temporal" del capítulo "Análisis Regional".

De esta manera, haciendo un zoom en la cuenca del río Camarones, las isoyetas de precipitación se presentan en la Figura 7.209. Se observa que la precipitación media anual en la cuenca del río Camarones aumenta gradualmente desde 0 mm/año en el sector bajo (< 1.000 msnm), hasta 250 mm/año en el sector más alto (> 4.000 msnm). A la altura de la estación Esquiña (2.170 msnm) se registra una precipitación media anual de 50 mm/año. En la Tabla 7.119 se especifica la precipitación ponderada de acuerdo al área de influencia entre isoyetas, obteniendo que la precipitación media anual en la cuenca es del orden de los 121 mm.

Tabla 7.119 Ponderación de la precipitación según área de influencia entre isoyetas en la cuenca del río Camarones. Fuente: elaboración propia.

Isoyetas de Precipitación (mm)		Área entre isoyetas (km^2)	Precipitación media multianual 1985-2014 (mm)
0		360,2	0
0	10	305,1	1.525
10	20	60,3	905
20	50	173,0	6.056
50	100	118,2	8.867
100	150	146,8	18.353
150	200	218,7	38.278
200	250	609,6	137.160
> 250		231,0	57.745
			121,0 Precipitación media anual en la cuenca

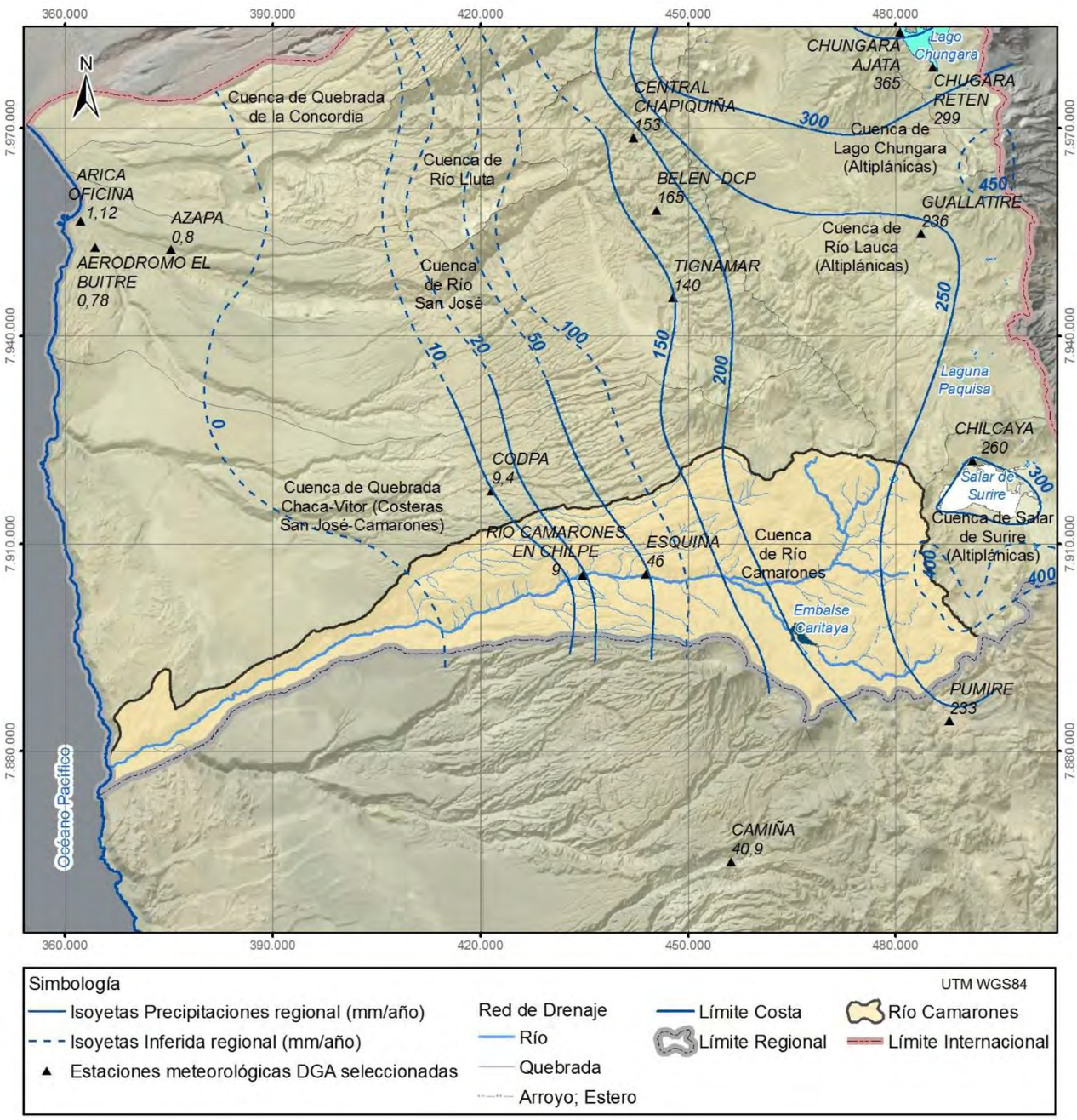


Figura 7.209 Isoyetas de precipitación media anual regional en la cuenca del río Camarones. Fuente: elaboración propia.

En la Tabla 7.120 se agrupa en dos periodos la precipitación media anual reportada en las estaciones con mayor influencia sobre la cuenca del río Camarones. Un periodo lluvioso de diciembre a marzo en donde se presenta mayor al 90% de la precipitación anual y un periodo seco de abril a noviembre donde ocurren precipitaciones menores.

Como se ha mencionado en apartados anteriores, en la región de Arica y Parinacota las precipitaciones se concentran en la temporada estival producto del llamado "invierno altiplánico".

Tabla 7.120 Precipitación media anual en las estaciones seleccionadas de la XV Región y I Región. Fuente: elaboración propia.

Estación pluviométrica DGA	PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL PERIODO 1985-2014				
	DIC-MAR		ABR-NOV		TOTAL
	Pp [mm]	Pp [%]	Pp [mm]	Pp [%]	Pp [mm]
Codpa	8,7	93%	0,7	7%	9,4
Esquiña	43,1	94%	2,8	6%	45,9
Rio Camarones En Chilpe	9,1	90%	0,9	10%	9,1
Chilcaya	239	92%	20	8%	260
Pumire *	215	92%	19	8%	233,4
Camiña *	37	90%	4	10%	40,9

* Estación ubicada en la I Región de Tarapacá utilizada para el análisis.

Mediante el análisis de las precipitaciones medias mensuales se determinó la estacionalidad existente en la región y por consiguiente su influencia en la cuenca del río Camarones. En la Tabla 7.121 se muestran las precipitaciones medias mensuales de 6 estaciones pluviométricas seleccionadas como influyentes en la cuenca. Las precipitaciones medias mensuales se calcularon considerando el promedio de precipitaciones para cada mes incluyendo sólo los meses que contaran con más de 20 días con registros.

Los meses más húmedos del año corresponden a diciembre, enero, febrero y marzo, en los demás meses del año las precipitaciones son esporádicas o nulas. En altitud menor a los 1.500 msnm, las precipitaciones medias mensuales son mínimas (0 a 5 mm/mes).

Sin embargo, la cuenca del río Camarones al igual que en la XV región tiene fuerte influencia tropical, por lo tanto las lluvias con mayor intensidad ocurren en los meses de verano (Enero a Marzo).

Tabla 7.121 Precipitación media mensual en la cuenca del río Camarones. Fuente: elaboración propia.

Estación pluviométrica DGA	Altitud [msnm]	Precipitación media mensual [mm] periodo 1985-2014												
		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Pp ACUM
Codpa	1.870	3,6	3,7	1,2	0,0	0,0	0,0	0,2	0,4	0,0	0,0	0,0	0,3	9,4
Esquiña	2.170	12	20	9,0	0,7	0,0	0,0	0,7	1,1	0,3	0,0	0,0	2,0	46
Río Camarones En Chilpe	1.565	2,8	4,3	0,6	0,1	0,0	0,0	0,4	0,3	0,2	0,0	0,0	0,4	9,1
Chilcaya	4.270	90	70	49,3	11,1	1,1	0,4	2,1	0,9	0,3	0,6	3,7	30	260
Pumire *	4.150	75	88	33	6	1	1	1	2	5	1	2	18	233
Camiña *	2.500	10	19	7	1,6	0	0,3	1,6	0,5	0	0,1	0	0,8	41

* Estación ubicada en la I Región de Tarapacá utilizada para el análisis.

EVAPORACIÓN MEDIA ANUAL Y MEDIA MENSUAL

La evaporación media anual y media mensual en la cuenca del río Camarones, se analizó a escala regional, dada la poca información existente y la nula presencia de estaciones meteorológicas. Para ello se contó con registros de evaporación del tanque tipo A en 7 estaciones de la XV Región de Arica y Parinacota y la I Región de Tarapacá. Estas estaciones fueron igualmente consideradas en el estudio de Geohidrología (2014). En la Tabla 7.122 se presenta las coordenadas y periodos de información.

Tabla 7.122 Coordenadas y periodo de información de las estaciones meteorológicas en la cuenca del río Camarones. Fuente: elaboración propia.

Estación Meteorológica DGA	Código BNA	DATUM WGS84 H19S		Altitud	Periodo	Años	Estado
		UTM Este	UTM Norte				
Pacollo	01202009-0	446.149	7.990.138	4.185	1984-1993	9	S
Cotacotani	01020014-8	475.382	7.989.459	4.550	1960-1989	29	S
Putre	01202010-4	440.754	7.987.689	3.545	1982-2009	27	V
Parinacota Ex Endesa	01020017-2	471.626	7.987.205	4.420	1985-1997	12	S
Chungara Ajata	01010010-0	480.618	7.983.774	4.585	1984-2011	27	V
Codpa	01410012-1	421.626	7.917.572	1.870	1980-2014	34	V
Coyacagua *	01050007-9	520.130	7.782.608	4.013	1964-2012	48	S

V: Vigente, S: suspendida. * Estación ubicada en la I Región de Tarapacá.

En la Tabla 7.123 se presenta los valores de la evaporación media mensual y promedio anual. A escala regional se estima una evaporación potencial media anual de 5,4 mm/d, con un rango entre 4,3 mm/d y 6,4 mm/d. como se observa en la Figura 7.210, la mayor tasa de evaporación se presenta en los meses de octubre, noviembre y diciembre, y la menor evaporación en los meses de mayo, junio y julio.

Tabla 7.123 Evaporación media mensual neta en estaciones seleccionadas. Fuente: modificado de Geohidrología (2014).

Estación Meteorológica DGA	TASA DE EVAPORACIÓN MEDIA MENSUAL [mm]												
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
PACOLLO	130	129	121	120	127	87	102	118	147	161	180	180	1.602
COTACOTANI	174	157	223	165	183	171	192	198	219	220	204	226	2.333
PUTRE	136	115	130	159	164	147	155	171	189	220	222	189	1.997
PARINACOTA	164	140	161	180	171	159	164	180	183	202	198	205	2.106
CHUNGARA AJATA	143	132	133	138	130	120	121	146	150	180	174	158	1.724
CODPA	118	115	130	138	127	117	109	121	141	158	162	149	1.584
COYACAGUA *	143	112	140	165	174	162	167	158	162	202	201	180	1.965

* Estación ubicada en la I Región de Tarapacá.

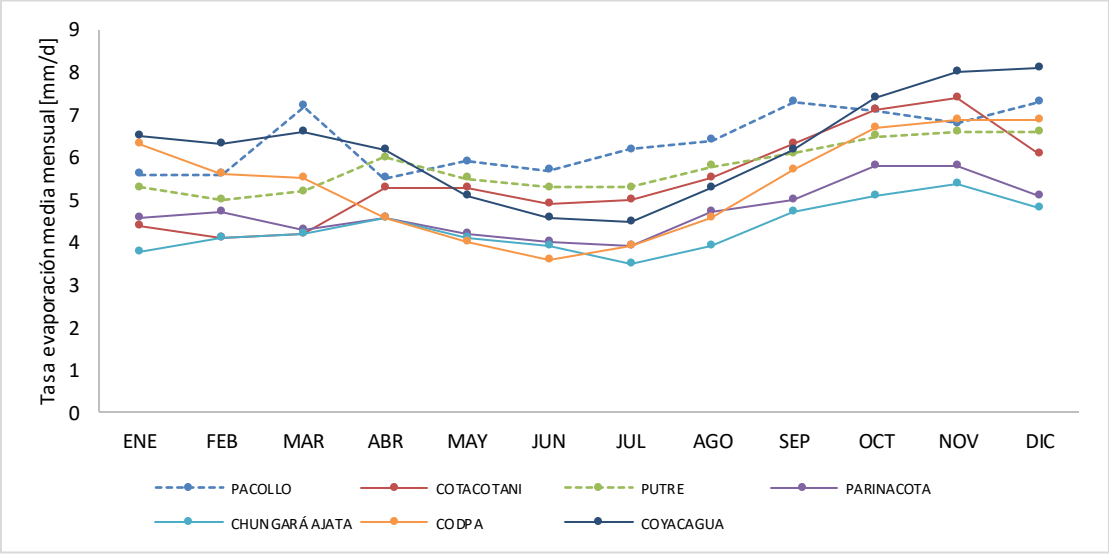


Figura 7.210 Tasa de evaporación media mensual estimada en la cuenca del río Camarones. Fuente: elaboración propia.

Adicionalmente, a partir de la información disponible en el producto satelital MODIS 16, y siguiendo la metodología detallada en el Anexo VI, se estimó la evapotranspiración de la cuenca. MODIS 16 incluye información de evapotranspiración y flujo de calor latente real, estimado a partir de información satelital remota y utilizando como método de cálculo, para el caso de la evapotranspiración, la ecuación de Penman-Monteith. El valor medio anual estimado para la cuenca, considerando datos entre 2000 y 2014 es de 105,3 [mm/año].

7.6.1.4 Fluviometría

En la cuenca del río Camarones, la DGA cuenta con 2 estaciones fluviométricas (Est. Río Camarones en Conanoxa y Est. Río Camarones en Chilpe). La localización y periodos de información disponibles de las estaciones se presentan en la Tabla 7.124. Respecto a la estación Río Camarones en Chilpe, ésta posee registro de bajo peso estadístico (sólo cuatro años completos).

Tabla 7.124 Coordenadas y periodo de información de las estaciones fluviométricas en la cuenca del río Camarones. Fuente: elaboración propia.

Estación Fluviométrica DGA	Código BNA	DATUM WGS84 H19S		Altitud [msnm]	Periodo	Años	Estado
		UTM Este	UTM Norte				
Río Camarones en Conanoxa	01502002-4	396.440	7.893.965	710	1968-2014	46	V
Río Camarones en Chilpe	01502008-3	434.751	7.905.359	1.565	2005-2014	9	V

V: Vigente.

De acuerdo a lo presentado en el informe de la Universidad de Tarapacá (2009), las fuertes lluvias que caen durante la temporada de verano provocan violentas crecidas, lo que significa que en la estación Río Camarones en Conanoxa escurre el 50% del volumen anual en los meses de Enero a Abril, repartiéndose en forma pareja el resto del caudal en el año. Esto se debe a que el área que recibe las mayores precipitaciones (cuenca alta) posee un efecto de regulación originado en los siguientes factores:

a. En la zona más alta de la cuenca, que posee clima de hielo por efecto de altura, se produce una fusión lenta y distribuida a lo largo del año.
b. La cuenca, en general está caracterizada por suelos de textura gruesa y con pendiente medias a bajas, por lo que se constituye en un sector favorable a la infiltración. Se produce así una regulación del agua que pasa por el valle, que se caracteriza por un flujo más o menos plano, sin acusar la fuerte variabilidad de las cuencas más bajas.

CAUDAL MEDIO ANUAL Y MEDIO MENSUAL

El caudal medio anual en el río Camarones registrado en la estación Río Camarones en Conanoxa analizado para el periodo del año 1985 al 2014 es de 0,56 m^3/s. De acuerdo al estudio de Ayala & Cabrera (2003), el caudal medio mensual en el río Camarones en Conanoxa para un periodo de excedencia del 50% es de 0,4 m^3/s. En la Tabla 7.125 se

presenta el caudal mínimo, máximo y la desviación estándar de la serie de datos analizada, en relación al registro de cada estación fluviométrica.

Tabla 7.125 Caudal medio anual para el año hidrológico en la cuenca del río Camarones. Fuente: elaboración propia.

Estación Fluviométrica	Altitud [msnm]	Periodo		CAUDAL MEDIO ANUAL [m^3/s]			
		1985-2014	otro [años]	Min	Max	Prom	Desv est
Río Camarones En Conanoxa	710		24	0,09	1,57	0,56	0,36
Río Camarones En Chilpe	1.565		5	0,51	1,63	1,12	0,46

De acuerdo al análisis de la variación temporal a nivel mensual de los escurrimientos, ver Tabla 7.126, durante los meses de enero a marzo se registran los caudales medios más altos del año hidrológico, estos caudales superan la media anual. Presentándose caudales sobre el río Camarones en Conanoxa en el mes de marzo del orden de los 1,30 m^3/s.

Tabla 7.126 Caudal medio mensual en la cuenca del río Camarones. Fuente: elaboración propia.

Estación Fluviométrica	CAUDAL MEDIO MENSUAL [m^3/s]												
	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	PROM
Río Camarones en Conanoxa	0,25	0,24	0,33	0,91	1,12	1,30	0,47	0,49	0,52	0,47	0,36	0,27	0,56
Río Camarones en Chilpe	1,02	1,10	1,06	1,94	1,92	1,58	0,92	0,84	0,74	0,84	0,76	0,74	1,12

Adicionalmente a la información reportada por las estaciones fluviométricas de la DGA, en la cuenca del río Camarones existen dos puntos de interés que corresponden a los caudales afluentes al embalse Caritaya y a los caudales de la quebrada Ajatama ante de la confluencia con el río Caritaya. Las series de caudales medios mensuales se obtuvieron del estudio IPLA-DR (1991), referenciadas en el documento "Estudios básicos de los recursos hídricos Valle Lluta, Azapa, Vítor y Camarones. Volumen 1" presentado por AC Ingenieros Consultores Ltda. (2002). Dicha información se presenta en la Tabla 7.127.

Comparando los caudales medios mensuales de las Tabla 7.126 y Tabla 7.127, se puede apreciar que los mayores caudales en la cuenca se producen entre los meses de enero y marzo, y que el estiaje ocurre típicamente en octubre y noviembre. Ello se debe al efecto que sobre el régimen pluviométrico de la zona tiene el invierno altiplánico.

Tabla 7.127 Caudales medios mensuales en los puntos de interés de la cuenca del río Camarones sin control fluviométrico. Fuente: AC Ingenieros Consultores Ltda. (2002).

PUNTO DE INTERÉS	CAUDALES MEDIOS MENSUALES [m^3/s]												
	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	ANUAL
Quebrada Ajatama antes de Confluencia	0,28	0,25	0,31	0,74	0,96	0,60	0,36	0,33	0,42	0,35	0,34	0,44	0,45
Rio Caritaya en Caritaya	0,22	0,19	0,24	0,54	0,74	0,45	0,27	0,25	0,32	0,26	0,25	0,33	0,34

ANÁLISIS DE FRECUENCIA DE LOS CAUDALES

Mediante el análisis de frecuencia de las series de caudales mensuales se determinó si los años secos y los años lluviosos mantienen el mismo comportamiento que el año hidrológico medio. En el Anexo VI se detalla la metodología. Para ello se graficaron curvas de variación estacional definidas para distintas probabilidades de excedencia.

En la Tabla 7.128 y Figura 7.211, se presentan los caudales mensuales para las probabilidades de excedencia de 15% (año muy húmedo), 25% (año húmedo) y 85% (año muy seco) para cada estación y punto interés, así como el caudal medio asociado al mes. Allí se observa la distribución típica de los valores estadísticos representativos de la disponibilidad del recurso en la cuenca del río Camarones.

Tabla 7.128 Caudales mensuales asociados a probabilidad de excedencia. Fuente: elaboración propia.

Estación: RIO CAMARONES EN CONANOXA													
Pexc [%]	T [años]	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep
15	6,7	0,50	0,40	0,60	2,00	2,30	1,80	0,80	0,90	1,00	0,70	0,60	0,50
85	1,2	0,10	0,00	0,00	0,10	0,00	0,20	0,10	0,20	0,20	0,30	0,20	0,10
Promedio		0,25	0,24	0,33	0,91	1,12	1,30	0,47	0,49	0,52	0,47	0,36	0,27
Punto de Interés: QUEBRADA AJATAMA ANTES DE CONFLUENCIA (*)													
Pexc [%]	T [años]	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep
25	4,0	0,33	0,30	0,38	0,90	1,12	0,72	0,42	0,39	0,49	0,41	0,40	0,51
85	1,2	0,19	0,16	0,19	0,23	0,26	0,27	0,24	0,22	0,23	0,24	0,23	0,19
Promedio		0,28	0,25	0,31	0,74	0,96	0,6	0,36	0,33	0,42	0,35	0,34	0,44
Punto de Interés: RIO CARITAYA EN CARITAYA (*)													
Pexc [%]	T [años]	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep
25	4,0	0,25	0,23	0,29	0,66	0,87	0,54	0,32	0,29	0,37	0,31	0,29	0,38
85	1,2	0,15	0,12	0,15	0,15	0,21	0,20	0,18	0,17	0,17	0,18	0,17	0,15
Promedio		0,22	0,19	0,24	0,54	0,74	0,45	0,27	0,25	0,32	0,26	0,25	0,33

* Los valores tomados de AC Ingenieros Consultores (2002)

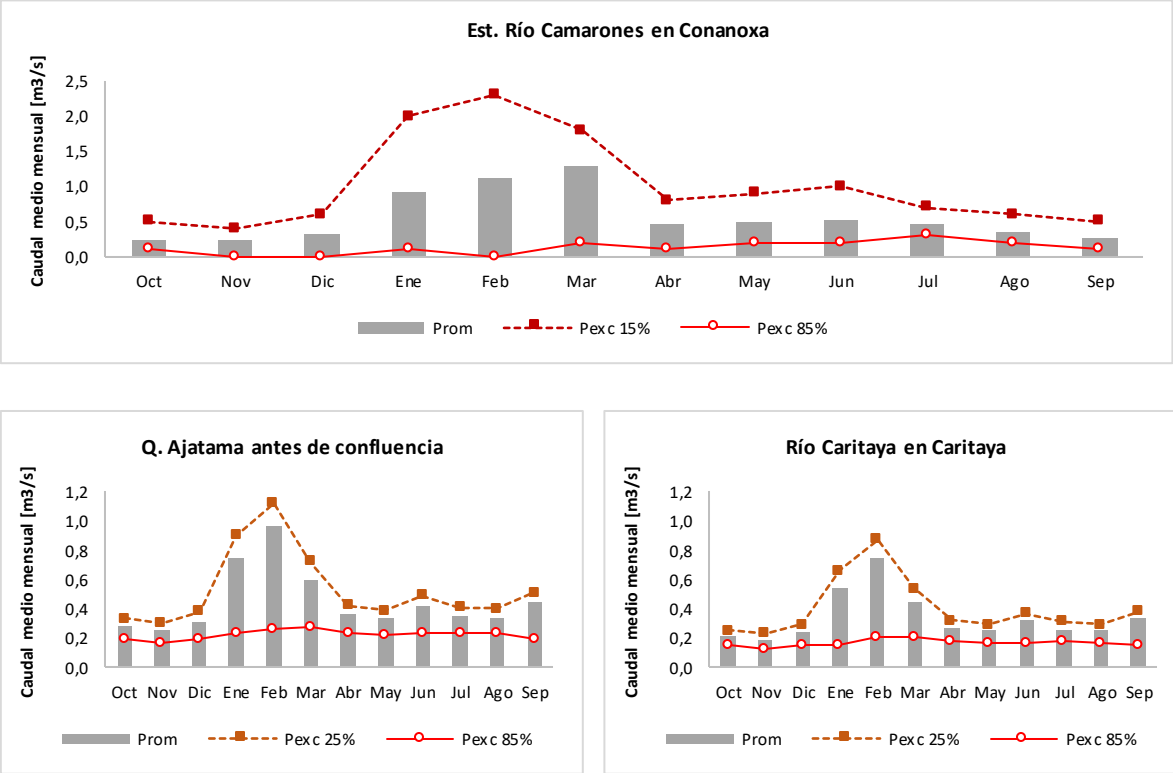


Figura 7.211 Curvas de variación estacional asociadas a probabilidad de excedencia de 15%, 25% y 85% y caudal medio mensual en las estaciones fluviométricas y puntos de interés de la cuenca del río Camarones. Fuente: elaboración propia.

En los gráficos se observa que para un año seco (Pexc 85%), el caudal mensual se mantiene en general constante o con variación mínima, siendo éste del orden de 0,2 m^3/s en el río Caritaya y quebrada Ajatama, y de 0 a 0,3 m^3/s en el río Camarones. Contrario ocurre al considerar un año húmedo (Pexc 15 y 25%), en donde la fluctuación del caudal varía mes a mes, similar al comportamiento del valor medio.

7.6.1.5 Levantamiento Hidrológico

En el presente estudio se realizó una campaña de terreno, en donde se seleccionaron 8 puntos de medición tanto en tributarios como sobre el río Camarones. Adicionalmente, se adoptan las cuatro campañas de aforos realizadas por Con Potencial Consultores Spa (2016), en tres campañas se realizaron 11 aforos cada una y en la última campaña fueron 10 aforos. Los métodos de aforo utilizados fueron el molinete y de forma manual. Por otra parte, existen registros históricos de aforos, los cuales se

tuvieron en cuenta para caracterizar de mejor forma la hidrología de la cuenca en corrientes sin control fluviométrico.

En la Tabla 7.129 se especifican las coordenadas de los puntos aforados tanto históricos como recientes y en las Figura 7.212, Figura 7.213 y Figura 7.214 se muestra su localización en la cuenca. Los resultados de las campañas hidrométricas de los puntos aforados, se presentan en las Tabla 7.130 y Tabla 7.131.

Tabla 7.129 Coordenadas de los puntos aforados en la cuenca del río Camarones. Fuente: elaboración propia.

Sitio de Aforo	ID	DATUM WGS84 H19S		Año	Estudio de referencia
		UTM Este	UTM Norte		
R. Caritaya antes de lagunas Amuyo	1078	473.767	7.893.277	2009	Universidad de Tarapacá (2010)
R. Caritaya después de lagunas Amuyo	1084	473.579	7.893.105		
Challamanta entrada a embalse Caritaya	1080	569.560	7.894.336		
R. Caritaya entrada a embalse Caritaya	1076	466.327	7.897.494		
Q. Macuza	1045	471.870	7.914.280		
estero Parcohaylla antes junta con Q. Anocarire	1053	473.251	7.911.419		
Q. Anocarire antes junta Q. Macusa	1052	472.770	7.912.026		
Q. Anocarire después junta Q. Macusa	1049	472.702	7.912.141		
Q. Taruquire	1058	473.349	7.909.310		
R. Blanco	1060	472.447	7.907.388		
R. Ajatama en Chaya	1062	468.929	7.906.306		
R. Ajatama	1042	465.663	7.904.699		
R. Caritaya salida embalse Caritaya	1040	464.574	7.898.011		
R. Camarones en Condumaya	1035	448.501	7.904.873		
R. Camarones después de Illapata	1037	446.223	7.905.188		
R. Camarones después de Esquiña	1039	444.154	7.905.925		
R. Camarones en Huancarane	1025	419.099	7.900.182		
R. Camarones en Taltape	1027	413.851	7.898.794		
R. Camarones	1029	409.792	7.898.415		
R. Camarones frente a parcela 16	1031	408.067	7.898.395		
R. Camarones en Conanoxa	1033	396.430	7.893.952		
R. Camarones frente a planta de tratamiento	1023	377.949	7.883.694		
R. Camarones después de puente	1021	375.467	7.881.778		
R. Camarones frente a km 8.9	1019	370.994	7.880.448		
R. Camarones frente a km 5.4	1017	368.282	7.878.623		
R. Camarones en desembocadura	1015	366.386	7.878.518		

Sitio de Aforo	ID	DATUM WGS84 H19S		Año	Estudio de referencia
		UTM Este	UTM Norte		
R. Caritaya antes de confluencia con Q. Asintoveco	AF-1	468.788	7.895.133	2014	GeoHidrología (2014)
R. Caritaya después de Q. Asintoveco	AF-2	468.933	7.894.390		
R. Caritaya cerca lagunas de Amuyo	AF-3	471.033	7.892.484		
R. Caritaya	AF-4	470.496	7.892.667		
R. Caritaya	AF-5	469.553	7.893.640		
Arroyo Veco antes de confluencia con R. Caritaya	AF-6	473.925	7.893.023		
R. Caritaya antes de confluencia con arroyo Veco	AF-7	473.864	7.892.955		
R. Caritaya después de confluencia con arroyo Veco	AF-8	473.643	7.892.953		
R. Caritaya	AF-9	472.454	7.892.592		
R. Caritaya después de Lagunas de Amuyo	AF-10	472.978	7.892.681		
cabecera arroyo Mulliri	AF-11	482.450	7.897.538		
cabecera arroyo Veco	AF-12	482.212	7.898.886		
tributario de R. Caritaya después de Lagunas de Amuyo	AF-13	472.804	7.892.557		
tributario antes de confluencia con R. Caritaya	AF-14	470.551	7.892.341		
punto aguas abajo del embalse Caritaya	AF-15	464.323	7.897.679		
Ajatama	CP-1	468.772	7.905.966	2015	CON POTENCIAL (2016)
Caritaya Aguas arriba Embalse	CP-2	469.354	7.894.001		
Tributario Caritaya	CP-3	468.950	7.895.268		
Caritaya aguas abajo Embalse	CP-4	463.806	7.898.109		
Condumaya	CP-5	448.279	7.904.491		
Chilpe	CP-6	434.793	7.905.388		
Pampa Nune	CP-7	426.928	7.902.708		
Taltape	CP-8	415.997	7.897.420		
Puente Camarones	CP-9	409.682	7.898.094		
Conanoxa	CP-10	396.269	7.893.584		
Camarones en Ruta 5	CP-11	375.239	7.881.361		
-	CAAS-131	472.711	7.912.799	2016	ICASS (2016)
-	CAAS-132	471.653	7.913.929		
-	CAAS-144	415.977	7.897.420		
Estación de aforo en Chilpe	CAAS-151	435.026	7.905.491		
río Camarones a 15 m aguas debajo de puente	CAAS-153	375.237	7.881.352		
-	CAAS-154	474.645	7.893.415		
río Caritaya, aguas arriba de Laguna Amuyo	CAAS-155	473.884	7.892.852		
-	CAAS-156	469.286	7.894.079		

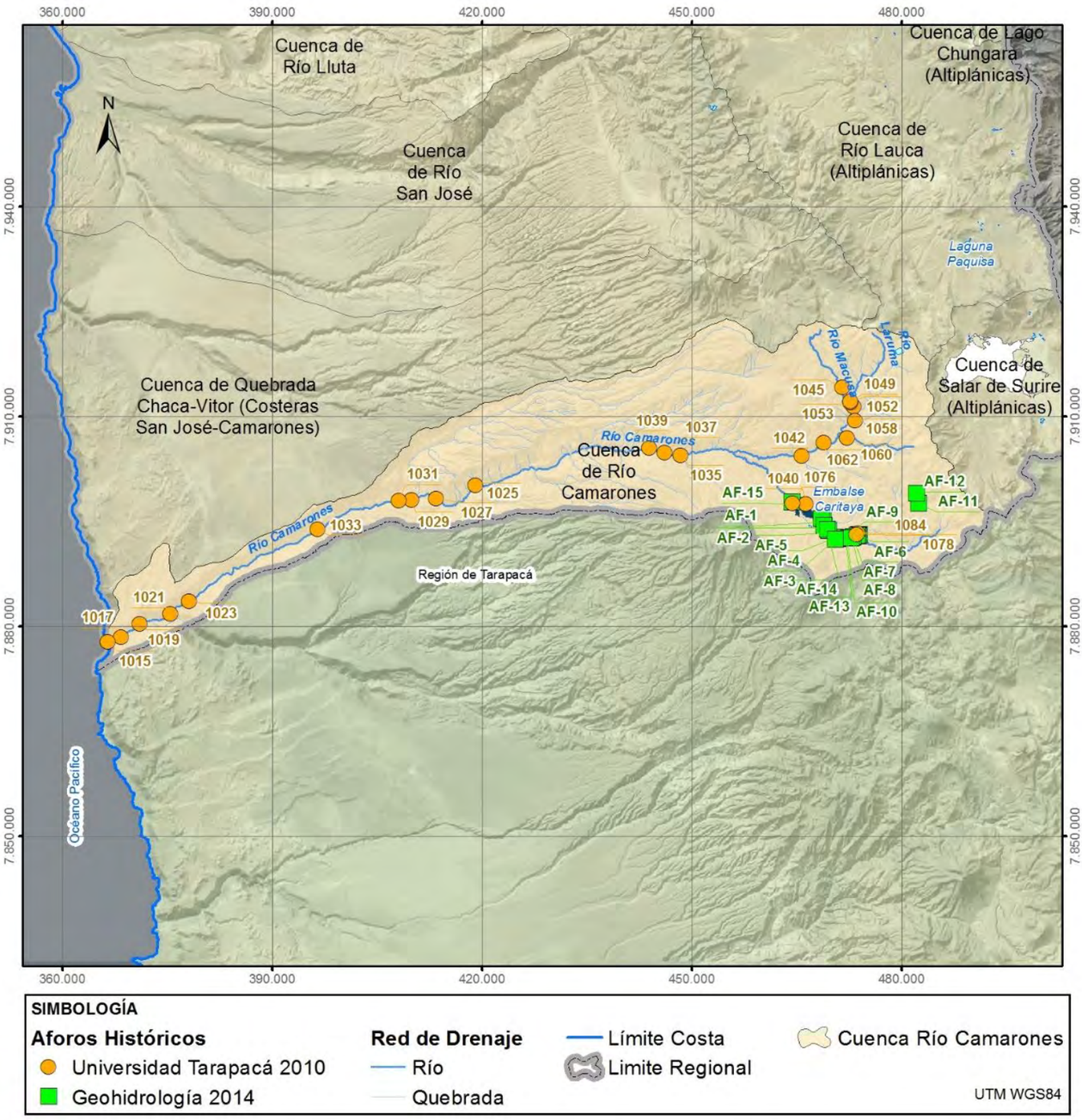


Figura 7.212 Localización de los aforos históricos encontrados en la cuenca del río Camarones. Fuente: elaboración propia.

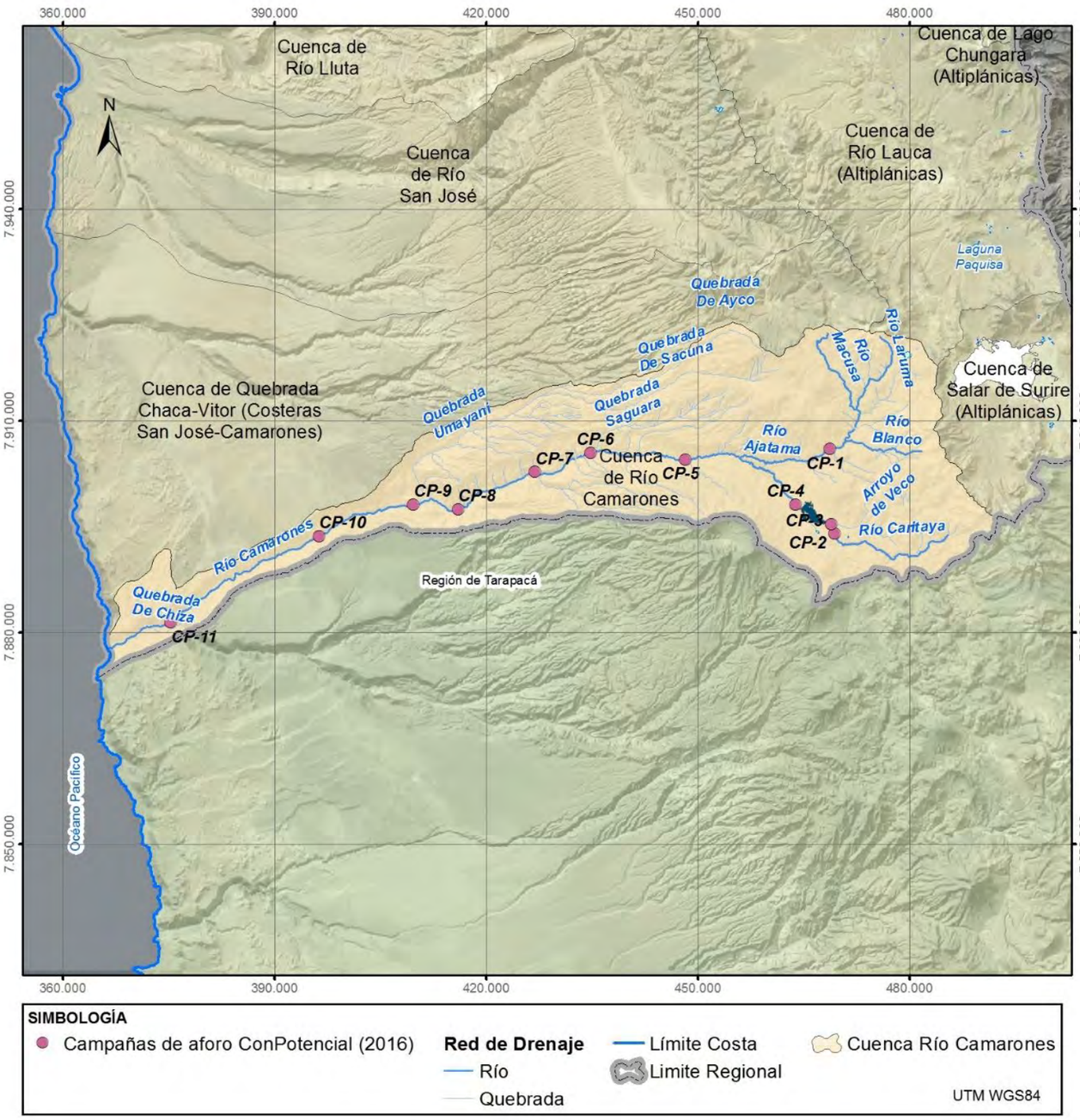


Figura 7.213 Localización de los aforos en las campaña I, campaña II, campaña III y campaña IV del estudio de Con Potencial (2016) en la cuenca del río Camarones. Fuente: elaboración propia.

Figura 7.214 Localización de los aforos en la campaña IV de este estudio en la cuenca del río Camarones. Fuente: elaboración propia.

Tabla 7.130 Caudales obtenidos de las campañas de aforos en la cuenca del río Camarones. Valores tomados de Con Potencial Consultores (2016). Fuente: elaboración propia.

No	Sitio de Aforo	CAUDAL AFORADO				
		Campaña I 16-19 Jun 2015	Campaña II 03-05 Ago 2015	Campaña III 27-29 Sep 2015	Campaña IV 23-25 Nov 2015	03, 04, 06 y 07 de agosto de 2016
		Q [l/s]	Q [l/s]	Q [l/s]	Q [l/s]	Q [l/s]
1	CP-1	198	151	72	144	
2	CP-2	438	353	370	352	
3	CP-3	0	0	0	0	
4	CP-4	461	554	400	-	
5	CP-5	712	967	706	529	
6	CP-6	837	963	700	692	
7	CP-7	648	865	744	524	
8	CP-8	737	812	572	377	
9	CP-9	446	469	304	217	
10	CP-10	708	469	395	223	
11	CP-11	377	375	212	192	
12	CAAS-131					84,1
13	CAAS-132					18,8
14	CAAS-144					141,8
15	CAAS-151					538,4
16	CAAS-153					168,9
17	CAAS-154					103,6
18	CAAS-155					277,9
19	CAAS-156					446,4

Tabla 7.131 Registro de los aforos históricos encontrados de la cuenca del río Camarones. Fuente: elaboración propia.

ID Sitio Aforado	Año	CAUDAL AFORADO [l/s]											
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1078	2009					286							
1084						333							
1080						373							
1076		396											
1045			7										
1053			17										
1052			40										

ID Sitio Aforado	Año	CAUDAL AFORADO [l/s]											
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1049			45										
1058			29										
1060			157										
1062			242										
1042		239											
1040		89											
1035		375											
1037		392											
1039		528											
1025		418											
1027		159											
1029		97											
1031		103											
1033		111											
1023		82											
1021		77											
1019		74											
1017		85											
1015		2											
AF-1	2014			624		353							
AF-2				471		435							
AF-3				564		453							
AF-4				493		438							
AF-5				569		424							
AF-6				118		126							
AF-7				389		308							
AF-8				525		494							
AF-9				412		589							
AF-10				505		664							
AF-11				114									
AF-12				90									
AF-13						2							
AF-14						23							
AF-15						365							

Como se observa en las Figura 7.212 y Figura 7.213, existe similitud en la localización de algunos aforos históricos con aforos recientes realizados en la cuenca. Sin embargo, cabe mencionar que los aforos realizados sólo representan un instante específico del río. A continuación se comenta en detalle.

Dado que existen algunos sitios de aforos que coinciden entre la II campaña (Ago/2015) de Con Potencial Consultores Spa y la IV campaña (Ago/2016) de ICASS, fue posible realizar algunas comparaciones. Los aforos CP-2 y CAAS-156 sobre el río Caritaya aguas arriba del embalse, registraron diferencias de 93 l/s de un año a otro, siendo mayor el caudal aforado en el 2016. Los aforos CP-6 y CAAS-151 sobre el río Camarones en Chilpe, registraron diferencias de 425 l/s de un año a otro, siendo mayor el caudal aforado en el 2015. Los aforos CP-8 y CAAS-144 sobre el río Camarones en Taltape, registraron diferencias de 670 l/s de un año a otro, siendo mayor el caudal aforado en el 2015. Los aforos CP-11 y CAAS-153 sobre el río Camarones en ruta 5, registraron diferencias de 206 l/s de un año a otro, siendo mayor el caudal aforado en el 2015.

Los aforos que coinciden en localización pero difieren en los meses aforados son: el aforo CP-2 y el aforo histórico AF-5 (Geohidrología, 2014), el aforo CP-4 y el aforo histórico AF-15 (Geohidrología, 2014), el aforo CP-5 y el aforo histórico 1035 (Universidad de Tarapacá, 2010), el aforo CP-9 y el aforo histórico 1029 (Universidad de Tarapacá, 2010), el aforo CP-10 y el aforo histórico 1033 (Universidad de Tarapacá, 2010), y el aforo CP-11 y el aforo histórico 1021 (Universidad de Tarapacá, 2010).

Los aforos CP-2 y CP-4, ambos sobre el río Caritaya, el primero aguas arriba del otro a una distancia aproximada de 7 km, además de la presencia del embalse Caritaya intermedio. Al comparar los caudales aforados en las campañas de Jun/2015, Ago/2015 y Sep/2015, se observa que las diferencias entre el caudal aguas arriba y aguas abajo del embalse en junio y septiembre fueron similares (del orden de 25 a 30 l/s), sin embargo en los aforos de agosto dicha diferencia fue de 200 l/s, lo que permite inferir que el embalse regula en gran medida el caudal que transita por el río Caritaya hasta llegar a la confluencia con el río Camarones.

7.6.1.6 Modelación hidrológica

Las generalidades del modelo hidrológico HEC-HMS utilizado para la modelación hidrológica de la cuenca se describen en el Anexo VI. A continuación se detalla el planteamiento concebido, información base, parámetros calibrados y resultados obtenidos del modelo.

PLANTEAMIENTO DEL MODELO

MODELO DE CUENCA

De la cuenca del río Camarones se delimitó una subcuenca de la parte media-alta (río Camarones hasta Conanoxa), a partir de la estación fluviométrica del mismo nombre. Se decidió no incluir en la modelación la parte baja de la cuenca, por no contar con estación de control fluviométrico a la salida de la cuenca.

Para representar el movimiento del agua en la subcuenca se utilizó un conector "Reach" que sirve para calcular el tránsito del hidrograma a medida que circula por el cauce, para las extracciones de agua superficial se utilizó el ícono "diversión" y a la salida de la cuenca se utilizó un sumidero o "Sink". Ver esquema de la cuenca en Figura 7.215.

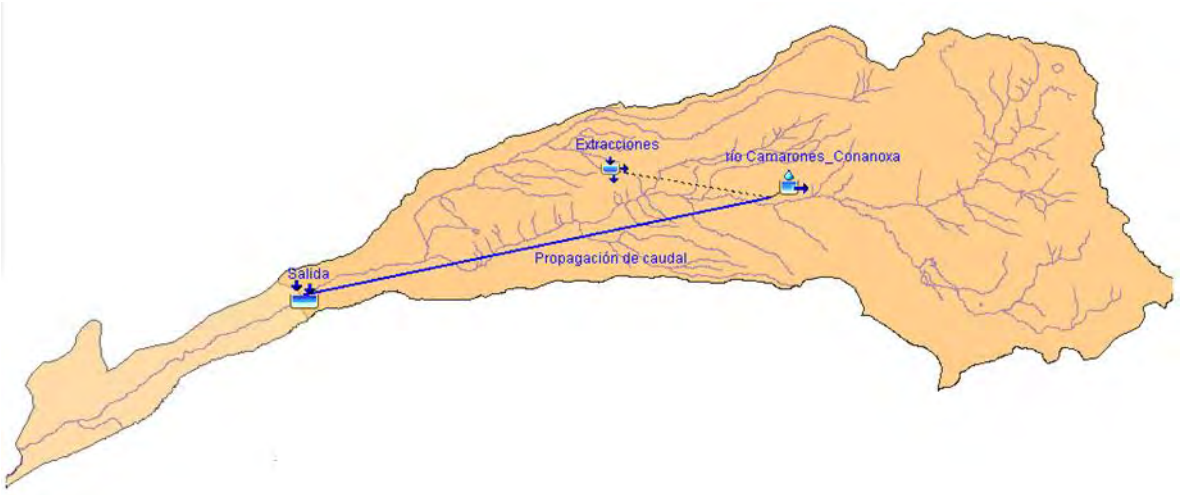


Figura 7.215 Esquema en el modelo hidrológico HEC-HMS de la cuenca del río Camarones. Fuente: elaboración propia.

MODELO METEOROLÓGICO

Las series meteorológicas utilizadas en cada subcuenca se describen a continuación:

- Precipitación diaria: los registros corresponden a las estaciones meteorológicas Esquiña y Belén dcp.
- Evaporación media mensual: los registros corresponden a la estación meteorológica Codpa

ESPECIFICACIONES DE CONTROL

El intervalo del tiempo modelado es diario, la fecha de inicio fue 01-ene-1985 y la fecha de finalización fue 31-dic-2014.

INFORMACIÓN BASE

Se requiere ingresar parámetros físicos de la cuenca definidos por el modelo continuo seleccionado, así como información antrópica que eventualmente modifica las condiciones naturales del agua en la cuenca y registros fluviométricos para la posterior calibración. Las series de tiempo utilizadas se describen a continuación:

- El tiempo de retardo se determinó para cada subcuenca como el 60% del tiempo de concentración, aplicando la ecuación de *California Highways* en base a la longitud del cauce y al delta altitudinal.
- *Caudal de extracción:* se utilizó el registro de concesiones de agua superficial de la DGA otorgadas en la cuenca, considerando que éste caudal es constante y de uso consuntivo, además de que no fuera mayor al disponible en el río.
- *Caudal diario observado*: para la calibración del modelo se utilizaron series de caudales diarios para el mismo periodo de la simulación de la estación Río Camarones en Conanoxa.

Dado que no se cuenta con mediciones directas de todos los parámetros físicos requeridos para representar adecuadamente el comportamiento hidrológico de la cuenca, estos fueron objeto de calibración y los escogidos finalmente fueron los que mejor representaron los caudales simulados al comparar con los observados. En la Tabla 7.132 se presentan los parámetros físicos definidos para el modelo SMA.

El análisis estadístico de dicha comparación fue basado en los resultados del coeficiente Nash-Sutcliffe, ampliamente utilizado en la calibración de modelos hidrológicos para el chequeo de la bondad de ajuste. En la subcuenca río Camarones hasta Conanoxa este valor fue 0,42, siendo un ajuste bueno ≥0,4.

Tabla 7.132 Parámetros utilizados para el modelo SMA en la cuenca del río Camarones. Fuente: elaboración propia.

Zonas definidas en el modelo hidrológico	Parámetro	Unidad	Subcuenca río Camarones hasta Conanoxa
Intercepción vegetación	Almacenamiento inicial en vegetación	[%]	5
	Capacidad almacenada por intercepción de vegetación	[mm]	2
Acumulación en depresiones del terreno	Almacenamiento inicial en depresiones	[%]	5
	Capacidad almacenada en depresiones	[mm]	2
	Infiltración máxima	[mm/h]	7
Zona no saturada (Matriz de Suelo)	Almacenamiento inicial en matriz de suelo	[%]	5
	Capacidad almacenada en el suelo	[mm]	5
	Capacidad almacenada en la zona de tensión del suelo	[mm]	2
	Percolación máxima del suelo hacia acuífero libre	[mm/h]	6
Zona saturada (acuífero superficial)	Almacenamiento inicial en acuífero superficial	[%]	5
	Capacidad almacenada en acuífero superficial	[mm]	8
	Percolación máxima del acuífero superficial hacia el acuífero profundo	[mm/h]	3
	Coeficiente de almacenamiento del acuífero superficial	[h]	250
Zona saturada (acuífero profundo)	Almacenamiento inicial en acuífero profundo	[%]	5
	Capacidad almacenada en acuífero profundo	[mm]	5
	Percolación máxima del acuífero profundo	[mm/h]	2
	Coeficiente de almacenamiento del acuífero profundo	[h]	300

RESULTADOS MODELO HIDROLÓGICO

Se compararon a nivel diario los caudales observados con los caudales simulados, existiendo similitud en algunos y diferencias en otros para todo el periodo analizado. Sintetizando dicha información, se calculó el caudal medio anual en los años con más de 9 meses de información en el caso de los datos observados. Los registros incompletos de la estación Río Camarones en Conanoxa fue el periodo 1998-2003.

Los resultados del caudal observado y caudal simulado a nivel medio anual se muestran en la Figura 7.216. Allí se observa que en general los caudales simulados

subestiman a los observados, existiendo mayor diferencia en los caudales de los años 2004 al 2014. Situación que podría atribuirse a la regulación de las extracciones aguas arriba, las cuales fueron consideradas constantes, además el cauce pudo haber recibido escurrimientos adicionales por crecidas instantáneas que superan los valores medios.

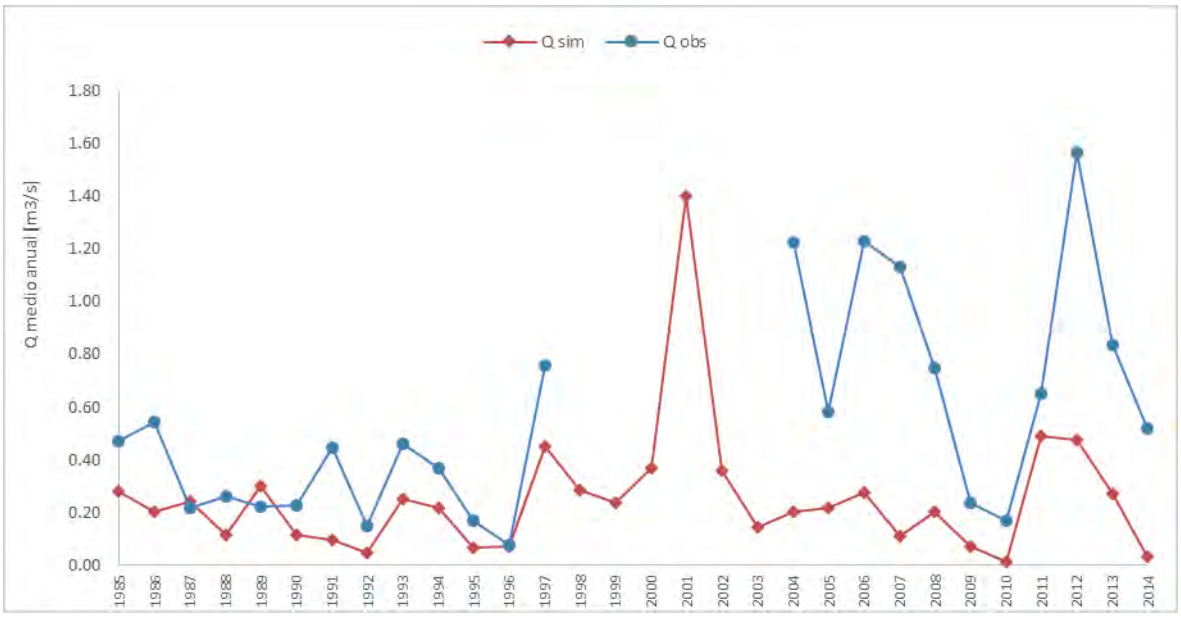


Figura 7.216 Comparación caudales medios anuales observados y simulados en la subcuenca río Camarones hasta Conanoxa. Fuente: elaboración propia.

7.6.1.7 Estimación de la recarga de aguas subterráneas

La principal fuente de recarga del acuífero del río Camarones, proviene de las crecidas producto de las precipitaciones durante el Invierno Altiplánico, y en menor proporción, son los aportes del agua que infiltra desde depresiones y pérdidas de la distribución de las zonas de riego.

ANTECEDENTES

GFC Ingenieros Ltda. (2010) en el estudio "Metodología para la estimación de recarga de cuencas altiplánicas y precordilleranas de vertiente pacífica en el norte de Chile, XV, I, II y III regiones", obtuvieron para el caso de la cuenca del río Camarones, una recarga para un escenario promedio de 2.152 l/s, este valor equivaldría al 32% de la precipitación media anual calculada en el estudio.

De acuerdo al informe "Diagnóstico de la subcuenca aportante al embalse Caritaya" presentado por Geohidrología Consultores Ltda. (2014), se menciona que la subcuenca aportante al Embalse Caritaya cuenta con depósitos geológicos que albergan un acuífero de baja capacidad de almacenamiento, el cual fluye libremente hacia el embalse y a su vez es recargado fundamentalmente por la infiltración del río Caritaya. Además, se comenta que las Lagunas de Amuyo son una fuente de recarga de aguas hidrotermales al río Caritaya.

ANÁLISIS DE LA RECARGA: RELACIÓN PRECIPITACIÓN - ESCORRENTÍA

Para la estimación de la recarga media anual, se implementó una metodología regional ampliamente desarrollada para las cuencas altiplánicas y precordilleranas de vertiente pacífica, como referencia principal se contó con el estudio SDT n° 317 liderado por DEP-DGA (2011). Adicionalmente, para distribuir la recarga a nivel mensual, en este proyecto se plantea una metodología simplificada basada en los procesos hidrológicos que predominan en la región. Los detalles del procedimiento realizado en las cuencas de la región de Arica y Parinacota se presenta en el anexo VI.

Con relación a la cuenca del río Camarones, en la Tabla 7.133 se presenta la información base utilizada. Cabe mencionar que el cálculo de la precipitación media anual se realizó utilizando el método de las isoyetas, descrito en el capítulo "Hidrometeorología" del Análisis Regional y para el caudal medio anual se contó con la información de la estación fluviométrica río Camarones en Conanoxa.

Tabla 7.133 Información base utilizada de la subcuenca del río Camarones en Conanoxa. Fuente: elaboración propia.

Subcuencas	Coord. UTM N del Centroide	Altitud media [msnm]	Área [km^2]	Pp media anual [mm/año]	Pp media anual [l/s]	Q medio anual [l/s]
Río Camarones hasta Conanoxa	7.904.850	3.014	1.995	121	7.654,6	560

Para la estimación de la recarga neta, se estableció una relación entre el promedio de los caudales mínimos decadales (meses de junio, julio y agosto) y los caudales medios observados, y lo mismo pero con los caudales calculados. Lo anterior se adoptó siguiendo las hipótesis y conceptos hidrológicos del estudio SIT N° 317, a continuación se describen:

- Los flujos subterráneos son despreciables y los caudales superficiales controlados a la salida de la cuenca representan la escorrentía total.
- Se entenderá como "recarga neta de la cuenca", aquella parte de la escorrentía total de salida de una cuenca, compuesta por el agua que ha infiltrado al menos una vez y que ha transitado subterráneamente en algún momento, tal que su permanencia dentro de la cuenca es superior a la de un año hidrológico.
- Esta recarga neta o caudal base interanual de salida de la cuenca puede ser estimada, como el promedio de los mínimos decadales observados entre los meses de junio, julio y agosto. Existe consenso en interpretar las series hidrológicas del norte de Chile, bajo la perspectiva de ciclos hidrológicos decadales, a partir de los cual es razonable estimar el flujo base como el promedio de los 4 mínimos decadales observados históricamente.

De acuerdo a las correlaciones obtenidas, es factible asumir que la recarga neta en las cuencas altiplánicas de la XV Región, corresponde entre el 43% y el 46% de la escorrentía total. Adicionalmente, Aquaterra Ingenieros Ltda. (2011) en el estudio SIT N° 251, encontraron que los flujos subterráneos en la subcuenca del río Camarones hasta Conanoxa son despreciables frente al caudal de salida observado. En la Tabla 7.134 se muestran los valores de la estimación de la recarga neta.

Tabla 7.134 Caudales considerados en la correlación y estimación de la recarga neta. Fuente: elaboración propia.

Subcuencas	Q obs [l/s]	Q cal [l/s]	Q min decadal prom [l/s]	Recarga neta [l/s] (40% - Estudio SDT 137)	Recarga neta [l/s] (43% - Propuesto Actual)
Río Camarones hasta Conanoxa	560	514	83	224	241

SÍNTESIS DE LA ESTIMACIÓN DE LAS PRINCIPALES RECARGAS

Una vez revisados los antecedentes de la cuenca del río Camarones, relacionados con la estimación de la recarga y de analizar conceptualmente las componentes que condicionan el tránsito del agua hasta llegar al acuífero, fue adoptada la metodología regional propuesta por el estudio SIT N° 317 para la parte alta. De la parte baja, a la fecha no se conocen estimaciones ni disponibilidad del recurso subterráneo.

Cabe mencionar que el valor obtenido de la recarga media anual en la cuenca, es un referente que consideró varias hipótesis y simplificaciones, anteriormente descritas. Sin duda la principal limitante en el análisis es la cantidad de información disponible,

alguna de esta desconocida y/o no controlada. En la Tabla 7.135 se presenta de manera resumida las principales fuentes de recarga, el método utilizado y los valores estimados a nivel anual. Seguidamente en la Tabla 7.136 se presenta la distribución de la recarga estimada a nivel mensual, concentrándose esta en los meses con mayor registro precipitación, de enero a marzo.

Tabla 7.135 Síntesis de las principales estimaciones de recarga al acuífero en la cuenca del río Camarones. Fuente: elaboración propia.

Principales fuentes de recarga al acuífero	Método	Valor estimado anual [l/s]
		Río Camarones hasta Conanoxa
Percolación de la PRECIPITACIÓN que a su vez contribuye a la escorrentía	Relación precipitación-escorrentía. Metodología adoptada del estudio SIT N° 317- DEP-DGA (2011)	241
Recarga neta anual del FLUJO BASE en la caja del río Camarones		

Tabla 7.136 Valores de la recarga media mensual estimada en la cuenca del río Camarones. Fuente: elaboración propia.

Subcuencas	Distribución mensual de la recarga estimada [l/s]											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Río Camarones hasta Conanoxa	93	99	49	0	0	0	0	0	0	0	0	0

7.6.2 Marco geológico

La cuenca del río Camarones es la más austral de la región de Arica y Parinacota, y las unidades geomorfológicas presentes son la Cordillera de la Costa, la Depresión Intermedia, la Precordillera y en el extremo este de la cuenca también es posible encontrar la Cordillera Occidental.

GEOLOGÍA

En la cuenca del río Camarones, los intrusivos que conforman el arco jurásico de la Cordillera de la Costa (Jmsi) afloran desde el límite oeste de la cuenca hasta cerca de la localidad de Chuquichambe. Las rocas asociadas al trasarco jurásico son la Formación Camaraca (Jmc), cuyos afloramientos se distribuyen discontinuamente en la cordillera de la costa y es sobreyacida en discordancia angular por la Formación Atajaña (JsKia), que aflora localmente en las cercanías de la localidad de Chuquichambe. Sobre la anterior, y en discordancia angular, se ubica la Formación

Suca (Kis), que aflora en una franja NW-SE, al este de la localidad de Camarones. Un pequeño afloramiento intrusivo de edad cretácica (Ki(a)) se presenta al este de la localidad de Camarones y otros intrusivos de edad cretácica superior-paleocena afloran al oeste y en las cercanías de la localidad de Ulapata.

Entre las rocas asociadas al Oligoceno-Holoceno en la Depresión Central y la Precordillera se puede contar con la Formación Azapa (Oa), que aflora a lo largo de la quebrada Camarones en su parte baja y media. La Formación Oxaya (OMo) y la Formación El Diablo (Mimd) cubren una gran extensión de la Depresión Central, entre las localidades de Camarones y Ulapata. En la Cordillera Occidental, una pequeña porción de la Formación Lupica (OMl) alcanza a aflorar en la cuenca del río Camarones, en el límite noreste. La Formación Macusa (Mmsm) aflora en la localidad de Macusa hasta el cerro Chucal, en el extremo noreste de la cuenca. La Ignimbrita Lauca (Pll) presenta un pequeño afloramiento alargado al noreste de Ulapata. Los volcanes y remanentes de volcanes del Mioceno Medio (Mmv), Mioceno Superior (Msv), Plioceno (Plv) y Pleistoceno (Pv) se ubican en la Precordillera, al este de la localidad de Ulapata y alrededor de la localidad de Mulluri.

En la Cordillera de la Costa se encuentran depósitos aluviales (OMma, MsPla) rellenando depresiones. Los depósitos salinos de la Depresión Central (Qsdc) se localizan al norte y sur de la quebrada Camarones, cerca de la localidad de Chuquichambe. Los depósitos litorales (Ql) y eólicos (Qe) se localizan cerca de la costa, en la caleta Camarones. Una gran extensión de la parte baja y media de la cuenca del río Camarones está cubierta por depósitos de remoción en masa (PlQr), depósitos coluviales (Qc). Los depósitos aluviales (Pa, Ha) se disponen esencialmente como mantos en las laderas de los volcanes y en las depresiones de la precordillera. Los depósitos fluviales del Plioceno (Plf) generan terrazas "colgadas" a lo largo de los cauces, cerca de la desembocadura del río Camarones y los depósitos fluviales del Holoceno (Hf) se ubican al este de la localidad de Camarones. Los depósitos que se encuentran en la Cordillera Occidental corresponden a los depósitos glaciales (Qg), esencialmente en los flancos de los edificios volcánicos.

TECTÓNICA Y ESTRUCTURAS

Durante la tercera etapa (Oligoceno-Holoceno) se producen los mayores cambios en el relieve, los cuales se evidencian con las siguientes estructuras: las de edad oligocena

presentes en la cuenca del río camarones son la falla Taltape, en la Depresión Central, de rumbo N20°-30°W y manteo 50-60°E, pone en contacto rocas deformadas del Cretácico Inferior alto al este (Formación Suca e Intrusivo de Taltape), con capas subhorizontales y localmente plegadas del Oligoceno Inferior al oeste (Formación Azapa inferior). El desplazamiento de esta falla ha sido inverso desde el Oligoceno Inferior, y en parte sinsedimentario con la Formación Azapa. La falla Ausipar, cuya proyección en superficie marca el contacto rectilíneo de rumbo N20°-30°W, entre la Depresión Central y la Precordillera está cubierta por la Formación Oxaya. Bajo la Formación Oxaya, la falla pone en contacto rocas plegadas del Jurásico-Cretácico (Formación Livilcar), al este, con capas subhorizontales del Oligoceno (Formación Azapa), al oeste.

Las estructuras miocenas-holocenas en la cuenca del río Camarones son: entre las quebradas Vítor y Camarones, algunas de las fallas noreste-suroeste subverticales cortan los depósitos aluviales del Oligoceno al Plioceno (OMa y MsPla) y producen desplazamientos verticales y separaciones horizontales sinextrales de quebradas con actividad intermitente. Esta red de fallas noreste-suroeste podría representar la parte interna de una estructura mayor con características de 'dúplex', tal como las reconocidas más al sur de la zona de estudio, en el Sistema de Falla Atacama. En la quebrada Humayani, se exponen flexuras de rumbo NNW a NNE. En la parte sur de la depresión central, aflora una estructura mayor: la Flexura Humayani, de rumbo N30°-40°W y vergencia oeste, que se interpreta como una flexura asociada a la propagación en profundidad de la falla Taltape ciega. Hacia el norte se prolonga como una flexura menor, y hacia el sur como la flexura Moquella y la flexura Aroma, que constituyen el límite entre la Depresión Central y la Precordillera. El monoclinal Sucuna, en el sector oriental de la Depresión Central, está inclinado levemente al oeste y plegado internamente en anticlinales cortos y suaves. En el sector de la quebrada Macusa, se expone un sistema estrecho de pliegues anticlinales y sinclinales, cortos, apretados y de vergencia oeste. Presentan algunos flancos verticales y localmente invertidos, que se interpretan como pliegues de propagación y despegados sobre una falla plana, de edad miocena superior.

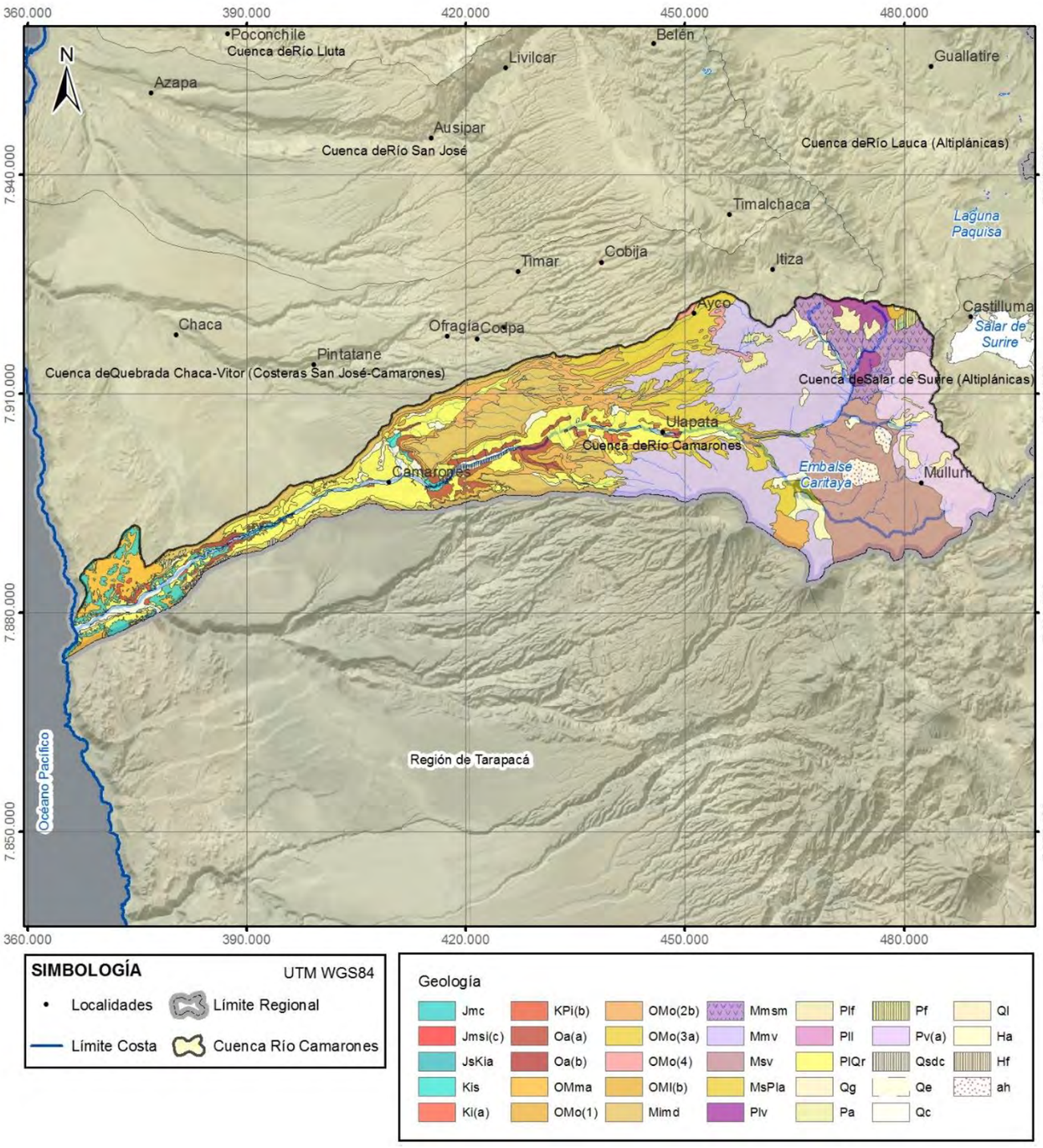


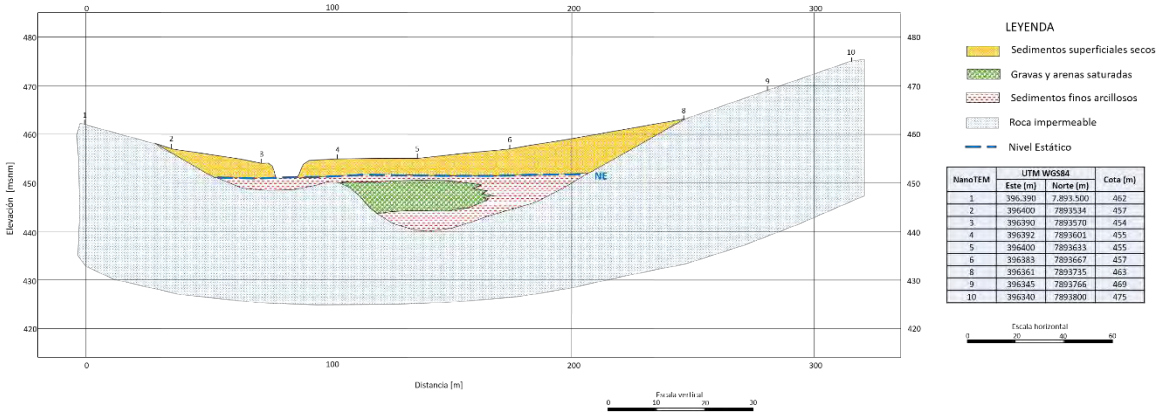
Figura 7.217 Mapa geológico de la cuenca del río Camarones. Fuente: modificado de García et al (2004).

7.6.3 Caracterización Hidrogeológica

7.6.3.1 Estudios existentes

La información hidrogeológica de la cuenca del río Camarones es bastante acotada y localizada en el sector del embalse Caritaya.

Aquaterra (2011) calculó la recarga y balances hídricos en ciertas cuencas altiplánicas, dentro de las cuales se encuentra el sector alto de la cuenca del río Camarones, llamada subcuenca "Río Camarones hasta Conanoxa". En el marco de este estudio se desarrolló una campaña geofísica, el que incluyó un perfil geofísico en Conanoxa y que se muestra en la Figura 7.218.



NanoTEM	UTM WGS84		Cota (m)
	Este (m)	Norte (m)	
1	396.390	7.893.500	462
2	396400	7893534	457
3	396390	7893570	454
4	396392	7893601	455
5	396400	7893633	455
6	396383	7893667	457
8	396361	7893735	463
9	396345	7893766	469
10	396340	7893800	475

Figura 7.218 NanoTem interpretado en Conanoxa. Fuente: Modificado de Aquaterra Ltda. (2011).

Geohidrología (2014) elaboró un estudio hidrogeológico detallado en el sector del embalse Caritaya. En éste se desarrollaron campañas de medición de aforos y un estudio de resistividad mediante las técnicas de Transiente Electromagnético (TEM), en el modo NanoTEM, y Tomografía Eléctrica. Las estaciones se distribuyeron en 5 perfiles de NanoTEM y 2 perfiles de Tomografía. A partir de esta información describieron las unidades hidrogeológicas del sector del embalse de Caritaya. Identificaron a los depósitos fluviales (Hf) y sales (Qs) como unidades acuíferas de alta importancia hidrogeológica en depósitos no consolidados, a los depósitos aluviales, coluviales, glaciares, piroclásticos de caída como unidades de media a baja importancia hidrogeológica en depósitos no consolidados. Las unidades acuíferas de alta importancia hidrogeológica en rocas corresponden a los depósitos volcánicos del Mioceno Superior, los cuales han sido fuertemente afectados por procesos de

alteración hidrotermal. Las unidades acuíferas de media a baja importancia hidrogeológica en afectadas por una intensa alteración hidrotermal que ha reemplazo total o parcialmente la textura del protolito y están afectadas por vetas, vetillas y fracturas las cuales producen un aumento de permeabilidad secundaria. Por último, las unidades acuíferas de baja importancia hidrogeológica en rocas corresponden a depósitos volcánicos del Mioceno al Pleistoceno y a depósitos piroclásticos del Mioceno Medio bien consolidados (M3t) y afectados por alteración hidrotermal.

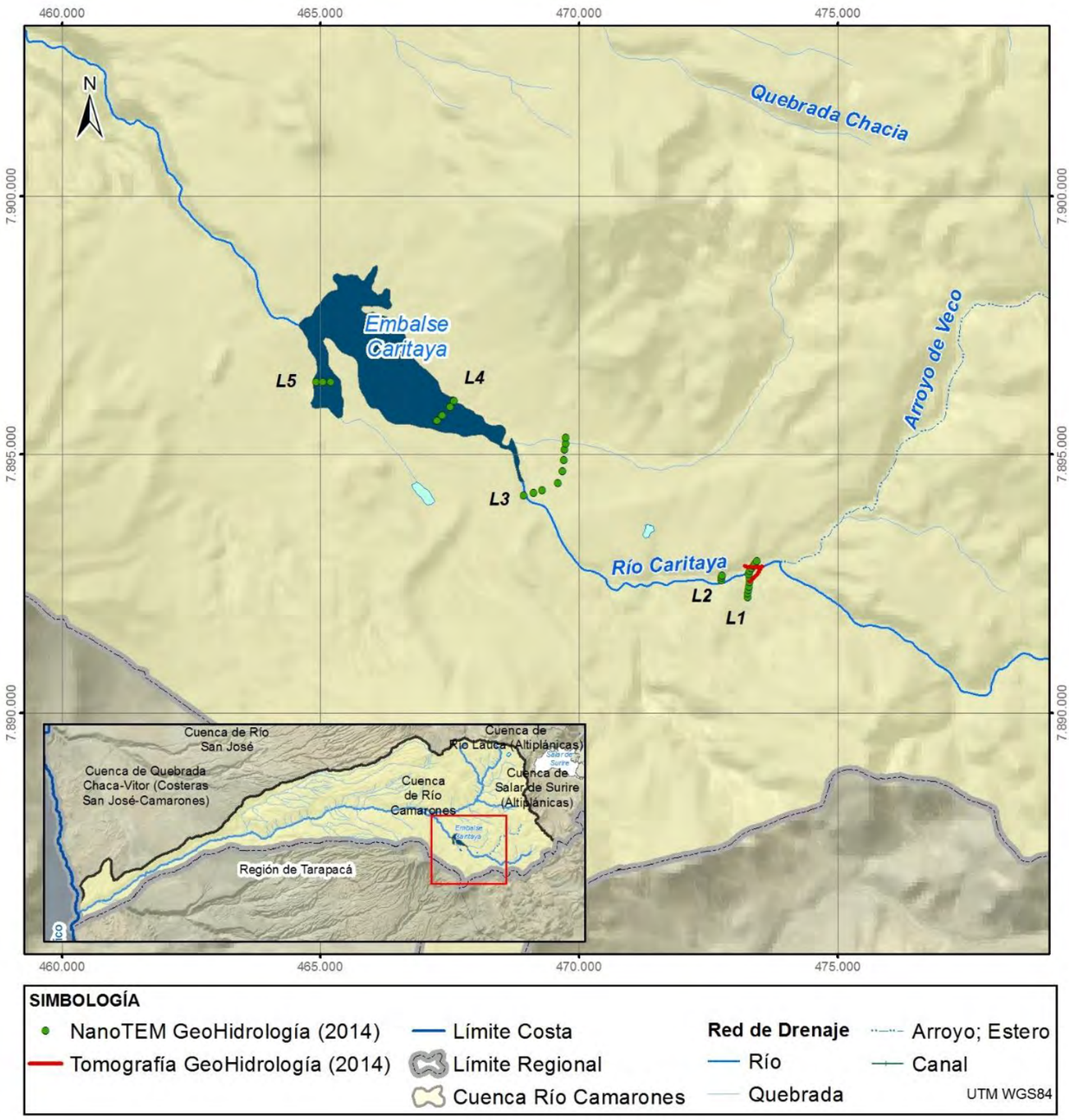


Figura 7.219. Ubicación de los puntos NanoTem y de los perfiles de tomografía realizados en GeoHidrología (2014). Fuente: elaboración propia.

7.6.3.2 Definición y caracterización de las unidades hidrogeológicas

A continuación, se describen las unidades hidrogeológicas que se encuentran en la cuenca del río Camarones a partir de la información hidrogeológica del estudio de GeoHidrología (2014), del mapa geológico García *et al.* (2004) y del mapa hidrogeológico 1.000.000 (DGA, 1989):

- Unidad Hidrogeológica I (importancia alta): considera los depósitos aluviales y fluviales del Holoceno y depósitos litorales. Estos depósitos son materiales detríticos no consolidados que afloran en las laderas de volcanes, en depresiones, quebradas o ríos. Esta unidad hidrogeológica se caracteriza por ser un medio con permeabilidad primaria y de carácter libre.
- Unidad Hidrogeológica II (importancia media): corresponde a los volcanes del Mioceno Superior, Pleistoceno y Plioceno. Los depósitos volcánicos del Mioceno Superior han sido fuertemente afectados por procesos de alteración hidrotermal pervasiva. En esta unidad el macizo rocoso se encuentra alterado y fracturado, lo cual permite el desarrollo de una alta permeabilidad secundaria, que canaliza el ascenso de fluidos por zonas con mayor grado de fracturamiento y alteración.
- Unidad Hidrogeológica III (importancia media): engloba los depósitos salinos de la Cordillera de la Costa y de las lagunas de Amuyo. Presenta una porosidad intergranular baja y secundaria muy variable según el grado de disolución de las sales.
- Unidad Hidrogeológica IV (importancia media): constituido por materiales detríticos semiconsolidados a fuertemente consolidados. Corresponde a los depósitos glaciares, coluviales, eólicos, de remoción en masa, la Formación El Diablo, los depósitos aluviales de la Cordillera de la Costa y la Formación Azapa. La permeabilidad principal es por porosidad intergranular.
- Unidad Hidrogeológica V (baja importancia): considera a la ignimbrita Oxaya, ignimbrita Lauca, la Formación Lupica (b), la Formación Macusa y remanentes de volcanes del Mioceno. Esta unidad se caracteriza por presentar una porosidad intergranular nula, pero en mayor o menor grado está plegada y fallada.

- Unidad Hidrogeológica VI (baja-muy baja importancia): está compuesta por secuencias de coladas de lavas. Corresponden a las Formación Atajaña, Suca y Camaraca que poseen una porosidad intergranular nula, pero pueden presentar fracturas localmente.
- Basamento: corresponde a las rocas intrusivas del Jurásico y Cretácico.

En la Tabla 7.137 se resumen las unidades hidrogeológicas según la importancia hidrogeológica y los tipos de permeabilidad presentes en la cuenca del río Camarones. Así mismo, las unidades hidrogeológicas se ilustran en la Figura 7.220 según la importancia hidrogeológica.

Tabla 7.137 Resumen de las unidades hidrogeológicas de la cuenca del río Camarones. Fuente: elaboración propia.

Cuenca	Unidad Hidrogeológica	Descripción	Tipo de permeabilidad	Importancia hidrogeológica	Tipo de Unidad
Río Camarones	I	Depósitos fluviales Depósitos aluviales Depósitos litorales	Primaria	Alta	Acuífero
	II	Volcanes Mioceno Superior, Pleistoceno y Plioceno	Secundaria	Alta-Media	Acuífero
	III	Depósitos salinos	Primaria Secundaria	Media	Supuestamente Acuitardo
	IV	Depósitos glaciares Depósitos coluviales Depósitos eólicos Depósitos de remoción en masa Formación El Diablo Depósitos aluviales Cordillera Costa Formación Azapa	Primaria	Media	Supuestamente Acuitardo
	V	Formación Macusa Volcanes y remanentes de volcanes Mioceno Ignimbrita Oxaya (1,2b,3) Ignimbrita Lauca Formación Lupica (b)	Secundaria	Baja	Supuestamente Acuitardo
	VI	Formación Camaraca Formación Atajaña Formación Suca	Secundaria	Baja-muy baja	Supuestamente Acuícludo

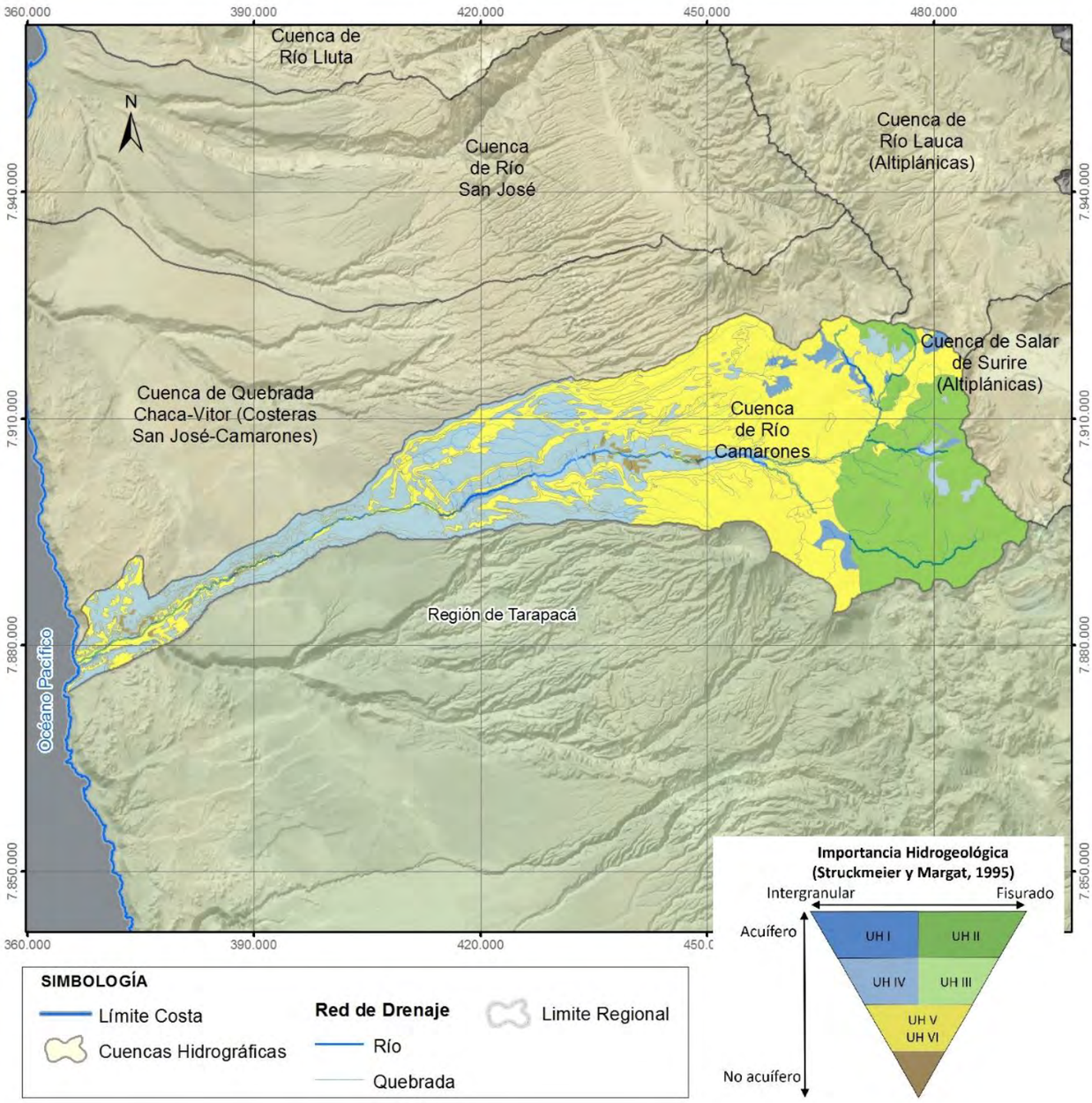


Figura 7.220 Mapa de las unidades según la importancia hidrogeológica presentes en la cuenca del río Camarones. Fuente: elaboración propia.

7.6.3.3 Parámetros hidráulicos

En la cuenca del río Camarones no se registran pruebas de bombeo en los antecedentes analizados, por lo que se han considerado valores de parámetros hidráulicos basados en materiales geológicos similares en la bibliografía o estimados en otras cuencas vecinas. En la Tabla 7.138 se resumen los valores de transmisividad (T), conductividad hidráulica (K), almacenamiento específico (Ss) y porosidad drenable (Sy) de las diferentes unidades hidrogeológicas.

Tabla 7.138 Resumen de los parámetros hidráulicos de cada unidad hidrogeológica de la cuenca del río Camarones. Fuente: elaboración propia.

Cuenca	Unidad Hidrogeológica	Régimen	T (m^2/día)	K (m/día)	Ss (m^{-1})	Sy (%)	Comentario
Río Camarones	I	Libre	11-100	2,5-0,2		10-50	T, K Sy por pruebas de bombeo MAYCO (2013) e ICASS (2016) en UH1 cuenca Chaca-Vítor
	II	Libre		$1E^{-2}$-$1E^{2}$	--		K estimado por Aquaconsult (2010) depósitos volcánicos
	III	Libre		$8E^{-7}$ – $2E^{-3}$	--	--	K estimado por Domenico y Schwartz (1990) para rocas sedimentarias
	IV	Libre		$1E^{-6}$ – $5E^{-1}$		--	K estimado por Domenico y Schwartz (1990) para rocas sedimentarias
		Confinado			--		
	V	Libre		$1E^{-5}$-1		--	K estimado por Aquaconsult (2010) de la Fm. Lauca y S por Domenico y Mifflin (1965)
		Confinado			$3E^{-6}$-$7E^{-5}$		
	VI	Libre		$2E^{-6}$-$3E^{-2}$		--	K estimado por Domenico y Schwartz (1990) para basaltos y S por Domenico y Mifflin (1965)
		Confinado			$3E^{-6}$		

7.6.3.4 Piezometría

La presente piezometría se elaboró tomando en cuenta la piezometría realizada por GeoHidrología (2004) y la piezometría inferida a partir de la medición de aforos en el río Camarones, las observaciones realizadas en terreno, el análisis de imágenes satelitales y mediante las curvas de nivel cada 50 m.

La piezometría de la cuenca del río Camarones presenta una dirección este-oeste, desde las cotas altas hacia la línea de costa. Las zonas de recarga se encuentran en la cabecera de la cuenca, donde parte de estas aguas afloran y circulan superficialmente a lo largo de la cuenca, atravesando unidades hidrogeológicas de moderada a baja transmisividad, hasta recargar el acuífero detrítico cuaternario asociado al río en el sector bajo de la cuenca.

En la Figura 7.221 se muestra la piezometría de la Unidad Hidrogeológica I de la parte baja de la cuenca. A lo largo del río Camarones se captan aguas superficiales mediante canales para el riego de cultivos, esto impide que se pueda analizar bien la relación río acuífero mediante la medición de aforos, sin embargo, se ha considerado que el río alimenta al acuífero.

En la zona alta de la cuenca también se presentan los niveles piezométricos, que se encuentran asociados a vertientes, escorrentías superficiales y a bofedales. Dado que no se cuenta con mucha información, en la Figura 7.222 se ha trazado una piezometría inferida en base a las vertientes y curvas de nivel cada 50 m, y se presenta la piezometría elaborada por GeoHidrología (2004) en el sector del embalse de Caritaya. El flujo de agua subterránea es relativamente somero y tiene dirección local en cada una de las quebradas y finalmente dirección este-oeste.

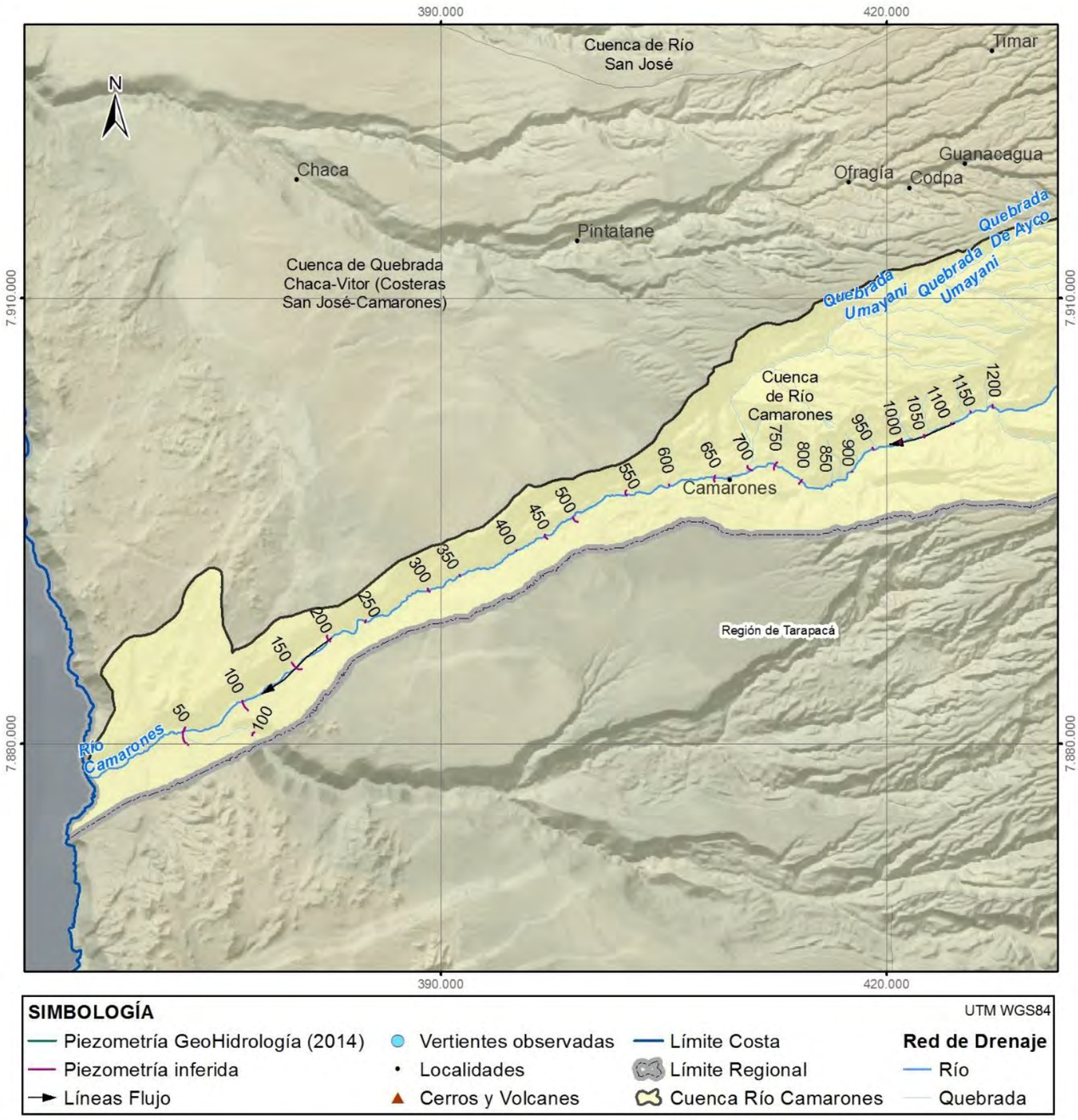


Figura 7.221 Mapa piezométrico inferido de la Unidad Hidrogeológica I en la parte baja de la cuenca del río Camarones. Fuente: elaboración propia.

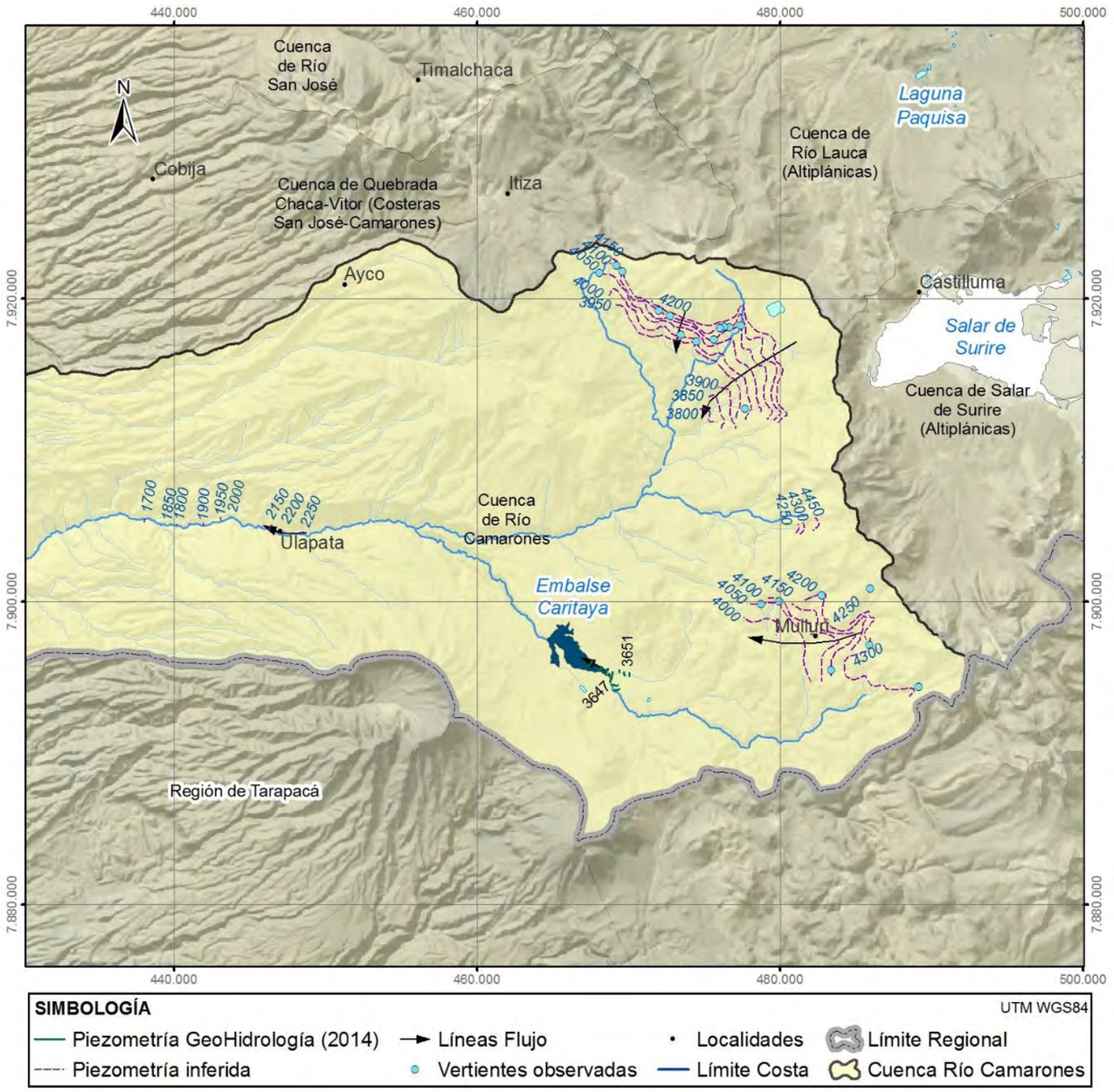


Figura 7.222 Mapa piezométrico inferido de la cabecera de la cuenca del río Camarones. Fuente: elaboración propia.

7.6.4 Caracterización Hidroquímica

En esta sección se revisaron los antecedentes existentes relacionados con la composición hidroquímica, la calidad de las aguas y la composición isotópica de las aguas superficiales de la cuenca del río Camarones. Posteriormente, se resumen las actividades efectuadas en las cuatro campañas de muestreo desarrolladas durante el presente estudio. Seguidamente, se describieron los parámetros fisicoquímicos registrados *in situ* durante las campañas de muestreo, se identificaron las facies químicas de las aguas analizadas, se comparó la composición química obtenida con los límites establecidos en la norma chilena para agua potable NCh 409/1 y finalmente se analizó la composición isotópica de las aguas superficiales tomadas en las campañas de terreno.

7.6.4.1 Estudios hidroquímica existentes

La cuenca del río Camarones recientemente fue estudiada desde el punto de vista hidrogeoquímico, hidroquímico e isotópicamente, por esta razón esta cuenca no se muestreó en el presente estudio. En el estudio UTA (2010) se realizaron 6 campañas de terreno y se obtuvo la composición química de 42 muestras de agua superficial distribuidas por toda la cuenca. El estudio básico de GeoHidrología (2014) estableció las fuentes de contaminación de las aguas aportantes al embalse Caritaya mediante la toma de 36 muestras para el análisis hidroquímica y de 6 muestras para el análisis isotópico en el sector aguas arriba del embalse Cariyata. Por último, en ConPotencial (2016) se tomaron 15 muestras de agua para el análisis hidroquímico y 11 para el análisis isotópico a lo largo del río Camarones y sus principales tributarios. El análisis detallado de cada uno de los antecedentes se presenta en el Anexo VIII. En la Figura 7.223 se muestra la ubicación de las muestras analizadas en los antecedentes.

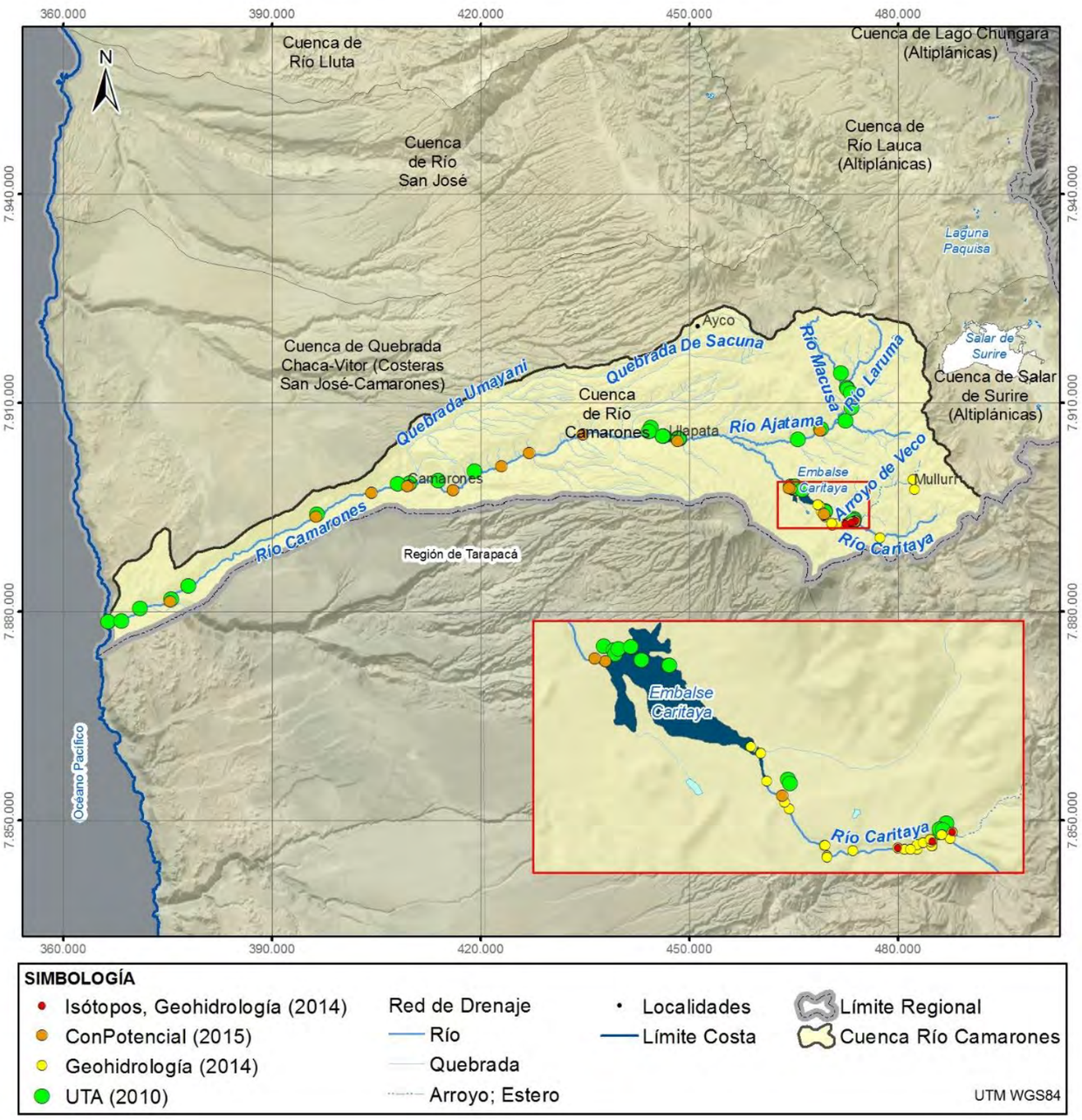


Figura 7.223 Ubicación de las muestras analizadas en los antecedentes más recientes de la cuenca del río Camarones. Fuente: elaboración propia.

7.6.4.2 Campañas de muestreo

La cuenca del río Camarones fue muestreada en la última campaña de terreno con el fin de verificar los análisis de los estudios recientes. A partir de esta información se caracteriza hidroquímica e isotópicamente y se determina la calidad de agua de algunos elementos y parámetros según la norma chilena para agua potable NCh 409/1 de los ríos Macusa, Laruma, Camarones, Caritaya, Arroyo Veco y quebrada Umayani. El programa de muestreo de este estudio se diseñó para complementar de manera efectiva la información disponible. En la Figura 7.224 se muestra la ubicación de las 10 muestras de agua superficial tomadas para la medición de los parámetros fisicoquímicos registrados *in situ* los días 03, 04, 06 y 07 de agosto de 2016. En el Anexo VIII se describe el protocolo seguido en terreno para la toma de muestras de agua.

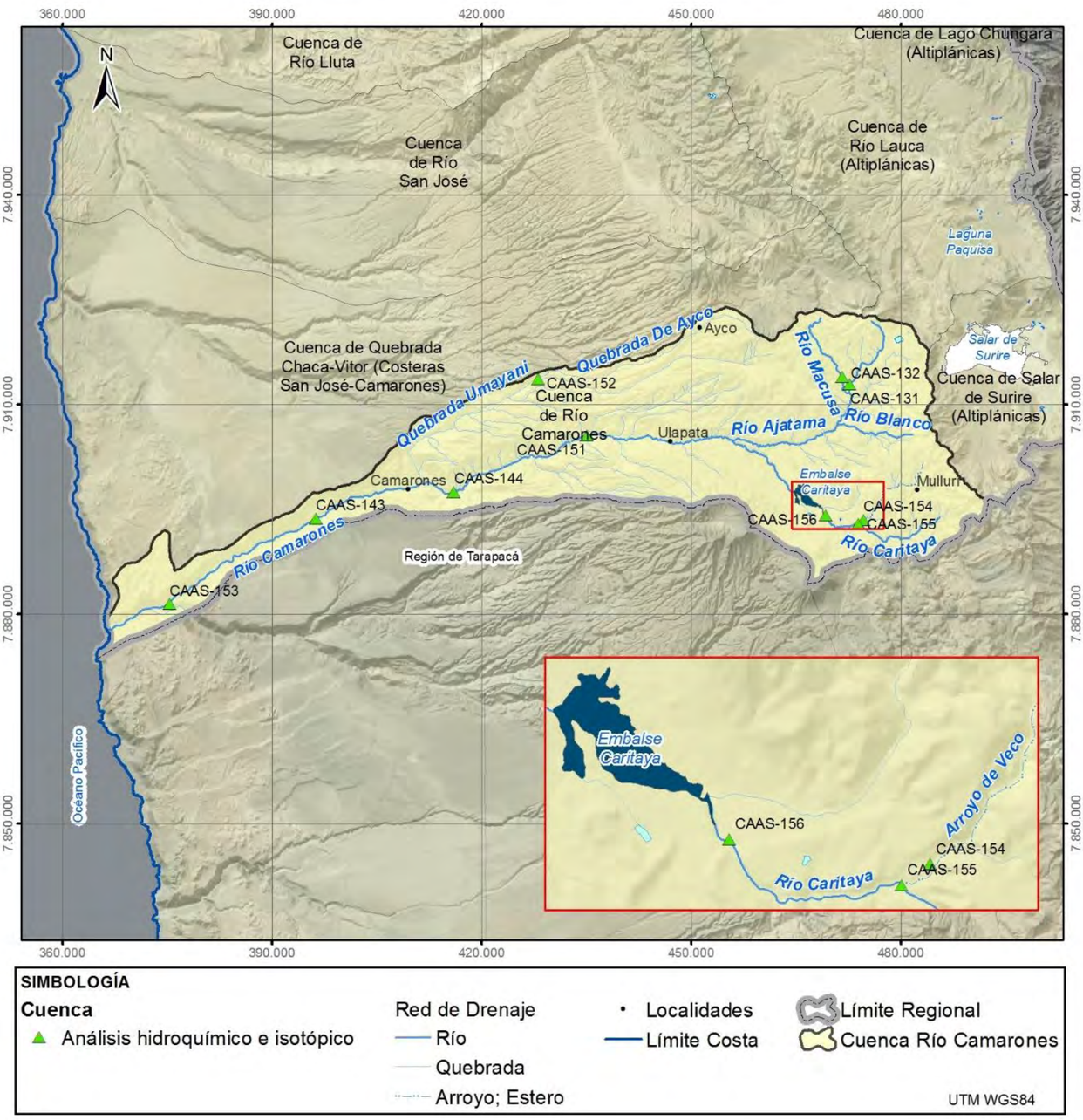


Figura 7.224 Ubicación de los puntos muestreados en la cuenca del río Camarones durante las campañas de muestreo efectuadas en el presente estudio. Fuente: elaboración propia.

7.6.4.3 Parámetros fisicoquímicos in situ

En la campaña de terreno se midieron los parámetros fisicoquímicos de las muestras que se tomaron para el análisis hidroquímico e isotópico. En esta sección se evalúan los valores de temperatura, pH, conductividad eléctrica y Sólidos Disueltos Totales (TDS) para caracterizar estos parámetros fisicoquímicos e identificar si existe una variación espacial de éstos en la cuenca del río Camarones.

TEMPERATURA

En la campaña realizada en agosto de 2016 se registró la temperatura más baja en el arroyo Veco (9,9°C) y la máxima en el río Camarones a la altura de Cuya (20,6°C). Se observa como el río Caritaya aumenta de temperatura al recibir el aporte de aguas hidrotermales de las lagunas de Amuyo, pasando de 12,6 a 16,2°C.

De los antecedentes existentes sólo se obtuvo la temperatura que registró GeoHidrología (2014) en las campañas realizadas en marzo y mayo de 2014. La temperatura medida en terreno varió entre 3,9 °C, en el arroyo de Veco, y 35,2°C en la laguna Verde. Destaca la alta temperatura que presentaron las lagunas, 23,5°C en la laguna Roja, 35,2°C en la laguna Verde y 24°C en la laguna Amarilla, esto posiblemente se debe al origen hidrotermal de dichas lagunas.

PH

En la Figura 7.225 se muestra la ubicación de los 42 puntos donde se registró el pH en el estudio de UTA (2010) y en la Figura 7.226 los 10 puntos de agua superficial muestreados en el presente estudio en la cuenca del río Camarones. El rango de pH en ambos estudios varió entre 3,5 a 8,6. En general las aguas del río Camarones son alcalinas, mientras que las aguas del río Caritaya son neutras o neutro-alcalinas y las aguas de la cabecera son ácidas, como los ríos Laruma (Anocarire (pH 3,9)), Macusa (5,8) y del río Blanco (pH 4,7).

En la campaña de muestreo realizada en el presente estudio en agosto de 2016 se comprobó que río Laruma (Anocarire (pH 3,9)) presenta aguas ácidas mientras que el río Macusa tiene aguas con pH 5,8. En el arroyo Veco se registró un pH 6,4 y a pocos

metros de este punto, en el río Caritaya un pH 8,2. Las aguas de la quebrada Umayani presenta un pH 6,4, siendo inferior al pH del río Camarones (pH 6,8-8,2).

Por otro lado, ConPotencial (2016) registró un pH en el río Camarones que variaba entre 7,8 y 8,47, siendo un pH medio de 8, por lo que son aguas alcalinas.

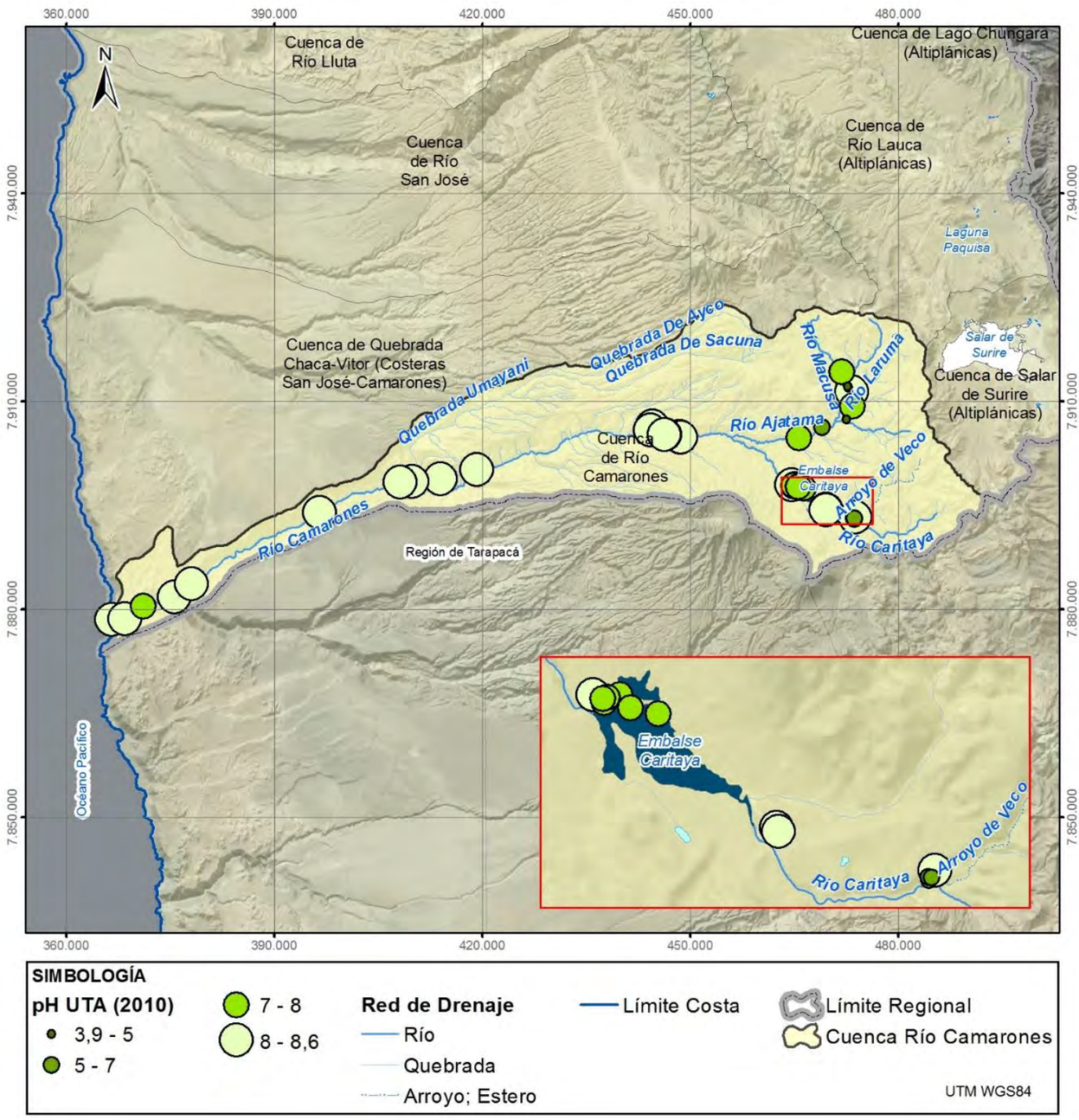


Figura 7.225 Distribución de los valores de pH de las muestras tomadas por la UTA (2010) en la cuenca del río Camarones. Fuente: elaboración propia.

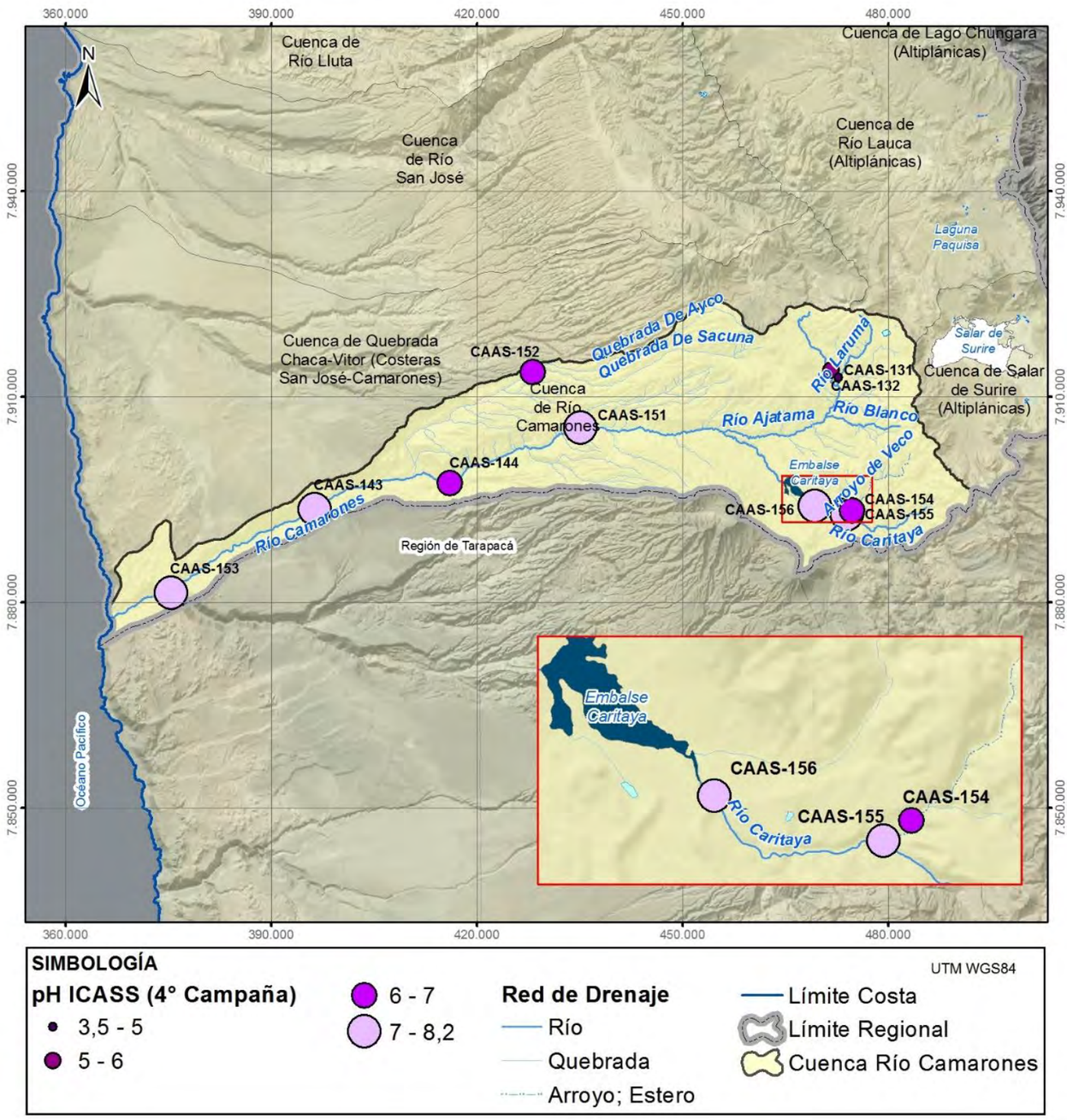


Figura 7.226 Distribución de los valores de pH de las muestras tomadas en agosto de 2016 en la cuenca del río Camarones. Fuente: elaboración propia.

CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

En la Figura 7.227 se muestran los valores de conductividad eléctrica tomados en agosto de 2016 y en la Figura 7.228 en ConPotencial (2016). La variación de la conductividad eléctrica fue similar en ambos estudio, entre 178 y 5.720 µS/cm en agosto de 2016 y entre 358 y 4.330 µS/cm en ConPotencial (2016). Registrándose en ambos estudios el valor mínimo en el río Ajatama, sus afluentes (ríos Macusa y Laruma) y en el arroyo Veco y el valor máximo en el tramo bajo del río Camarones.

Se observa como la conductividad eléctrica va aumentando progresivamente a lo largo del río Camarones, en rojo, los valores máximos de conductividad, las aguas salobres ubicadas en el río Caritaya y en amarillo las aguas dulces de los ríos y quebradas de la cabecera de la cuenca.

En agosto de 2016 se midió la conductividad eléctrica en la quebrada Umayani, registrándose un valor de 1.890 µS/cm.

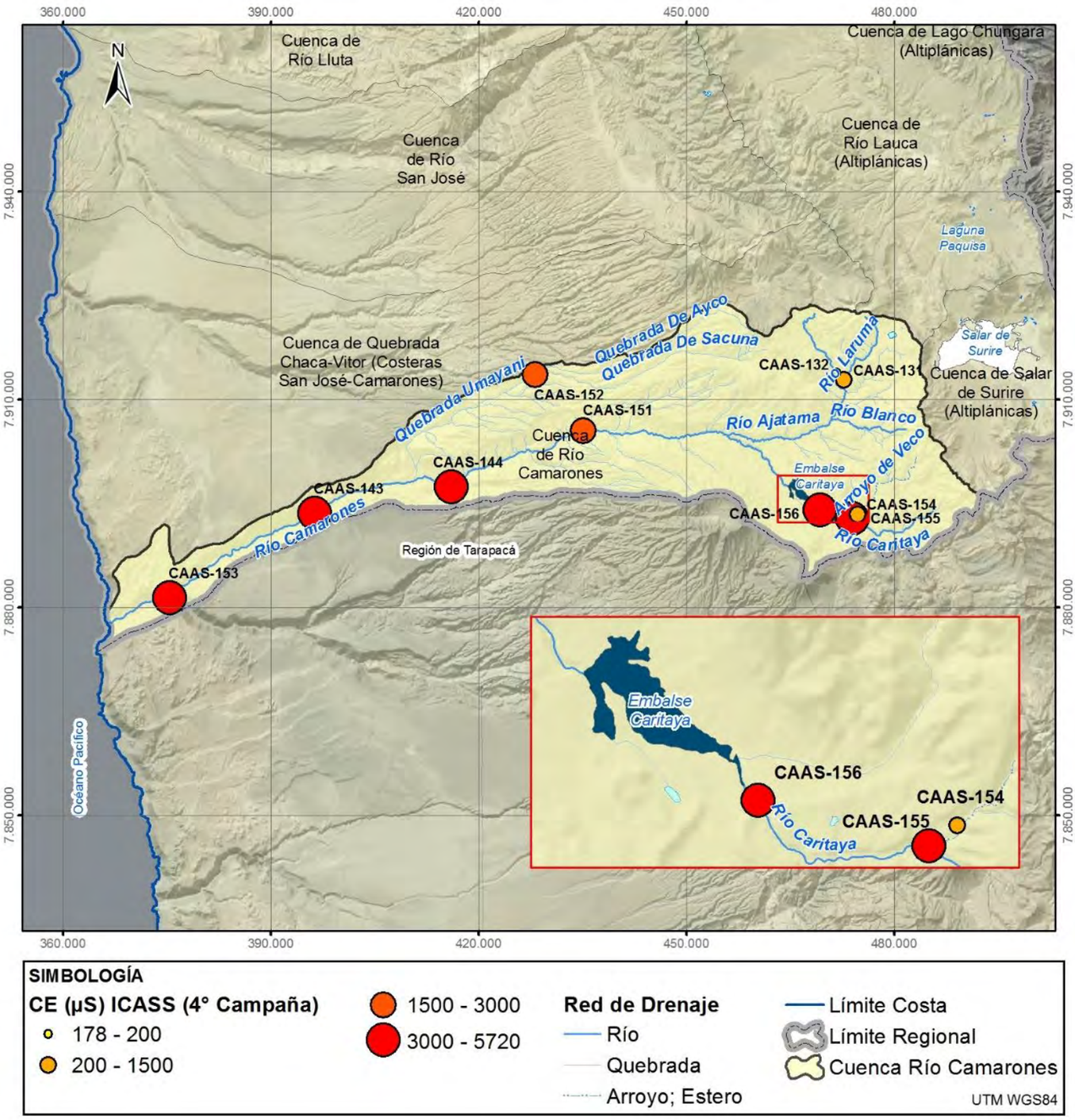


Figura 7.227 Distribución de la conductividad eléctrica de las muestras tomadas en agosto de 2016 en la cuenca del río Camarones. Fuente: elaboración propia.

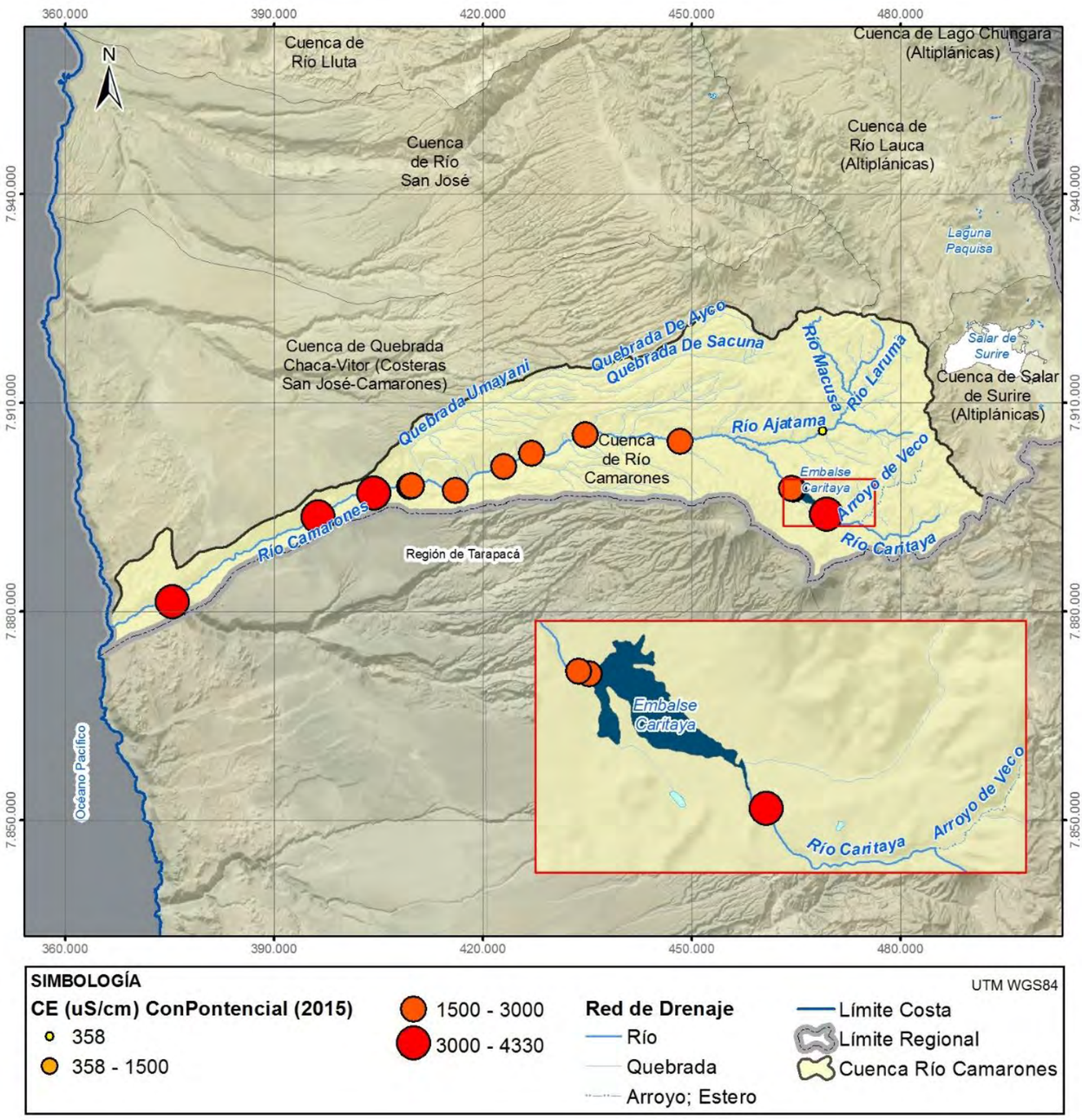


Figura 7.228 Distribución de la conductividad eléctrica de las muestras tomadas por ConPotencial (2016), septiembre de 2015. Fuente: modificado de ConPotencial (2016).

En la Figura 7.229 se muestra la distribución de la conductividad eléctrica en la subcuenca del río Caritaya, registrada en GeoHidrología (2014). Del mismo modo que en el muestreo de agosto de 2016 realizado en el presente estudio, los valores mínimos de conductividad eléctrica se registraron en el arroyo Veco, de 300 µS/cm, y los máximos se presentaron en una quebrada al norte, de 19.690 µS/cm, y en las lagunas, de 18.450 µS/cm. El aporte de agua fresca del arroyo de Veco provocó un descenso en la conductividad eléctrica en el río Caritaya, pasando de 4.050 a 3.500 µS/cm después de la confluencia con el arroyo Veco.

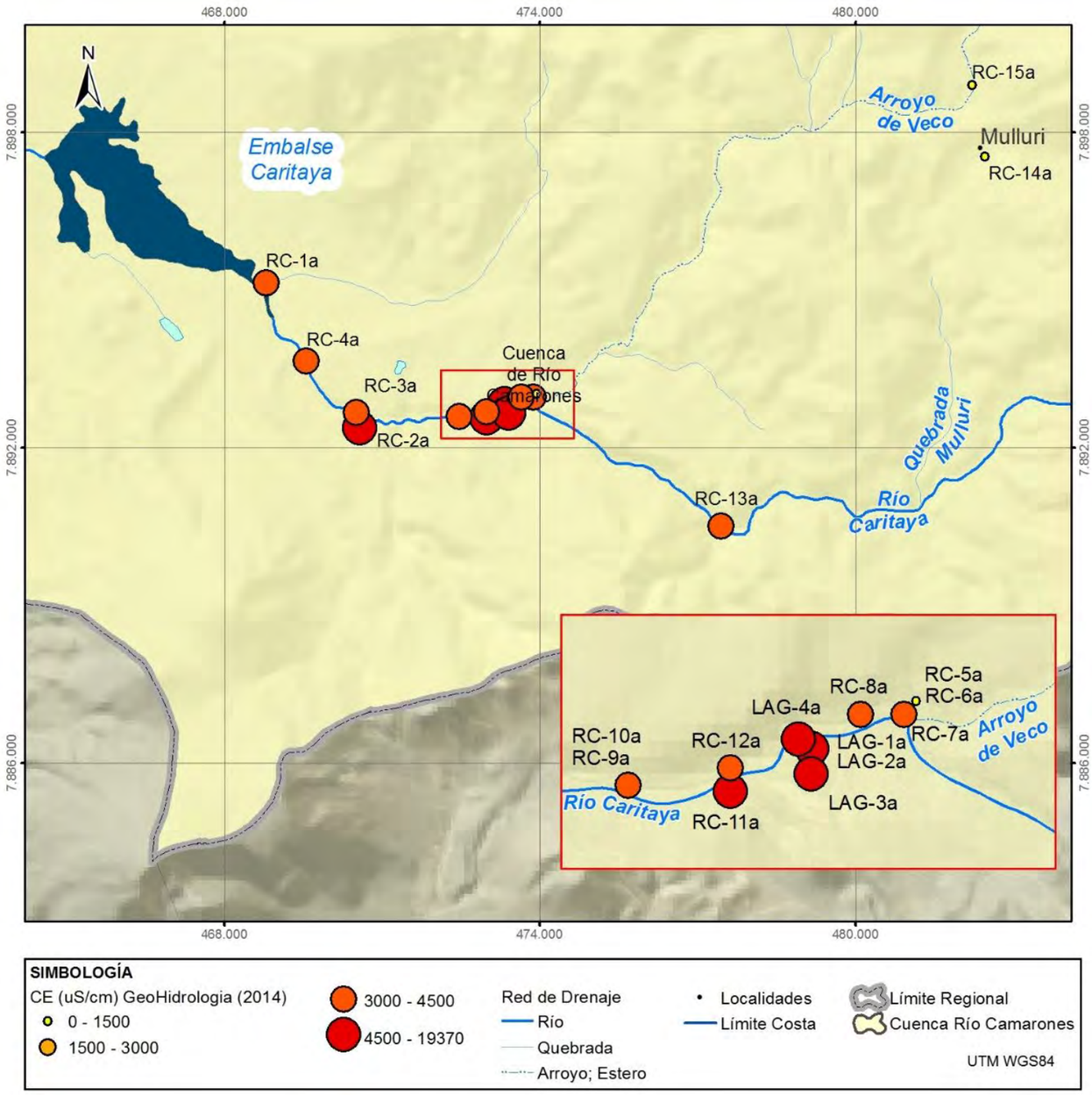


Figura 7.229 Distribución de la conductividad eléctrica de las muestras analizadas por GeoHidrología (2014) en marzo de 2014. Fuente: modificado de GeoHidrología (2014).

SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES

Los valores de sólidos disueltos totales (TDS) variaron entre 114 y 3.660 mg/L en la campaña realizada en agosto de 2016.

7.6.4.4 Modelo hidroquímico de las aguas

Los valores máximos y mínimos del error del balance iónico de la composición química entregada por el laboratorio varían entre -7,69% y 2,13%, excepto la muestra CAAS-131 que presenta un error del -19,4% debido a ser agua ácida.

ANÁLISIS DE FACIES QUÍMICAS

El río Camarones nace de la confluencia de los ríos Ajatama, que escurre desde el noreste, y el río Caritaya, que proviene del sureste. El río Ajatama y sus tributarios son aguas frescas, sulfatadas cálcicas poco mineralizadas mientras que las lagunas de Amuyo son fuentes hidrotermales que aportan al río Caritaya y que son de tipo cloruradas sódicas con un elevado nivel de arsénico, boro y sales disueltas, según los antecedentes existentes y la campaña realizada en agosto de 2016 en la cuenca del río Camarones.

En los diagramas Piper y Schoeller-Berkaloff de la Figura 7.230 se presenta de color naranja las muestras tomadas en los ríos tributarios del río Ajatama (cabecera de la cuenca), de color azul las aguas del río Camarones, de rojo las aguas de la quebrada Umayani, de color verde la muestra tomada en el arroyo Veco y de color morado las aguas del río Caritaya. La composición hidroquímica de las aguas analizadas indica que las aguas de los ríos Caritaya y Camarones y de la quebrada Umayani son aguas cloruradas sódicas, y las más mineralizadas de la cuenca. El arroyo Veco también es agua clorurada sódica, pero con mayor cantidad de calcio y menos mineralizadas que las anteriores. Por otro lado, en la zona alta de la cuenca el río Laruma (Anocarire), correspondiente a la muestra CAAS-131, son aguas sulfatadas cálcicas mientras que el río Macusa, correspondiente a la muestra CAAS-132, son aguas sulfatadas cálcico-sódicas, en el que ambas son muy poco mineralizadas.

En el Anexo VIII se interpretan los análisis realizados por GeoHidrología (2014) en la subcuenca del río Caritaya y por ConPotencial (2016) en el río Camarones. Como

resultado de estos antecedentes se entrega que las aguas de las lagunas de Amuyo presentan facies cloruradas sódicas y de alto contenido en elementos mayores, reflejo de su origen hidrotermal, mientras que una fuente meteórica alimenta las aguas frescas del arroyo de Veco, con escaso aporte hidrotermal o de lixiviación de zonas de alteración, sugiere Geohidrología (2014). Las aguas salobres cloruradas sódicas del río Caritaya se originan por aportes de aguas meteóricas que lixivian zonas de alteración y reciben aportes de afloramientos hidrotermales directos de las lagunas de Amuyo.

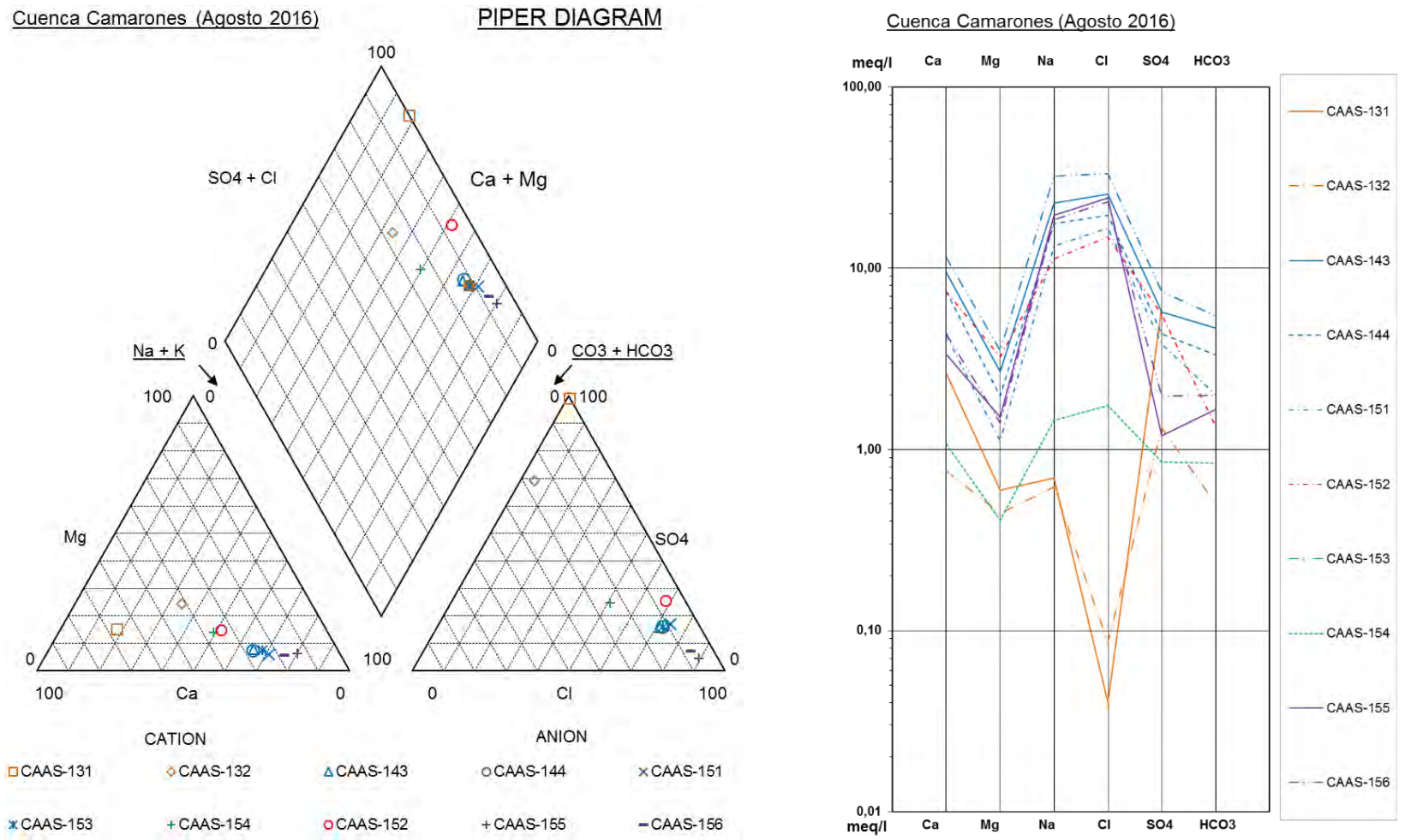


Figura 7.230 Diagramas de Piper y de Schoeller-Berkaloff con los datos obtenidos en la cuarta campaña de muestreo de agosto de 2016 en la cuenca el río Camarones. Fuente: elaboración propia.

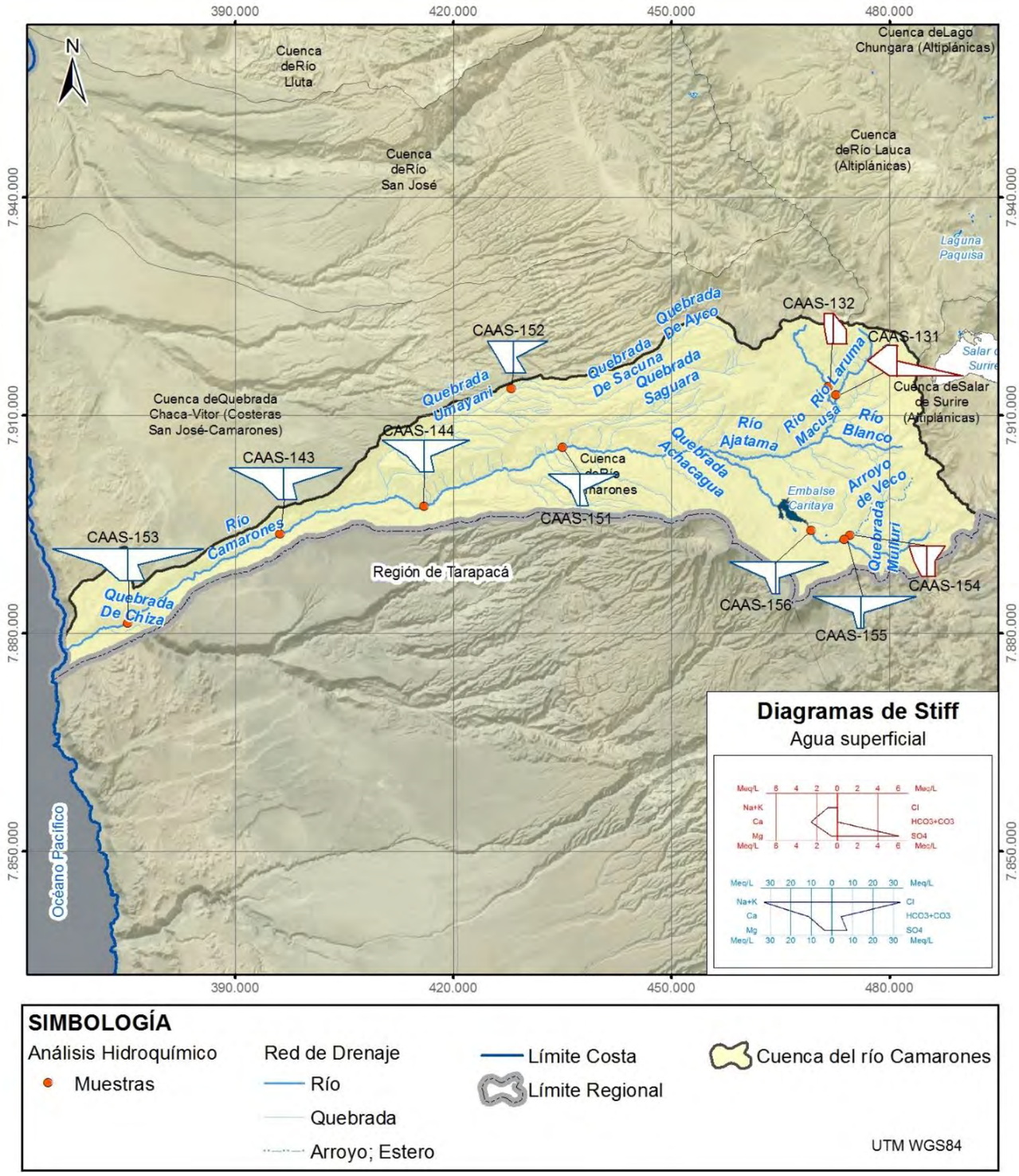


Figura 7.231 Mapa con los diagramas de Stiff de la composición química de las muestras recogidas en la cuenca del río Camarones en agosto de 2016. Fuente: elaboración propia.

En el Anexo VIII se presentan los gráficos del contenido de elementos mayoritarios y minoritarios obtenidos en el análisis realizado en agosto de 2016. Ninguna muestra presentó niveles de zinc, plomo, mercurio, cromo, cianuro, cadmio y amonio, sin embargo la muestra CAAS-151 presenta 0,015 mg/l de selenio y las muestras CAAS-151 y CAAS-131 contienen 0,01 y 0,02 mg/l de cobre respetivamente.

Las muestras CAAS-131 y CAAS-132 son aguas que corresponden a los ríos Laruma y Macusa que nacen en la falda del volcán Anocarire, sin embargo la muestra del río Macusa (CAAS-132) presenta muy baja mineralización mientras que la muestra del río Laruma (CAAS-131) presenta un alto contenido de aluminio, cobre, hierro, manganeso y sílice, comparado al resto de muestras analizadas en la cuenca del río Camarones.

Por otro lado, si se compara el contenido de elementos entre las aguas del arroyo Veco y del río Caritaya antes y después de las lagunas Amuyo, se aprecia que las aguas del arroyo son aguas muy poco mineralizadas mientras que el río Caritaya tiene mayor contenido de elementos. Sin embargo, en las aguas del río Caritaya se identifica la influencia del aporte de aguas de las lagunas Amuyo al incrementar el contenido de sulfatos, arsénico y calcio y el descenso de boro y silicio.

El río Camarones sufre un aumento progresivo del contenido de boro, arsénico, bromuro, calcio, cloruros, conductividad eléctrica, fluoruros, magnesio, manganeso, potasio, sulfatos, sodio y sólidos disueltos totales a lo largo del cauce hasta su desembocadura.

Evolución de la composición química de las aguas

En la cabecera de la cuenca, los ríos Laruma y Macusa nacen en la falda del volcán Anocarire. El río Laruma se caracteriza por presentar aguas ácidas (pH 3,9), sulfatadas cálcicas mientras que el río Macusa son aguas neutras (pH 5,9), sulfatadas cálcico-sódicas, en el que ambas están muy poco mineralizadas. Pero el río Laruma presenta los niveles de hierro, manganeso, cobre, aluminio, silicio más altos de la cuenca. Esta diferencia entre aguas posiblemente se debe a que el río Laruma drena por un sector del volcán Anocarire que sufrió alteración hidrotermal.

En la subcuenca del río Caritaya se caracterizan por ser aguas clorurada sódicas. El arroyo de Veco son aguas neutras, dulces y poco mineralizadas mientras que el río

Caritaya son aguas alcalinas, salobres y mineralizadas. El río Caritaya recibe las aguas hidrotermales de las lagunas de Amuyo. Estas aguas de origen hidrotermal que aportan al río Caritaya un elevado nivel de arsénico, boro y sales disueltas.

En la parte baja de la cuenca, según Custodio, E. y Llamas, M.R (2001) en ConPotencial (2016), el alto nivel de cloruros podría estar asociado al efecto de lavado de terrenos de origen marino, en el que las aguas congénitas y fósiles pueden aportar cantidades importante (Al existir una escasa extracción de agua subterránea en la cuenca, se descarta el efecto de la intrusión marina como el origen del alto contenido en cloruros.

Las aguas superficiales del río Camarones son cloruradas sódicas y va aumentando el grado de mineralización de las aguas desde la estación de aforo Chilpe hacia la desembocadura al océano Pacífico.

7.6.4.5 Calidad de las aguas

La composición hidroquímica de las 10 muestras de agua superficial tomadas en la cuenca del río Camarones en agosto de 2016 fue comparada con la norma chilena para agua potable NCh 409. De esta comparación se obtuvo que las aguas analizadas no son aptas para el consumo humano, excepto la muestra tomada en el río Macusa (CAAS-152). El resto de muestras superan los límites de arsénico, cloruros, hierro, manganeso, selenio, sólidos disueltos totales y/o pH que establece la norma NCh 409.

Por otro lado, se comparó la composición hidroquímica de las muestras con los límites de aluminio y boro determinados en la norma de riego NCh 1.333. Resultó que la muestra tomada en el río Macusa (CAAS-152) no supera los límites, por lo que son aguas aptas para el riego, mientras que la muestra correspondiente al río Laruma (CAAS-131) sobrepasó el nivel de aluminio y el resto de muestras superó el nivel de boro indicado en la norma NCh 1.333.

En el Anexo VIII se presentan los resultados de las mediciones de parámetros *in situ* y análisis de laboratorio, y dentro de cada tabla se remarcaron en rojo aquellos valores que sobrepasan la norma chilena para uso de agua potable NCh 409 y en verde los resultados de aluminio y boro que superen los límites establecidos en la norma de riego NCh1.333.

7.6.4.6 Isotopía de las aguas

La composición isotópica de oxígeno 18 ($\delta^{18}O$) y deuterio (δD) de las aguas de la cuenca del río Camarones fue estudiada por ConPotencial (2016) y por GeoHidrología (2014). En la Figura 7.232 se muestra la ubicación de las 11 muestras tomadas por Con Potencial (2016), las 6 muestra recogidas por GeoHidrología (2014) y las 10 muestras tomadas en agosto de 2016 en el presente estudio.

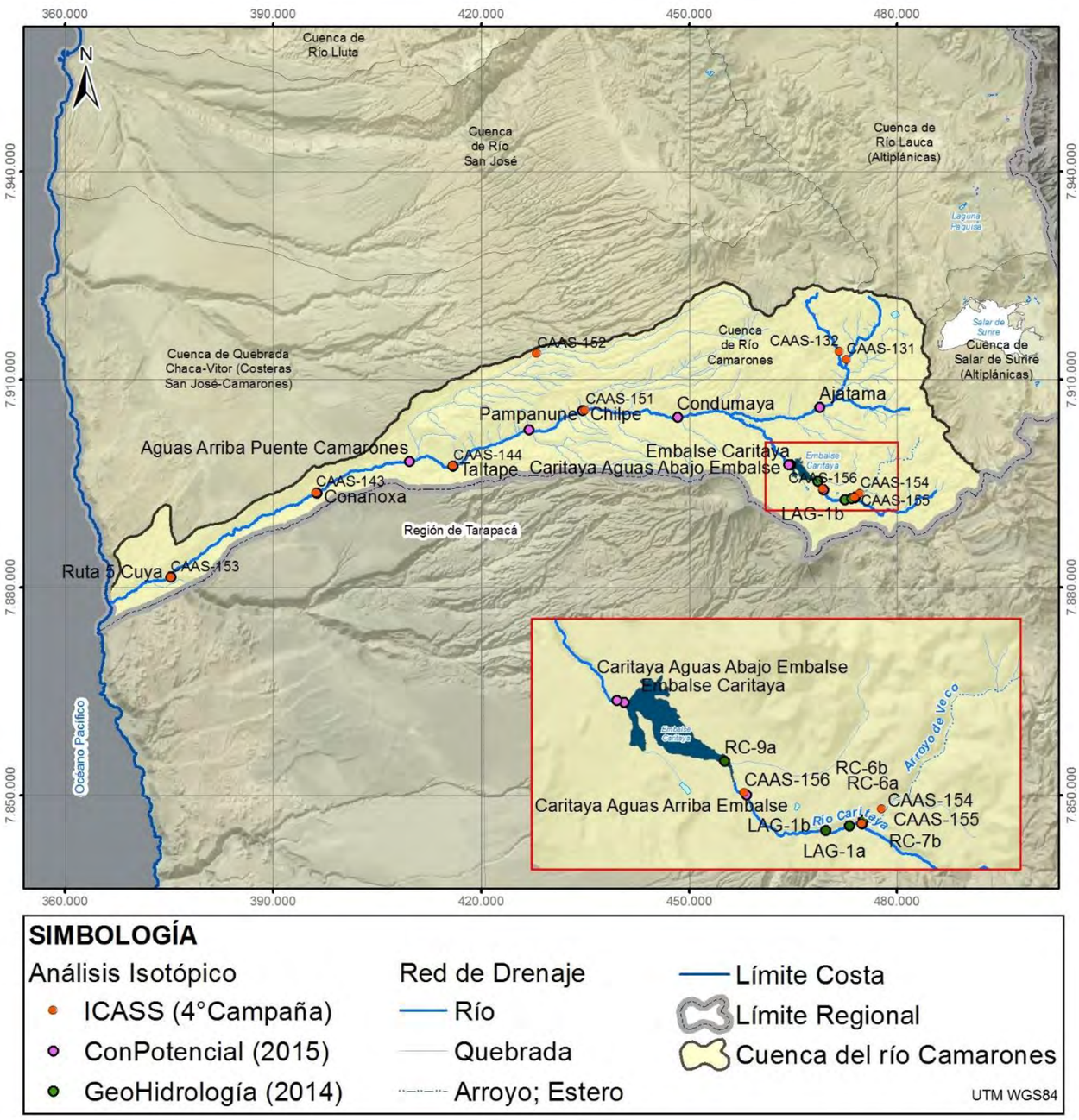


Figura 7.232. Ubicación de las muestras analizadas isotópicamente en los antecedentes en la cuenca del río Camarones. Fuente: elaboración propia.

A continuación se reinterpretaron los resultados obtenidos en los antecedentes y en la campaña efectuada en agosto de 2016 en el presente estudio. De esta base de datos de 17 muestras el valor de $\delta^{18}O$ varía entre -6,47 y -10,92 ‰VSMOW y de δD entre -54,8 y -78 ‰VSMOW y de las muestras analizadas en agosto 2016 el valor de $\delta^{18}O$ varía entre -6,98 y -11,74 ‰VSMOW y de δD entre -55,36 y -81,88 ‰VSMOW. En la Figura 7.233 se diferencian 4 grupos de muestras, las muestras representadas en color azul son aguas que se encuentran entre la Recta Meteórica Local ($\delta D = 7,9\delta^{18}O + 14$) que desarrollaron en Herrera *et al*. (2006) para la cuenca del lago Chungara y la Recta Meteórica Mundial (RMM), las muestras en color naranjo se alejan de la RMM en un línea horizontal, las muestras en rojo se alejan de las rectas y el resto de muestras en color verdoso se localizan entre las rectas de pendiente 4 y 6,5. Por otro lado, de color azul se representa el río Ajatama y de color morado sus tributarios, ríos Macusa y Laruma.

Las muestras que se encuentran entre la RML y la RMM son aguas meteóricas que corresponden al río Ajatama, al arroyo de Veco (RC-6 a y b) y el curso alto del río Caritaya antes del embalse (RC-7b), que no sufrieron ningún proceso de alteración, y que son aguas meteóricas. La muestra más liviana de la cuenca corresponde a las aguas del río Macusa indicando zonas de recarga en altas cotas mientras que la composición isotópica del río Laruma refleja la interacción con las zonas de alteración hidrotermal.

La composición isotópica de las aguas de las lagunas Amuyo, laguna Roja, corresponden a las muestras LAG1 a y LAG1 b. Estas aguas fueron sometidas a un intercambio geotermal de oxígeno, provocando que el valor de deuterio no varíe, por lo que se desplazan horizontalmente en la gráfica. Estas aguas hidrotermales cambian el patrón isotópico de las aguas del río Caritaya aguas arriba del embalse (RC-9a), ya que son muestras muy próximas a la RMM, pero se desplazan horizontalmente en la gráfica.

El río Caritaya aguas abajo del embalse, el río Camarones y la quebrada Umayani presentan una composición isotópica de $\delta^{18}O$ y δD que se localizan entre las rectas de pendiente 4 y 6,5, es decir, son aguas evaporadas, específicamente con poca humedad. Estas aguas sufrieron evaporación desde lámina libre en el embalse de Caritaya y en el curso del río, enriqueciéndose con isótopos pesados. ConPotencial

(2016) identifica una tendencia a cambiar la pendiente de evaporación, dada la humedad presente en la parte baja de la cuenca producida por la camanchaca.

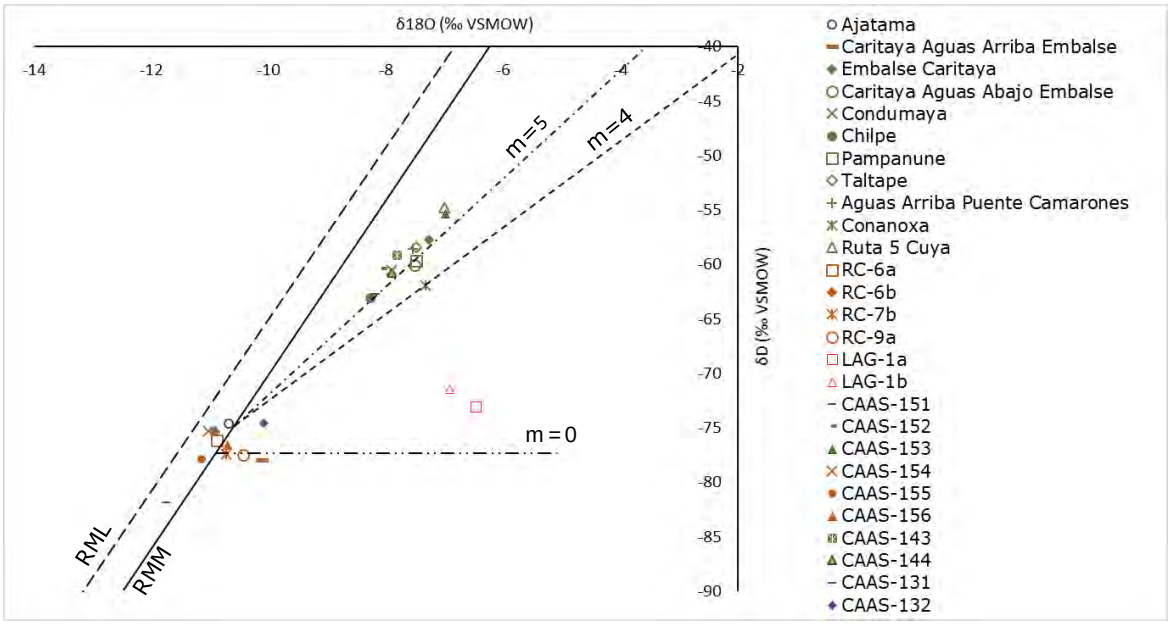


Figura 7.233. **Relación $\delta^{18}O/\delta D$ de las muestras analizadas en los** antecedentes en la cuenca del río Camarones. Fuente: elaboración propia.

7.6.5 Modelo Conceptual

La cuenca del río Camarones drena una superficie que alcanza los 2.223 km^2. Limita por el norte con la cuenca de la quebrada Vítor, por el sur con la quebrada Tana o Camiña, hacia el este limita con la cuenca del Salar de Surire y por el oeste con el océano Pacífico. El río Camarones nace a la altura de los 2.900 msnm de la confluencia entre los ríos Caritaya y Ajatama. La cuenca del río Camarones es la única de la región que cuenta con una obra de regulación, el Embalse Caritaya, cuyo funcionamiento defectuoso se ha debido a las filtraciones que poseía, por lo que fue objeto de un programa de reparaciones llevado a cabo por la DOH, que finalizó el año 2009, y cuya capacidad del embalse reportada en el estudio SDT N° 306 (DEP-DGA, 2010) es de 42.171.000 m^3.

Los principales usos del suelo en la cuenca del río Camarones son áreas sin vegetación (85%), praderas matorrales (10%) y terrenos agrícolas (5%), por lo tanto, la evapotranspiración desde el suelo juega un papel importante como principal pérdida natural de la precipitación antes de llegar a la superficie.

Las mayores precipitaciones registradas en la cuenca se presentan en la parte media-alta y disminuyen con el gradiente altitudinal hacia la costa. La precipitación media anual en la cuenca, estimada a partir del método de las isoyetas es de 121 mm/año.

El agua que precipita en la parte media-alta, escurre superficialmente por los cauces y una parte es retenida en las depresiones. La porción de agua que logra infiltrarse es la que recarga al acuífero. La escorrentía superficial se presenta en forma continua en la parte alta y media de la cuenca, y en un pequeño arroyo en la parte baja, con caudales medios anuales de 450 l/s en la quebrada Ajatama antes de confluencia, de 340 l/s en río Caritaya en Caritaya, de 1.120 l/s en río Camarones en Chilpe, y de 560 l/s en río Camarones en Conanoxa. El respaldo hidrológico de la escorrentía continua del río Camarones, se encuentra en la parte alta de la cuenca y fundamentalmente localizada en los tributarios Ajatama y Caritaya, en el que parte de las precipitaciones infiltran y se acumulan a través de fracturas en las cadenas de volcanes que limitan la cuenca, creando acuíferos colgados y/o recargando a otras unidades hidrogeológicas.

La unidad de mayor importancia hidrogeológica en la cuenca corresponde a los depósitos aluviales y fluviales del Holoceno y depósitos litorales. Estos depósitos son materiales detríticos no consolidados que se caracterizan por ser un medio con permeabilidad primaria y de carácter libre. Mediante la interpretación de pruebas de bombeo efectuadas en los pozos existentes en el acuífero se determinó una transmisividad que varía entre 11 y 100 m^2/día, una conductividad hidráulica entre 0,2 y 2,5 m/día y un almacenamiento de 10 al 50%.

La piezometría de la cuenca del río Camarones presenta una dirección este-oeste, desde las cotas altas hacia la línea de costa. Las zonas de recarga se encuentran en la cabecera de la cuenca, donde parte de estas aguas afloran y circulan superficialmente a lo largo de la cuenca, atravesando unidades hidrogeológicas de moderada a baja transmisividad, hasta recargar el acuífero detrítico cuaternario asociado al río en el sector bajo de la cuenca.

Las aguas superficiales de la cuenca del río Camarones presentan diferentes facies hidroquímicas. En la cabecera de la cuenca, el río Laruma se caracteriza por presentar aguas ácidas, sulfatadas cálcicas mientras que el río Macusa son aguas neutras, sulfatadas cálcico-sódicas, ambas muy poco mineralizadas. Esta diferencia entre aguas

es debido a que el río Laruma drena por un sector del volcán Anocarire que sufre alteración hidrotermal.

En la subcuenca del río Caritaya se caracterizan por ser aguas clorurada sódicas. El arroyo de Veco son aguas neutras, dulces y poco mineralizadas mientras que el río Caritaya son aguas alcalinas, salobres y mineralizadas. El río Caritaya recibe las aguas hidrotermales de las lagunas de Amuyo, las cuales aportan un elevado nivel de arsénico, boro y sales disueltas. En la Figura 7.234 se observa la laguna roja de Amuyo ubicada en el río Caritaya.

Las aguas superficiales del río Camarones son cloruradas sódicas y va aumentando el grado de mineralización de las aguas desde la estación de aforo Chilpe hacia la desembocadura al océano Pacífico.

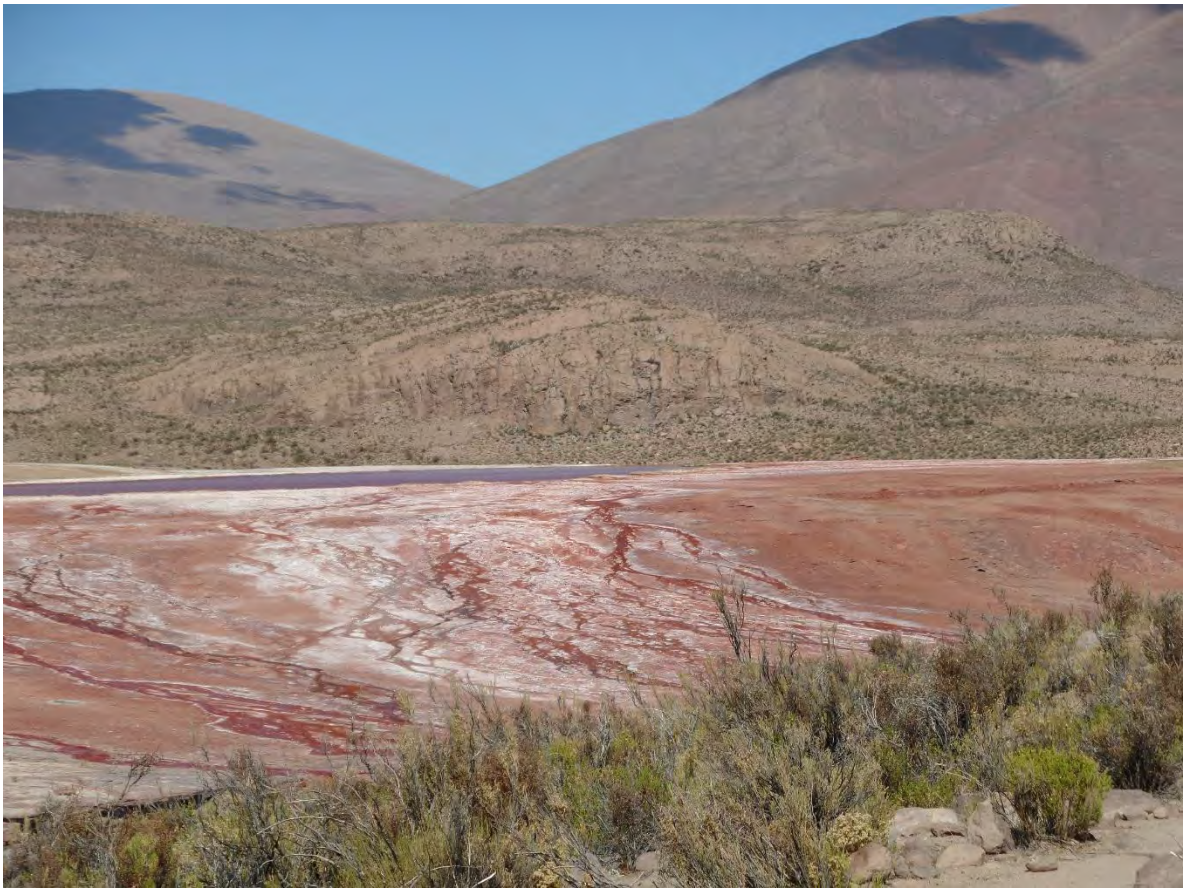


Figura 7.234 Laguna roja de Amuyo. Fuente: elaboración propia.

En la parte baja de la cuenca, ConPotencial (2016), sugiere que el alto nivel de cloruros podría estar asociado al efecto de lavado de terrenos de origen marino, las

aguas congénitas y fósiles pueden aportar cantidades importante de cloruros. Al existir una escasa extracción de agua subterránea en la cuenca, se descarta el efecto de la intrusión marina como el origen del alto contenido en cloruros.

El análisis de la calidad de las aguas indica que las aguas analizadas no son aptas para el consumo humano a lo largo de la cuenca, excepto la muestra tomada en el río Macusa.

En la Figura 7.235 se muestra el esquema del modelo conceptual de la cuenca del río Camarones, cuyas entradas principales estarían dadas por las precipitaciones y recargas al acuífero. En ésta se muestra que las recargas principales al acuífero son la infiltración de la precipitación y el aporte desde los ríos al acuífero, siendo el principal el río Camarones. Por otro lado, las principales salidas corresponden a los canales de riego de cultivos, a la evapotranspiración de las zonas de cultivo y praderas, a la explotación de recursos hídricos subterráneos en las captaciones para el riego de cultivos y para agua potable, y la descarga subterránea hacia el océano Pacífico. En menor magnitud, existen afloramientos de agua fría a lo largo de la cuenca y de aguas hidrotermales, que dan originan a las lagunas Amuyo.

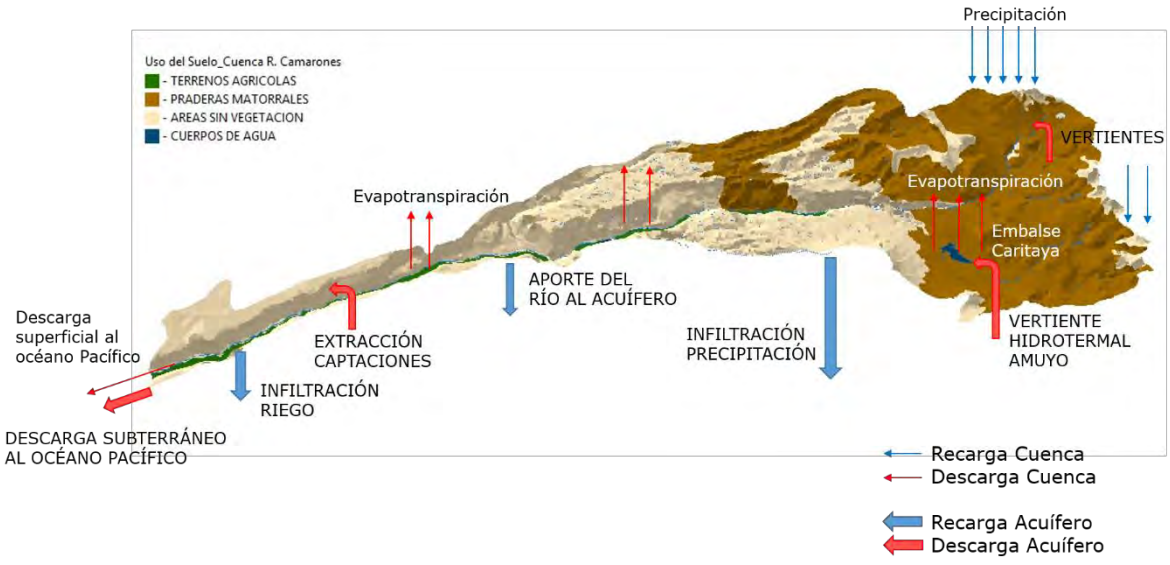


Figura 7.235 Esquema del modelo conceptual hidrogeológico de la cuenca del río Camarones. Fuente: modificado de la capa uso del suelo tomada del portal web del SINIA http://ide.mma.gob.cl/.

7.7 Cuenca de los Ríos Uchusuma y Caquena

En el estudio Dictuc (2008), se agrupan las cuencas del río Caquena con la del río Uchusuma por pertenecer a un sistema mucho más grande y complejo que se desarrolla casi totalmente en Bolivia y drena hacia el lago Poopó. Fue definida considerando como punto de salida la desembocadura, después de su junta en el río Mauri. El área de drenaje de la cuenca de los ríos Uchusuma y Caquena es de 3.150 km^2, de donde aproximadamente el 42% (1.320 km^2) se desarrolla en territorio chileno.

En la Figura 7.236 se presenta la ubicación de la cuenca de los ríos Uchusuma y Caquena y su red de drenaje.

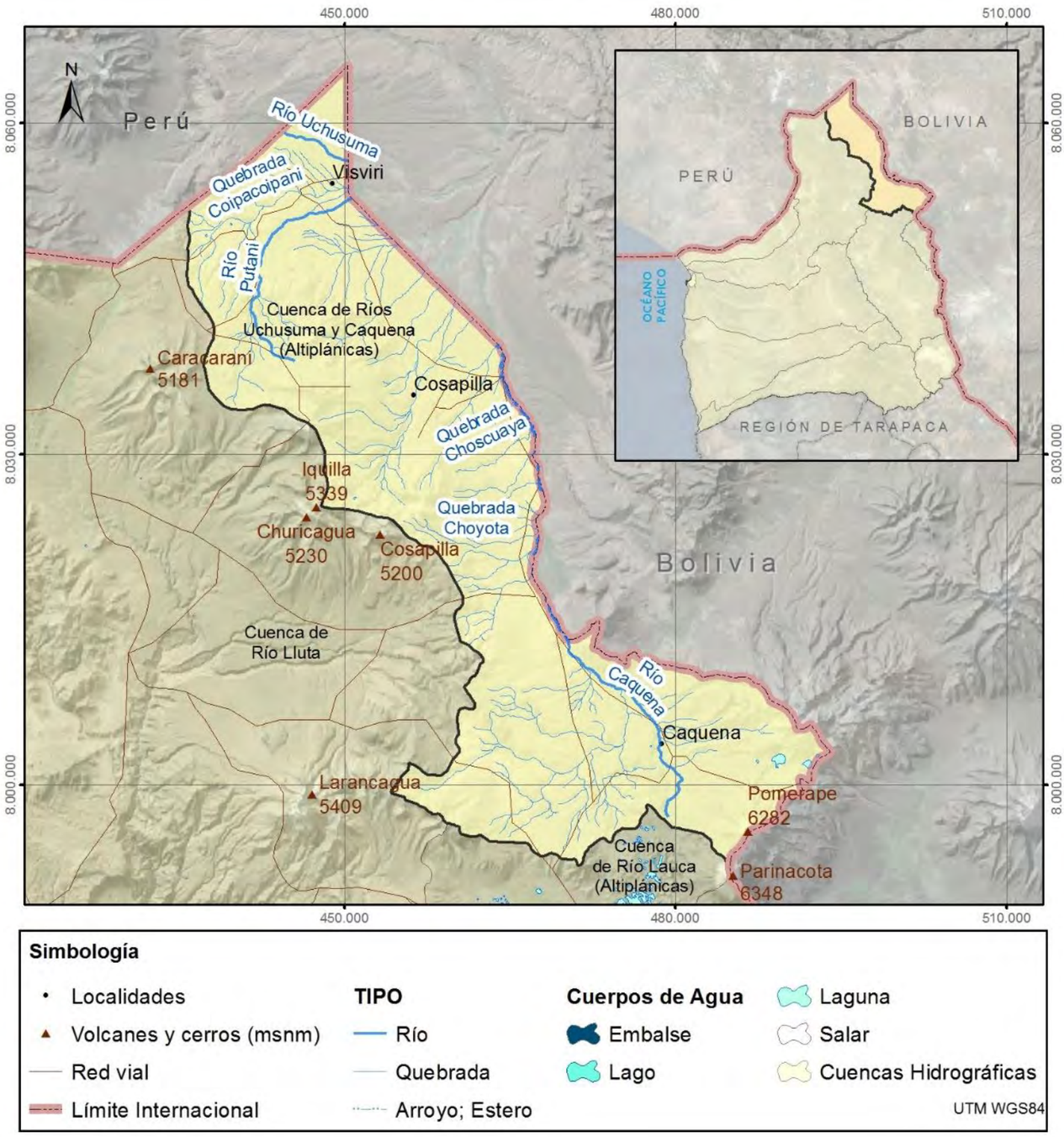


Figura 7.236 Ubicación de la cuenca de los ríos Uchusuma y Caquena. Fuente: elaboración propia.

7.7.1 Caracterización Hidrológica

El río Caquena, nace en los nevados de Payachata en territorio chileno y hace su recorrido de sur a norte, sirviendo en un tramo como frontera entre Chile y Bolivia, donde recibe por su ribera izquierda al río Cosapilla. Estando en territorio boliviano en aproximadamente 20 km aguas abajo se junta con el río Uchusuma y drena finalmente hacia el lago Poopó.

Por su parte, el río Uchusuma nace al sureste de Perú y atraviesa el territorio chileno antes de pasar a Bolivia y desembocar en el río Mauri. En territorio boliviano recibe como afluentes la Quebrada Coipacoipani y el río Putani, en las cercanías de la localidad de Charaña. Estando en territorio chileno, el río Uchusuma escurre en dirección Oeste – Este, con una leve inclinación Norte – Sur y en territorio boliviano, se curva hacia el Norte antes de juntarse con el río Caquena.

Los cauces de esta cuenca presentan escurrimiento permanente, a pesar de que las precipitaciones se concentran en los meses estivales producto del llamado "invierno altiplánico". Descrito antes en el análisis regional.

7.7.1.1 Definición y caracterización de la cuenca de los ríos Uchusuma y Caquena

DELIMITACIÓN DE LA CUENCA

En la Figura 7.236 se muestra la delimitación y red de drenaje de la cuenca del río Caquena. El criterio utilizado para la delimitación se explicó en el apartado "Definición y Caracterización de las Cuencas de la Región" en el capítulo de "Análisis Regional". De manera resumida el criterio es básicamente topográfico.

CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS DE LA CUENCA

La morfología de la cuenca de los ríos Uchusuma y Caquena desarrollada en territorio chileno es un referente para establecer la dinámica esperada de la escorrentía superficial y se caracteriza por el análisis de tres parámetros, los relativos a la forma, al relieve y a la red de drenaje. Éstos se calcularon con el uso de SIG, además de utilizar expresiones matemáticas para este fin. La metodología se muestra en detalle en el Anexo VI.

En relación a la forma, la cuenca tiene un coeficiente de compacidad (K_G) de 1,93 por tanto su forma es rectangular. La densidad del drenaje de la cuenca de los ríos Uchusuma y Caquena definida como la longitud total de los cauces sobre el área de la cuenca, se calculó sólo para el área de la cuenca desarrollada en territorio chileno, en este caso fue de 0,23 km/km^2 que corresponde a una densidad de drenaje pobre.

Es necesario destacar que este parámetro representa la densidad de drenaje promedio en la cuenca, lo cual no excluye que existan cauces o quebradas al interior de la cuenca que dispongan de un drenaje muy desarrollado y por tanto, ocurra una respuesta rápida de transformación lluvia-escorrentía.

Para construir la curva hipsométrica de la cuenca fue necesario reclasificar las bandas del DEM y calcular las áreas acumuladas intermedias. Según la curva hipsométrica (Figura 7.237), la cuenca tiene una topografía variable iniciando desde la cota mínima de 3.958 msnm hasta la máxima de 6.342 msnm. Sin embargo, el 50% de la cuenca tiene una altura superior a 4.440 msnm.

De acuerdo a la metodología presentada en el Anexo VI, esta curva hipsométrica se clasifica de tipo C y corresponde a una cuenca sedimentaria que está en la fase de vejez.

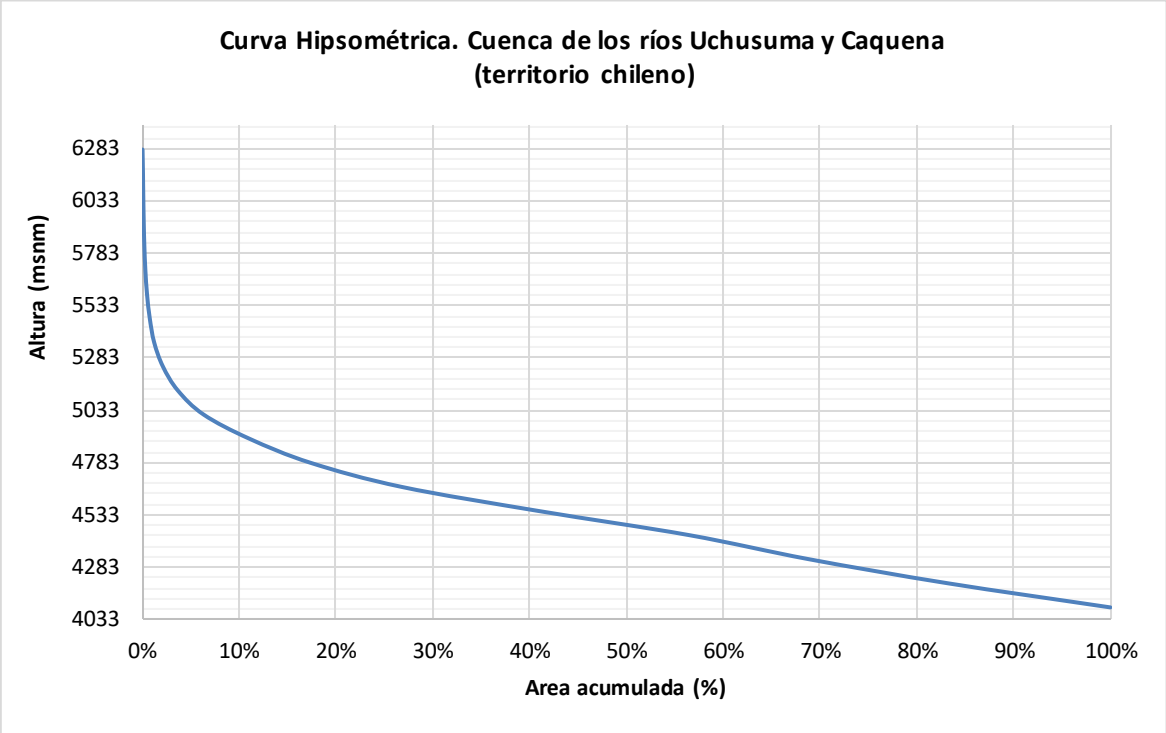


Figura 7.237 Curva hipsométrica de la cuenca de los ríos Uchusuma y Caquena. Fuente: elaboración propia.

7.7.1.2 Caracterización de la red de drenaje

El diagrama Unifilar de los ríos Uchusuma-Caquena se indica en la Figura 7.238. En este se incluye los ríos y las quebradas aportantes de mayor interés. Allí se referencia el caudal medio anual medido en las estaciones fluviométricas administradas por la DGA. Este diagrama considera estaciones vigentes y la estación suspendida Caquena en Nacimiento, dado que esta última presenta un buen registro entre 1987 y 2004, y entrega una buena referencia respecto al caudal en dicho punto.

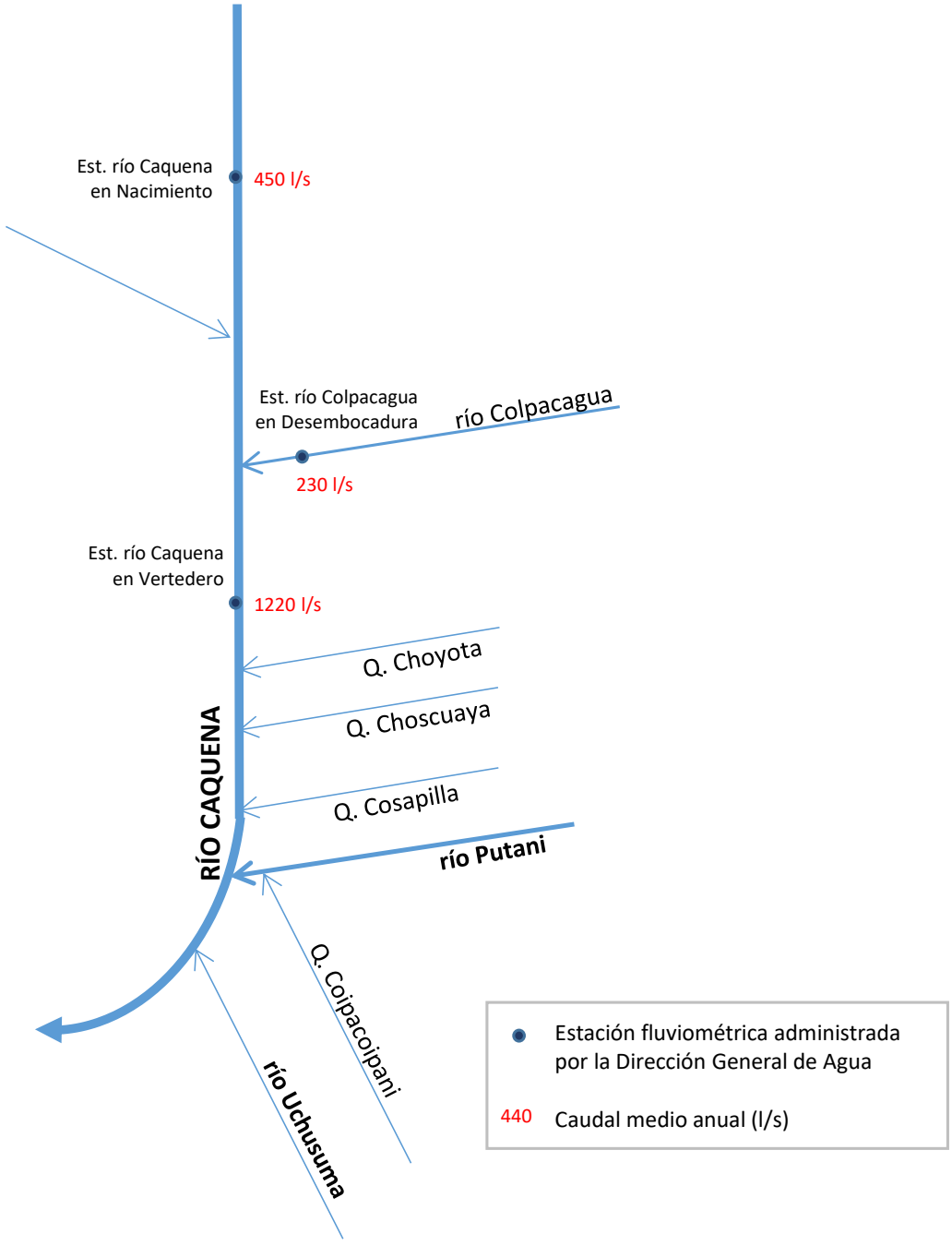


Figura 7.238 Diagrama unifilar de los ríos Uchusuma-Caquena. Fuente: elaboración propia.

7.7.1.3 Hidrometeorología

La cuenca de los ríos Uchusuma y Caquena cuenta con registros históricos de dos estaciones meteorológicas administradas por la DGA, Visviri y Caquena. Adicionalmente, la estación Parinacota Ex Endesa fue considerada como de influencia en la cuenca. Las coordenadas y periodos de información disponible de las estaciones se presentan en la Tabla 7.139. Cabe mencionar que las estaciones Caquena y Parinacota Ex Endesa cuentan con instrumentos de medición de las variables: temperatura, humedad relativa y evaporación. Algunos de ellos en la actualidad ya suspendidos.

En adelante el análisis de las variables hidrometeorológicas de la cuenca se realiza a nivel regional, con la finalidad de incluir un mayor número de estaciones localizadas en cuencas vecinas con características hidrológicamente similares.

Tabla 7.139 Coordenadas y periodo de información de las estaciones meteorológicas en la cuenca. Fuente: elaboración propia.

Estación Meteorológica DGA	Código BNA	UTM Este	UTM Norte	Altitud	Periodo	Años	Estado
VISVIRI	01000005-K	448.747	8.054.556	4.080	1970-2014	45	V
CAQUENA	01001005-5	478.658	8.003.810	4.400	1969-2014	46	V
PARINACOTA EX ENDESA *	01020017-2	471.626	7.987.205	4.420	1983-2014	32	V

V: Vigente. * Estación ubicada en la cuenca del río Lauca de influencia sobre la cuenca del río Caquena.

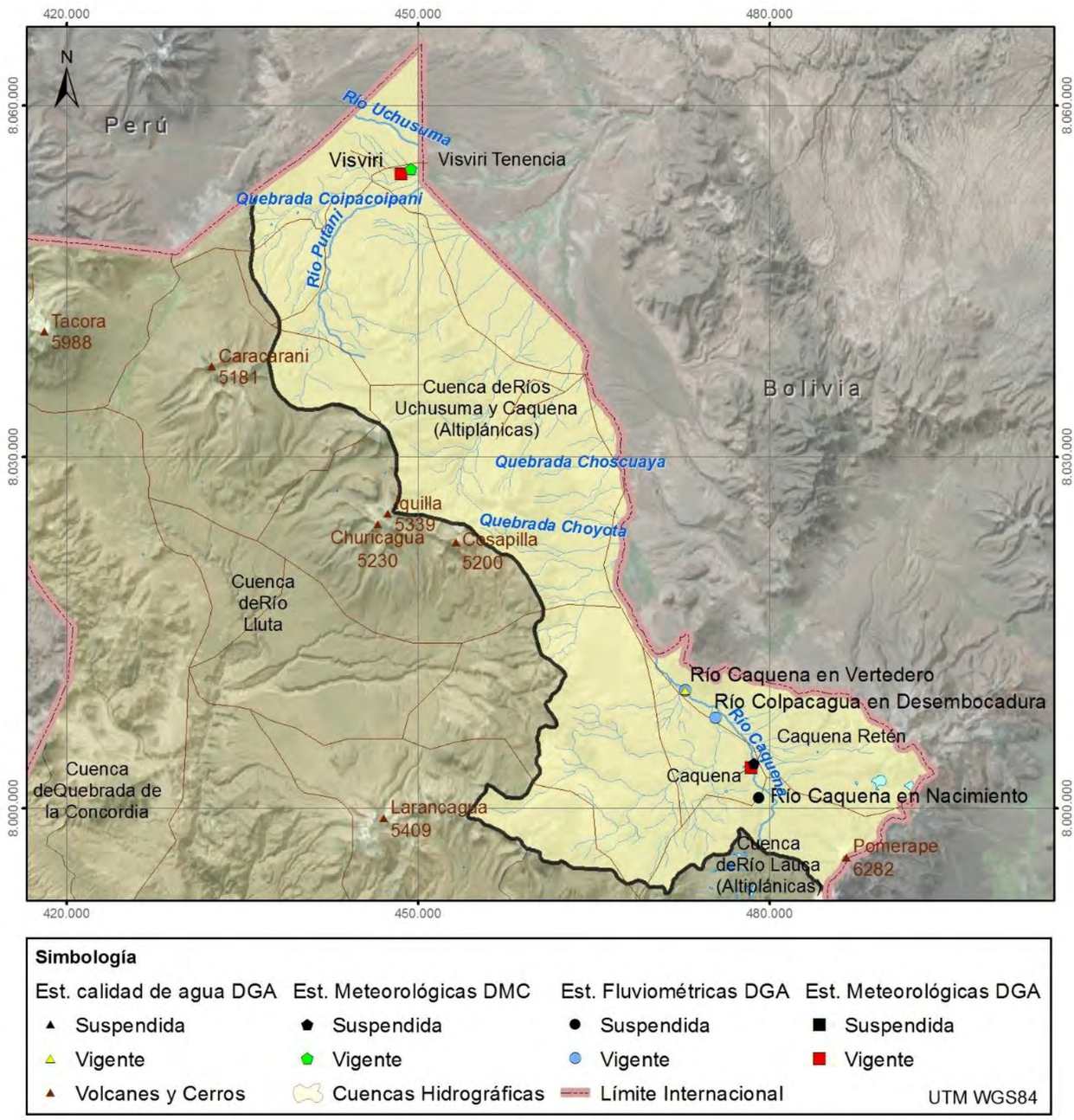


Figura 7.239 Ubicación estaciones de calidad de agua, fluviométricas y meteorológicas en la cuenca de los ríos Uchusuma y Caquena. Fuente: elaboración propia.

PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL Y MEDIA MENSUAL

Para el análisis de la precipitación media anual y media mensual se tomaron los registros de 30 años (periodo 1985 al 2014) de las estaciones pluviométricas existentes, que permiten analizar las variaciones de la precipitación. En la Figura 7.240 se presenta el registro de precipitación media anual en las estaciones Visviri [4.080 msnm] localizada cerca al límite demográfico Chile-Perú en dirección Oeste y Caquena [4.400 msnm] ubicada cerca de la cuenca del río Lauca en dirección Sur.

Se observa los años húmedos, secos y promedio que se han presentado en la cuenca. Los años más húmedos en el periodo analizado, han sido 1987, 1997, 1999, 2000, 2001, 2005, 2011 y 2012. Por el contrario los años más secos en los últimos 30 años, fueron 1992, 2009 y 2010.

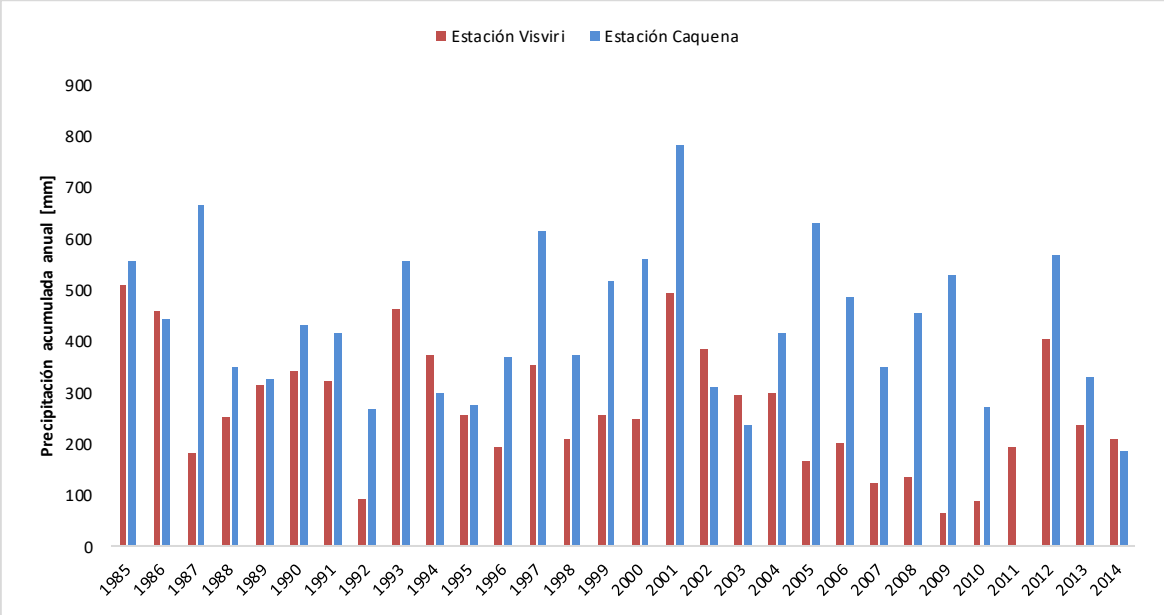


Figura 7.240 Precipitación media anual registrada en las estaciones de la cuenca de los ríos Uchusuma y Caquena. Fuente: elaboración propia.

A nivel regional se trazaron las isoyetas de precipitación media anual, construidas a partir de los datos registrados en 28 estaciones meteorológicas, 24 de ellas ubicadas en la XV Región de Arica y Parinacota y las 4 restantes en la I Región de Tarapacá. La información utilizada de las estaciones fue previamente completada y analizada, como se explicó en el subcapítulo "Análisis de las variables espacial y temporal" del capítulo "Análisis Regional".

De esta manera, haciendo un zoom en la cuenca de los ríos Uchusuma y Caquena, las isoyetas de precipitación se presentan en la Figura 7.241. Se observa que la precipitación media anual en la cuenca es del orden de los 300 mm a los 400 mm al año, siendo esta una cuenca con altitudes elevadas (> 4.000 msnm), que registra lluvias intensas. En la Tabla 7.140 se especifica la precipitación ponderada de acuerdo al área de influencia entre isoyetas, obteniendo que la precipitación media anual en la cuenca es del orden de los 334 mm.

Tabla 7.140 Ponderación de la precipitación según área de influencia entre isoyetas en la cuenca de los ríos Uchusuma y Caquena. Fuente: elaboración propia.

Isoyetas de Precipitación (mm)		Área entre isoyetas (km^2)	Precipitación media multianual 1985-2014 (mm)
<	300	188,3	56.502
300	350	883,6	287.183
350	400	260,9	97.830
>	400	55,1	22.032
			334,0 Precipitación media anual en la cuenca

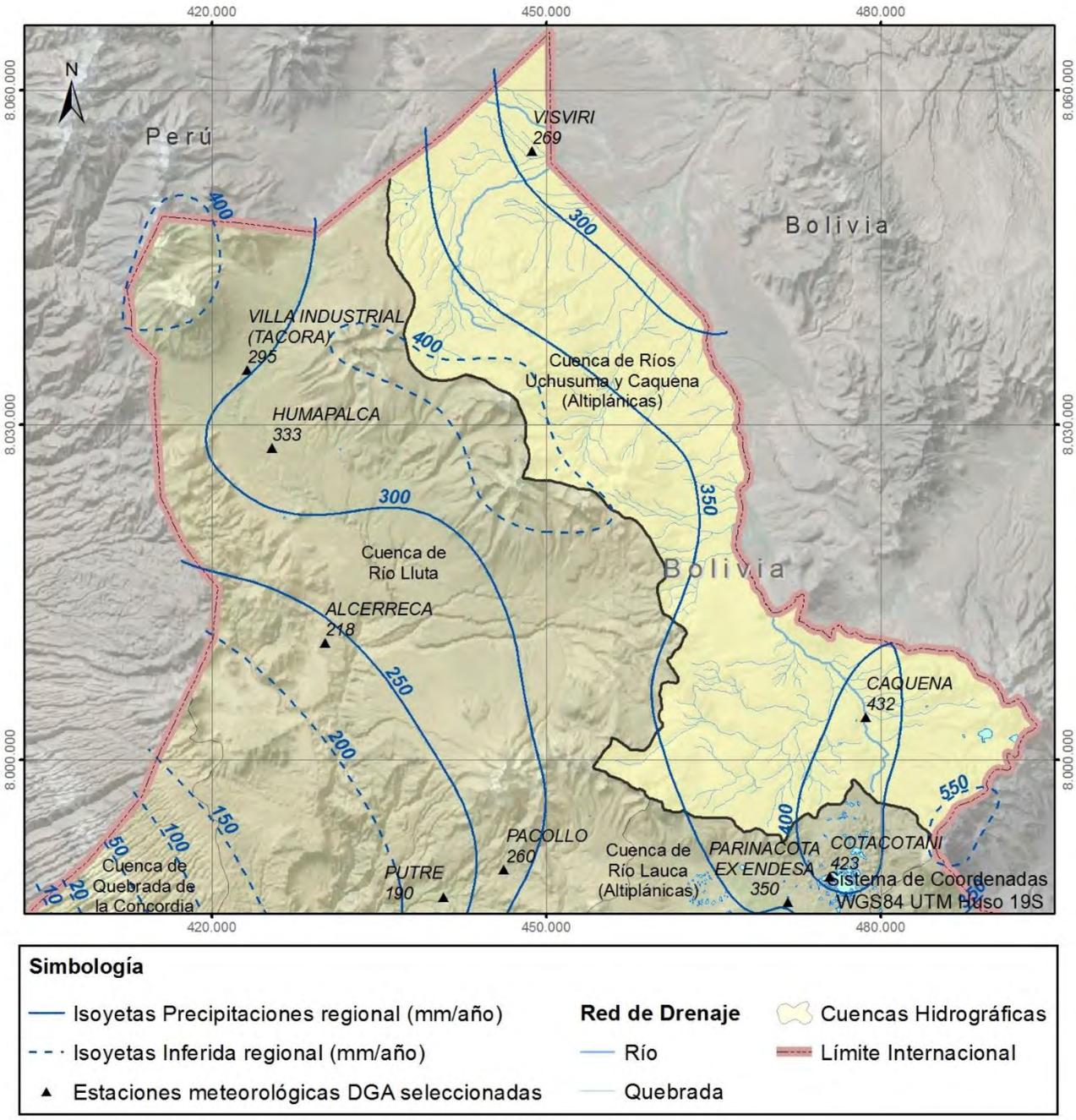


Figura 7.241 Isoyetas de precipitación media anual regional en la cuenca de los ríos Uchusuma y Caquena. Fuente: elaboración propia.

Por otro lado, en la Tabla 7.141 se muestra la precipitación media anual de la cuenca de los ríos Uchusuma y Caquena en dos periodos, un periodo lluvioso de diciembre a marzo en donde se presenta mayor al 80% de la precipitación anual y un periodo medianamente seco de abril a noviembre donde ocurren precipitaciones esporádicas. En general, en la región de Arica y Parinacota las precipitaciones se concentran en la temporada estival producto del llamado "invierno altiplánico".

Tabla 7.141 Precipitación media anual en la cuenca de los ríos Uchusuma y Caquena. Fuente: elaboración propia.

Estación pluviométrica DGA	PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL PERIODO 1985-2014				
	DIC-MAR		ABR-NOV		TOTAL
	Pp [mm]	Pp [%]	Pp [mm]	Pp [%]	Pp [mm]
VISVIRI	228	85%	41	15%	269
CAQUENA	386	89%	46	11%	432
PARINACOTA EX ENDESA	323	92%	27	8%	350

La magnitud de la precipitación media mensual en la cuenca se presenta en la Tabla 7.142 y de manera gráfica se observa la variación temporal en la Figura 7.242. Las lluvias se concentran en los meses de diciembre, enero, febrero y marzo, del orden de los 55 mm a 130 mm. Los meses más secos son mayo y septiembre, registrándose precipitaciones al mes de 0 mm a 2 mm.

Tabla 7.142 Precipitación media mensual en la cuenca de los ríos Uchusuma y Caquena Fuente: elaboración propia.

Estación pluviométrica DGA	Altitud [msnm]	Precipitación media mensual [mm] periodo 1985-2014												
		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Pp ACUM
VISVIRI	4.080	84	60	48,6	10,5	1,9	2,7	2,8	4,1	1,3	9,0	9,0	35,7	269
CAQUENA	4.400	134	113	78,8	13,0	1,6	3,7	9,5	7,5	0,1	3,0	7,6	56,3	432
PARINACOTA EX ENDESA	4.420	111	88	75,3	10,6	0,9	1,1	2,4	1,5	0,4	1,7	7,9	48,1	350

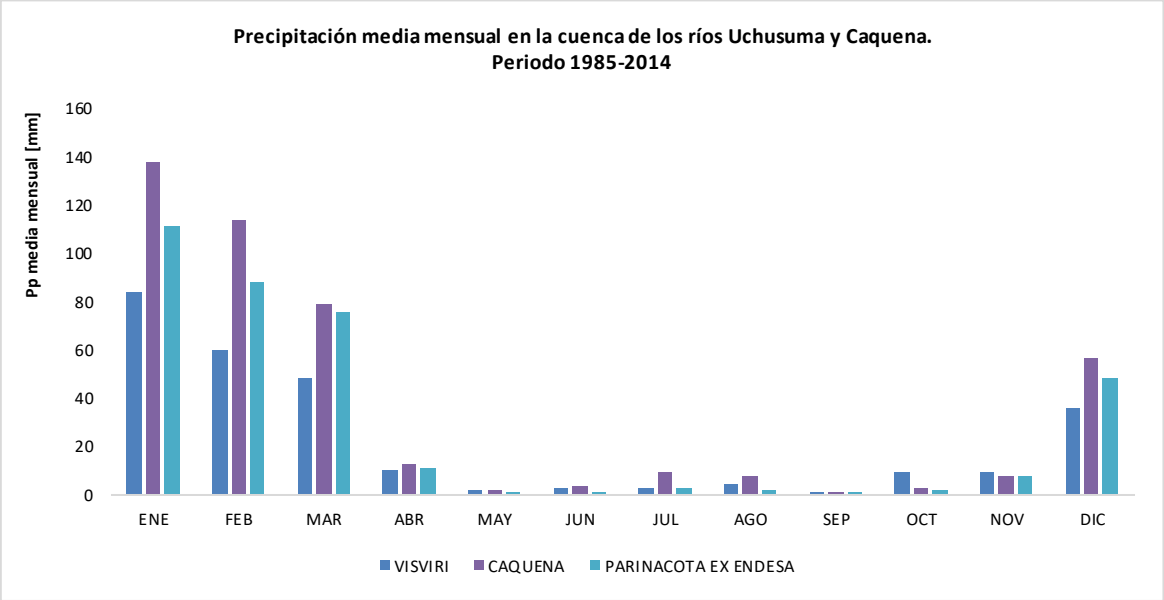


Figura 7.242 Variación mensual de la precipitación media en la cuenca de los ríos Uchusuma y Caquena. Fuente: elaboración propia.

EVAPORACIÓN MEDIA ANUAL Y MEDIA MENSUAL

En la cuenca, la estación meteorológica Caquena cuenca con registros históricos de evaporación potencial del tanque tipo A, a partir de la década de 1970 hasta el año 1990. Sin embargo, la mayor parte de los registros anuales cuentan con menos de 7 meses de información. Por consiguiente, para el análisis de la evaporación media se consideraron todas las estaciones ubicadas en las cuencas altiplánicas de la región que contarán con registros anuales superior a 9 meses. En la Tabla 7.143 se referencian las coordenadas y periodos utilizados.

Por otro lado, en el subcapítulo "Evapotranspiración" del componente "Análisis Regional", se presentan todas las estaciones meteorológicas de la XV Región de Arica y Parinacota y I Región de Tarapacá que miden evaporación potencial del tanque tipo A. Se realiza un análisis más detallado a nivel regional.

Tabla 7.143 Coordenadas y periodo de información de las estaciones con medición de evaporación tanque tipo A. Fuente: elaboración propia.

Estación Meteorológica DGA	Código BNA	DATUM WGS84 H19S		Altitud	Periodo	Años	Estado del Tanque
		UTM Este	UTM Norte				
Caquena	01001005-5	478.658	8.003.810	4.400	1981-1990	9	S
Parinacota Ex Endesa	01020017-2	471.626	7.987.205	4.420	1985-1997	12	S
Chungara Ajata	01010010-0	480.618	7.983.774	4.585	1984-2011	27	V
Cotacotani	01020014-8	475.323	7.989.490	4.500	1960-1989	29	S
Coyacagua *	01050007-9	517.429	7.782.949	3.990	1964-2006	42	V
Pampa Lirima Lagunilla *	01730018-0	515.706	7.805.083	3.940	1982-2006	24	V

V: Vigente, S: Suspendida. * Estación ubicada en la I Región de Tarapacá, datos tomados de DICTUC (2008).

En promedio las cuencas altiplánicas, entre ellas la de los ríos Uchusuma y Caquena, podrían presentar una evaporación potencial anual acumulada entre los 1429 mm y 2216 mm, que se distribuye en distinta proporción durante los meses del año. A escala regional en relación a la cuenca, se estima una tasa de evaporación potencial media anual de 5,0 mm/d, con un rango entre 4,0 y 6,2 mm/d.

Los registros de la evaporación potencial media mensual se presenta en la Tabla 7.144 y en la Figura 7.243 se observa con claridad la variación temporal del parámetro. La mayor evaporación en las cuencas altiplánicas, entre ellas la de los ríos Uchusuma y Caquena, ocurre en los meses de septiembre, octubre, noviembre y diciembre. Los valores más bajos de evaporación se registran en los meses de junio y julio.

Tabla 7.144 Evaporación potencial mensual en las cuencas altiplánicas. Fuente: elaboración propia.

Estación pluviométrica DGA	Evaporación del tanque tipo A mensual [mm]												
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
Caquena	127	122	122	116	128	93	102	122	144	155	168	166	1.565
Parinacota Ex Endesa	134	128	132	142	125	121	119	136	147	172	162	154	1.672
Chungara Ajata	85	86	105	124	120	106	103	115	136	154	156	140	1.430
Cotacotani	129	117	129	158	161	147	153	166	183	214	213	184	1.954
Coyacagua *	197	175	194	185	153	127	134	155	188	228	241	241	2.218
Pampa Lirima Lagunilla *	182	161	187	159	141	103	105	136	168	218	224	221	2.005

* Estación ubicada en la I Región de Tarapacá sobre las cuencas altiplánicas, datos tomados de DICTUC (2008).

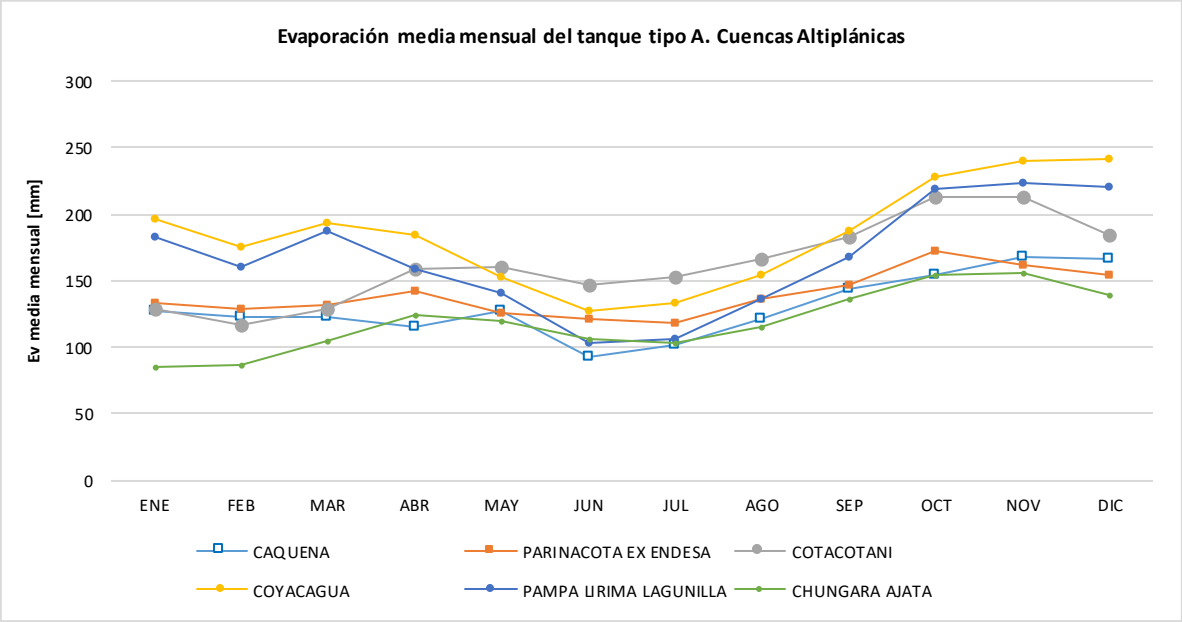


Figura 7.243 Evaporación media mensual potencial en estaciones ubicadas en cuencas altiplánicas. Fuente: elaboración propia.

EVAPOTRANSPIRACIÓN MEDIA ANUAL Y MEDIA MENSUAL

Para el análisis de la evapotranspiración en la cuenca de los ríos Uchusuma y Caquena, se utilizó información de tres estaciones meteorológicas que pertenecen a la DGA ubicadas en cuencas altiplánicas, consideradas como estaciones de influencia sobre la cuenca de estudio. Esto corroborado con las isotermas regionales trazadas en el estudio de referencia del DICTUC (2008).

En la estimación de la evapotranspiración a nivel regional se aplicó el método de Turc, usualmente utilizado con buena aproximación en territorio Chileno. El procedimiento se explicó con mayor detalle en el subcapítulo "Evapotranspiración" del capítulo "Hidrometeorología" de la componente regional.

En la Tabla 7.145 se presentan las estaciones utilizadas en este análisis y su respectiva estimación de evapotranspiración. Como se puede apreciar, el rango de evapotranspiración media anual estimada en la cuenca está entre los 269 mm/año y los 395 mm/año, valores considerados elevados, pero factibles de ocurrir ya que la cuenca de los ríos Uchusuma y Caquena tiene altitudes superiores a los 4.000 msnm y el poder evaporante de la atmósfera está condicionado por factores como la presión atmosférica.

Tabla 7.145 Estaciones consideradas y valor estimado de la evapotranspiración en la cuenca. Fuente: elaboración propia.

Est. Meteorológica DGA	Altitud [msnm]	Pp	T	Precipitación media anual Pp [mm/año]	Temperatura media anual T [°C]		ETP [mm/año] estimación método Turc
Visviri	4.080	x		269,4	5.2*		238,1
Caquena	4.400	x	x	432,4	3.2		292,6
ParinacotaEx Endesa	4.420	x	x	349,8	2.5		258,8

* Valor estimado a partir de la relación obtenida de la temperatura y la altitud en la Región.

Adicionalmente, a partir de la información disponible en el producto satelital MODIS 16, y siguiendo la metodología detallada en el Anexo VI, se estimó la evapotranspiración de la cuenca. MODIS 16 incluye información de evapotranspiración y flujo de calor latente real, estimado a partir de información satelital remota y utilizando como método de cálculo, para el caso de la evapotranspiración, la ecuación de Penman-Monteith. El valor medio anual estimado para la cuenca, considerando datos entre 2000 y 2014 es de 337,3 [mm/año].

7.7.1.4 Fluviometría

La subcuenca del río Caquena cuenta con una red de monitoreo de tres estaciones fluviométricas controladas por la DGA, todas con registros de caudales históricos de importancia desde la década de los 70's y 80's. Cabe mencionar que la estación río Caquena en vertedero fue suspendida en el año 2004. Las coordenadas y periodos de información disponible se presentan en la Tabla 7.146.

Tabla 7.146 Coordenadas y periodo de información de las estaciones fluviométricas en la subcuenca del río Caquena. Fuente: elaboración propia.

Estación Fluviométrica DGA	Código BNA	DATUM WGS84 H19S		Altitud [msnm]	Periodo	Años	Estado
		UTM Este	UTM Norte				
Rio Caquena En Vertedero	01001001-2	479.248	8.001.291	4.385	1997-2004	18	S
Rio Colpacagua En Desembocadura	01001002-0	473.004	8.010.441	4.400	1970-2014	44	V
Rio Caquena En Nacimiento	01001003-9	475.565	8.008.078	4.400	1985-2014	30	V

V: Vigente, S: Suspendida.

CAUDAL MEDIO ANUAL Y MEDIO MENSUAL

La escorrentía superficial media anual registrada en la cuenca alcanza valores de 0,45 m^3/s cerca al nacimiento del río Caquena, una vez sigue su recorrido recibe aportes de otros afluentes, entre ellos del río Colpacagua que reporta un caudal medio anual de 0,23 m^3/s. Hacia aguas abajo en el sector del vertedero, la escorrentía del río Caquena asciende a los 1,22 m^3/s.

Los registros muestran una gran estabilidad interanual con valores muy parecidos todos los años. Sin embargo, algunas series muestran la presencia de crecidas puntuales. La desviación típica sobre el promedio varía entre 0,04 y 0,32 al interior de la cuenca. En la Tabla 7.147 se muestran los demás estadísticos.

Tabla 7.147 Caudal medio anual para el año hidrológico en la subcuenca del río Caquena. Fuente: elaboración propia.

Estación Fluviométrica	Altitud [msnm]	Periodo		CAUDAL MEDIO ANUAL [m^3/s]			
		1985-2014	otro [años]	Min	Max	Prom	Desv est
Rio Caquena En Vertedero	4.385	x		0,72	2,07	1,22	0,32
Rio Colpacagua En Desembocadura	4.400		21	0,07	0,55	0,23	0,13
Rio Caquena En Nacimiento	4.400		17	0,37	0,51	0,45	0,04

Según el estudio del DICTUC (2008), en las cuencas altiplánicas se observa un caudal promedio anual que varía entre 0,02 m^3/s y 2,71 m^3/s. Además, validando lo antes mencionado, los registros de las estaciones fluviométricas ubicadas al interior de las cuencas altiplánicas muestran en general estabilidad interanual con valores similares. El coeficiente de variación y desviación típica sobre el promedio varía entre 0,12 y 1,27.

En la Figura 7.244 se observa con mayor claridad la variación de los caudales medios mensuales y su respuesta a la precipitación media mensual en la cuenca. La magnitud del escurrimiento registrado en la estación Caquena en nacimiento no presenta cambios significativos, se podría indicar que es un caudal constante durante el año en ese tramo del río. A diferencia en la estación Caquena en vertedero, sí se registra una variación temporal de los caudales. Los valores del caudal medio mensual se presentan en la Tabla 7.148.

De acuerdo al análisis de la variación temporal a nivel mensual de los escurrimientos, durante los meses de enero, febrero y marzo se registran los caudales medios más altos del año hidrológico, estos caudales superan la media anual. En los meses de junio y julio se observa un pequeño incremento del caudal medio. Presentándose caudales sobre el río Caquena en el mes de febrero del orden de los 2,23 m^3/s en la estación Caquena en vertedero.

Tabla 7.148 Caudal medio mensual en la subcuenca del río Caquena. Fuente: elaboración propia.

Estación Fluviométrica	CAUDAL MEDIO MENSUAL [m^3/s]												
	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	PROM
Río Caquena en Vertedero	0,58	0,58	1,02	2,00	2,23	1,93	1,13	0,96	1,10	1,17	1,09	0,85	1,22
Río Colpacagua en Desembocadura	0,07	0,08	0,12	0,32	0,64	0,55	0,25	0,16	0,18	0,18	0,13	0,09	0,23
Río Caquena en Nacimiento	0,41	0,42	0,44	0,54	0,52	0,50	0,44	0,42	0,43	0,45	0,45	0,42	0,45

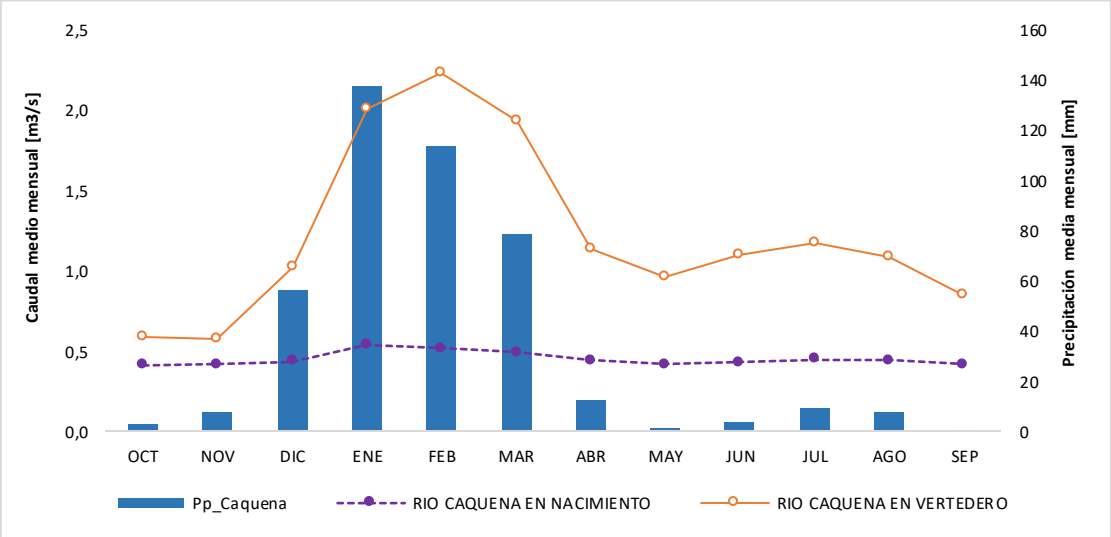


Figura 7.244 Caudal medio mensual en el río Caquena y su relación con la precipitación media. Fuente: elaboración propia.

ANÁLISIS DE FRECUENCIA DE LOS CAUDALES

Mediante el análisis de frecuencia de las series de caudales mensuales, se determinó si los años secos y los años lluviosos mantienen el mismo comportamiento que el año hidrológico medio. En el Anexo VI se detalla la metodología. Para ello se graficaron curvas de variación estacional definidas para distintas probabilidades de excedencia.

En la Tabla 7.149 y Figura 7.245, se presentan los caudales mensuales para las probabilidades de excedencia del 15% (año muy húmedo), 85% (año muy seco) y caudal medio. Allí se observa la distribución típica de los valores estadísticos representativos de la disponibilidad del recurso en puntos de la cuenca.

Tabla 7.149 Caudales mensuales asociados a probabilidad de excedencia. Fuente: elaboración propia.

Estación: RIO CAQUENA EN VERTEDERO													
Pexc (%)	T (años)	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep
15	6,7	0,74	0,70	1,14	3,20	3,19	3,38	1,50	1,20	1,38	1,55	1,28	0,94
85	1,2	0,43	0,37	0,57	0,81	0,82	0,94	0,77	0,72	0,86	0,89	0,84	0,64
Promedio		0,58	0,58	1,02	2,00	2,23	1,93	1,13	0,96	1,10	1,17	1,09	0,85
Estación: RIO CAQUENA EN NACIMIENTO													
Pexc (%)	T (años)	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep
12	8,3	0,47	0,48	0,51	0,68	0,61	0,58	0,51	0,45	0,50	0,50	0,51	0,48
82	1,2	0,34	0,34	0,39	0,43	0,44	0,44	0,37	0,39	0,38	0,38	0,38	0,36
Promedio		0,41	0,42	0,44	0,54	0,52	0,50	0,44	0,42	0,43	0,45	0,45	0,42
Estación: RIO COLPACAGUA EN DESEMBOCADURA													
Pexc (%)	T (años)	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep
15	6,7	0,12	0,15	0,20	0,63	1,37	1,07	0,43	0,23	0,25	0,28	0,19	0,14
85	1,2	0,02	0,02	0,03	0,09	0,12	0,17	0,13	0,11	0,12	0,09	0,05	0,03
Promedio		0,07	0,08	0,12	0,32	0,64	0,55	0,25	0,16	0,18	0,18	0,13	0,09

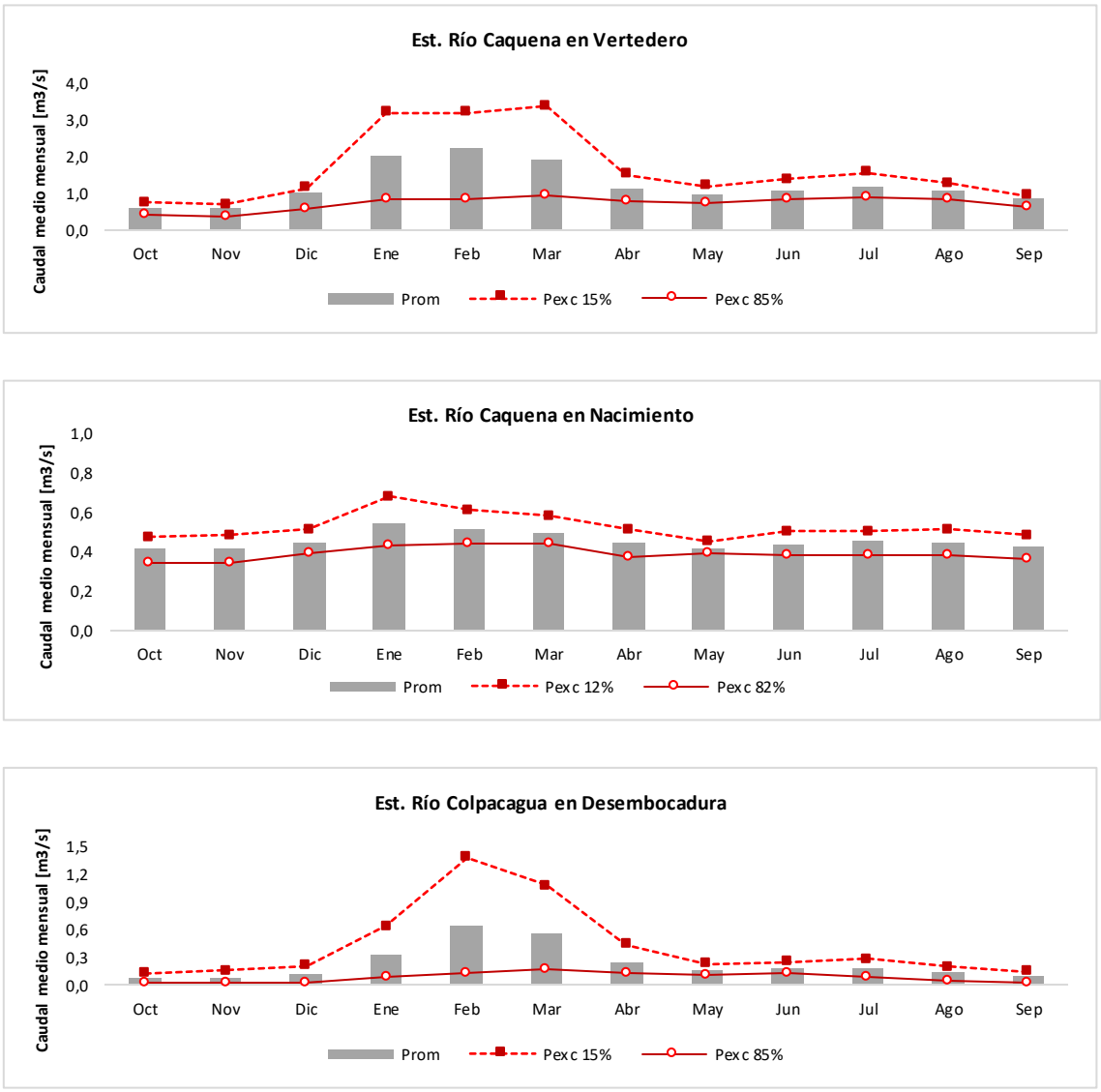


Figura 7.245 Curvas de variación estacional asociadas a probabilidad de excedencia de 15% y 85% y caudal medio mensual en las estaciones fluviométricas de la subcuenca del río Caquena. Fuente: elaboración propia.

Analizando la Figura 7.245, se observa que en las estaciones seleccionadas el caudal mantiene cierta regularidad en los meses del año, sin presentar mayores diferencias entre el caudal máximo (año húmedo) y el promedio anual. Generalmente, los caudales que superan la media anual ocurren en los meses de enero, febrero y marzo.

Por el contrario, no hay variaciones significativas de los caudales en los meses del año seco (Pexc 85%) en las estaciones sobre el río Caquena. El escurrimiento promedio es de 0,4 m^3/s a 0,7 m^3/s.

7.7.1.5 Levantamiento Hidrológico

Para el presente estudio se realizaron cuatro campañas de terreno, en donde se seleccionaron 21 puntos de medición, incluyendo los ríos Uchusuma y Caquena como cauces principales y afluentes de importancia para la escorrentía de la cuenca. Los métodos de aforo utilizados fueron el molinete y de forma manual. Por otra parte, existen registros históricos de aforos, los cuales se tuvieron en cuenta para caracterizar de mejor forma la hidrología de la cuenca en corrientes sin control fluviométrico por parte de la DGA.

En la Tabla 7.150 se especifican las coordenadas de los puntos aforados tanto históricos como recientes. La localización de los sitios de aforos en la cuenca se muestra en la Figura 7.246. Los resultados de las campañas hidrométricas de los puntos aforados, se presenta en la Tabla 7.151.

Tabla 7.150 Coordenadas de los puntos aforados en la cuenca de los ríos Uchusuma y Caquena. Fuente: elaboración propia.

ID	UTM Este	UTM Norte	Año	Estudio de referencia
CQAS-54	437.738	8.047.868	2015 - 2016	ICASS (2016)
CQAS-55	441.524	8.042.076		
CQAS-57	442.413	8.047.897		
CQAS-58	441.359	8.047.568		
CQAS-59	447.456	8.053.458		
CQAS-61	451.753	8.041.812		
CQAS-62	451.605	8.030.350		
CQAS-63	453.608	8.028.639		
CQAS-65	464.658	8.035.685		
CQAS-65 CANAL	464.653	8.035.687		
CQAS-66	467.314	8.024.097		
CQAV-68	477.994	8.007.393		
CQAS-112	470.357	8.011.507		
CQAS-50	443.466	8.052.606		
CQAS-52	441.654	8.051.236		
CQAS-56	442.159	8.044.528		
CQAS-64	458.831	8.038.576		
CQAS-69	478.537	8.003.736		
CQAS-120	451.605	8.030.350		
CQAS-121	453.608	8.028.639		
CQAV-129	476.656	8.009.364		

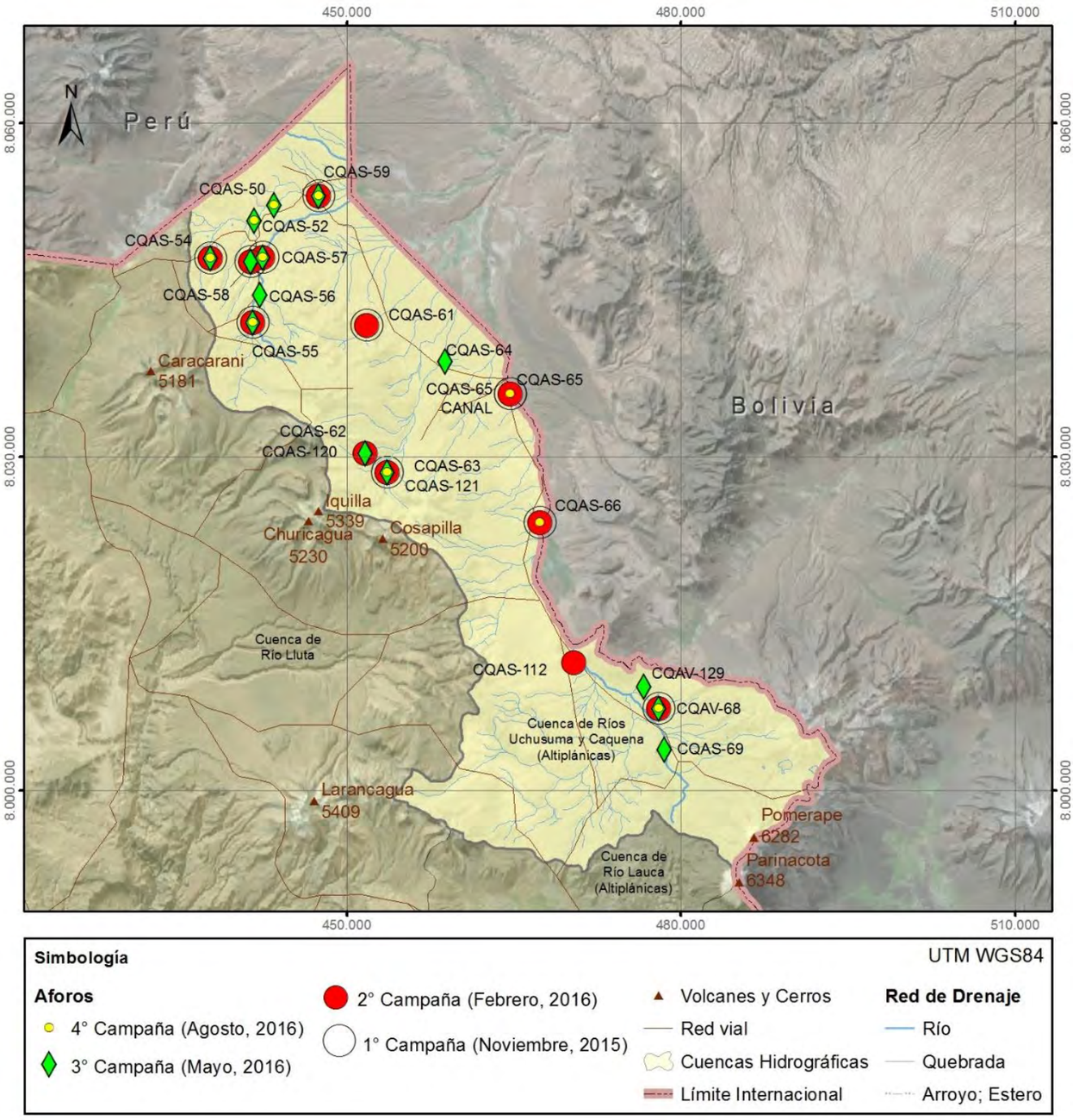


Figura 7.246 Localización de las campañas de aforo en la cuenca de los ríos Uchusuma y Caquena. Fuente: elaboración propia.

Tabla 7.151 Caudales obtenidos de las campañas de aforos en la cuenca de los ríos Uchusuma y Caquena. Fuente: elaboración propia.

No	Sitio de aforo	CAUDAL AFORADO							
		Campaña I 24-26 Nov 2015		Campaña II 18-20 Feb 2016		Campaña III 10-14 May 2016		Campaña IV 02-03 Ago 2016	
		Método	Q [l/s]	Método	Q [l/s]	Método	Q [l/s]	Método	Q [l/s]
1	CQAS-54	Manual	5,0	Manual	2,1	Manual	13,1	Manual	0,6
2	CQAS-55	Molinete	186,8	Molinete	207,6	Molinete	305,1	Molinete	208,6
3	CQAS-57	Manual	324,6	Manual	368,2	Molinete	242,6	Molinete	275,8
4	CQAS-58	Manual	5,0	Manual	6,7	Manual	9,7		
5	CQAS-59	Molinete	105,4	Molinete	50,3	Manual	5,3	Molinete	45
6	CQAS-61	Manual	3,0	Manual	6,8				
7	CQAS-63	Manual	631,9	Manual	11,0			Molinete	97,2
8	CQAS-65	Manual	145,9	Molinete	703,3			Molinete	171,9
9	CQAS-65 CANAL	Manual	55,0						
10	CQAS-66	Molinete	217,9	Molinete	472,5			Molinete	157,9
11	CQAV-68	Manual	40,0	Manual	35,5	Manual	35,3	Manual	73,7
12	CQAS-62			Manual	93,8				
13	CQAS-112			Manual	0,3				
14	CQAS-50					Molinete	16,9	Manual	5
15	CQAS-52					Manual	9,7	Manual	76,8
16	CQAS-56					Molinete	293,5		
17	CQAS-64					Manual	71,8		
18	CQAS-69					Manual	267,8		
19	CQAS-120					Manual	19,2		
20	CQAS-121					Manual	6,4		
21	CQAV-129					Manual	13,9		

De acuerdo a los caudales aforados (Tabla 7.151), se logra percibir que por el río Putani (aforos CQAS-55 y CQAS-57) escurre un caudal considerable en magnitud, superior a los 200 l/s, aún en los meses de mayo y agosto considerados de transición. Sobre el río Caquena en dirección de sureste a noreste (aforos CQAS-69, CQAS-66 y CQAS-65), en general se observa un aumento del caudal a medida que el río escurre. Además, es claro el efecto del invierno altiplánico en el incremento del caudal, en especial los aforos realizados en la II campaña (Mar/2016).

Los caudales de los otros aforos realizados en afluentes menores, permiten registrar un volumen de agua pasante en un momento específico, pero al no contar con registros históricos es limitante su comparación. En general, es factible comentar que

en las campañas I y II se aforaron los mayores caudales en la cuenca, salvo algunas excepciones.

7.7.1.6 Modelación hidrológica

Las generalidades del modelo hidrológico HEC-HMS utilizado para la modelación hidrológica de la cuenca se describen en el Anexo VI. A continuación se detalla el planteamiento concebido, información base, parámetros calibrados y resultados obtenidos del modelo.

PLANTEAMIENTO DEL MODELO

Modelo de Cuenca

De la cuenca de los ríos Uchusuma y Caquena se delimitó la subcuenca del río Caquena, a partir de la estación fluviométrica río Caquena en vertedero. Para representar el movimiento del agua en la subcuenca se utilizó un conector "Reach" que sirve para calcular el tránsito del hidrograma a medida que circula por el cauce, para las extracciones de agua superficial se utilizó el ícono "diversión", para representar un flujo base permanente se utilizó el ícono "Source" y a la salida de la cuenca se utilizó un sumidero o "Sink". Ver esquema de la cuenca en la Figura 7.247.

Figura 7.247 Esquema en el modelo hidrológico HEC-HMS de la cuenca del río Caquena. Fuente: elaboración propia.

Modelo Meteorológico

Las series meteorológicas utilizadas en cada subcuenca se describen a continuación:

- Precipitación diaria: Los registros corresponden a la estación meteorológica CAQUENA.
- Evaporación media mensual: Los registros corresponden a la estación meteorológica CAQUENA.

Especificaciones de control

El intervalo del tiempo modelado es diario, la fecha de inicio fue 01-ene-1985 y la fecha de finalización fue 31-dic-2014.

INFORMACIÓN BASE

Se requiere ingresar parámetros físicos de la cuenca definidos por el modelo continuo seleccionado, así como información antrópica que eventualmente modifica las condiciones naturales del agua en la cuenca y registros fluviométricos para la posterior calibración. Las series de tiempo utilizadas se describen a continuación:

- El tiempo de retardo se determinó para cada subcuenca como el 60% del tiempo de concentración, aplicando la ecuación de *California Highways* en base a la longitud del cauce y al delta altitudinal.
- *Caudal de extracción:* se utilizó el registro de concesiones de agua superficial de la DGA otorgadas en la cuenca, considerando que éste caudal es constante y de uso consuntivo, además de que no fuera mayor al disponible en el río.
- *Caudal diario observado*: para la calibración del modelo se utilizaron series de caudales diarios para el mismo periodo de la simulación de la estación Río Caquena en Vertedero.

Dado que no se cuenta con mediciones directas de todos los parámetros físicos requeridos para representar adecuadamente el comportamiento hidrológico de la cuenca, estos fueron objeto de calibración y los escogidos finalmente fueron los que mejor representaron los caudales simulados al comparar con los observados. En la Tabla 7.152 se presentan los parámetros físicos definidos para el modelo SMA.

El análisis estadístico de dicha comparación fue basado en los resultados del coeficiente Nash-Sutcliffe, ampliamente utilizado en la calibración de modelos hidrológicos para el chequeo de la bondad de ajuste. En la subcuenca río Caquena este valor fue 0,4, siendo un ajuste bueno ≥0,4.

Tabla 7.152 Parámetros utilizados para el modelo SMA en la cuenca del río Caquena. Fuente: elaboración propia.

Zonas definidas en el modelo hidrológico	Parámetro	Unidad	Subcuenca río Caquena
Intercepción vegetación	Almacenamiento inicial en vegetación	[%]	5
	Capacidad almacenada por intercepción de vegetación	[mm]	10
Acumulación en depresiones del terreno	Almacenamiento inicial en depresiones	[%]	5
	Capacidad almacenada en depresiones	[mm]	10
	Infiltración máxima	[mm/h]	15
Zona no saturada (Matriz de Suelo)	Almacenamiento inicial en matriz de suelo	[%]	5
	Capacidad almacenada en el suelo	[mm]	30
	Capacidad almacenada en la zona de tensión del suelo	[mm]	12
	Percolación máxima del suelo hacia acuífero libre	[mm/h]	6
Zona saturada (acuífero superficial)	Almacenamiento inicial en acuífero superficial	[%]	5
	Capacidad almacenada en acuífero superficial	[mm]	20
	Percolación máxima del acuífero superficial hacia el acuífero profundo	[mm/h]	3
	Coeficiente de almacenamiento del acuífero superficial	[h]	320
Zona saturada (acuífero profundo)	Almacenamiento inicial en acuífero profundo	[%]	5
	Capacidad almacenada en acuífero profundo	[mm]	30
	Percolación máxima del acuífero profundo	[mm/h]	2
	Coeficiente de almacenamiento del acuífero profundo	[h]	320

RESULTADOS MODELO HIDROLÓGICO

Se compararon a nivel diario los caudales observados con los caudales simulados, existiendo similitud en algunos y diferencias en otros para todo el periodo analizado. Sintetizando dicha información, se calculó el caudal medio anual en los años con más de 9 meses de información en el caso de los datos observados.

Los resultados del caudal observado y caudal simulado a nivel medio anual se muestran en la Figura 7.248. En general, se observa que algunos caudales simulados se subestiman en el primer periodo (1985-1996) y otros se sobreestiman en el periodo restante (1997-2014). La mayor diferencia del caudal subestimado fue de 1,0 m^3/s y del sobreestimado fue de 0,5 m^3/s. Estas diferencias podrían atribuirse a aportes estacionales que recibe la cuenca, difícilmente caracterizados.

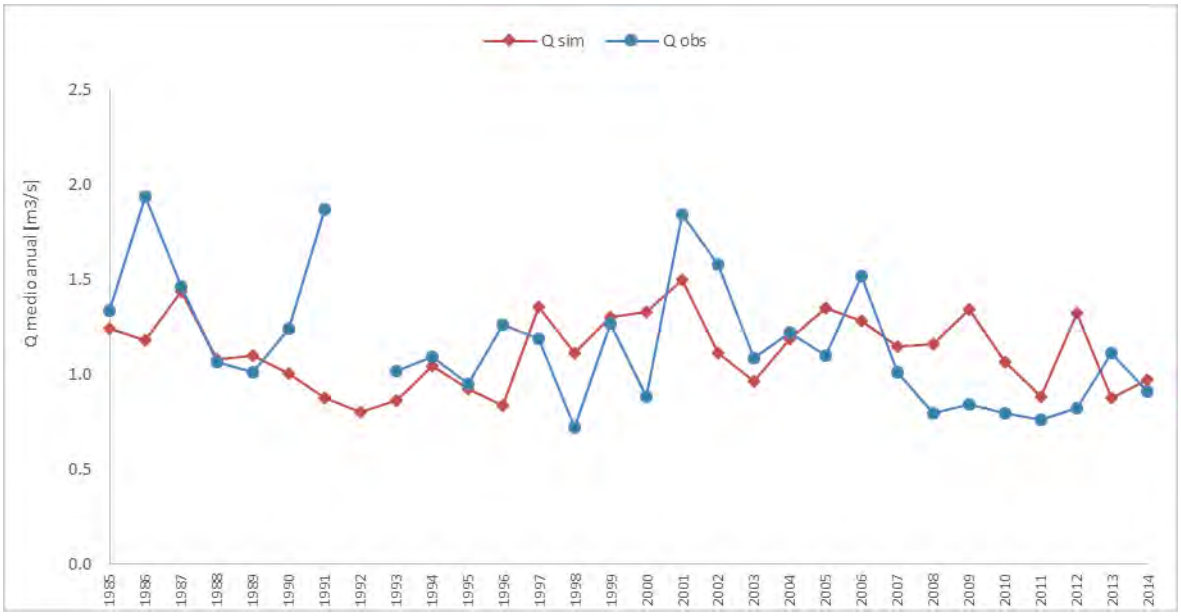


Figura 7.248 Comparación caudales medios anuales observados y simulados en la subcuenca río Caquena. Fuente: elaboración propia.

7.7.1.7 Estimación de la recarga de aguas subterráneas

La principal recarga del acuífero en la cuenca de los ríos Uchusuma y Caquena, proviene de las crecidas producto de las precipitaciones durante el invierno altiplánico.

ANTECEDENTES

GFC Ingenieros Ltda. (2010) en el estudio "Metodología para la estimación de recarga de cuencas altiplánicas y precordilleranas de vertiente pacífica en el norte de Chile, XV, I, II y III regiones", obtuvieron para el caso de la cuenca del río Caquena, una recarga para un escenario promedio de 510 l/s, este valor equivaldría al 9,3% de la precipitación media anual calculada en el estudio.

ANÁLISIS DE LA RECARGA: RELACIÓN PRECIPITACIÓN - ESCORRENTÍA

Para la estimación de la recarga media anual, se implementó una metodología regional ampliamente desarrollada para las cuencas altiplánicas y precordilleranas de vertiente pacífica, como referencia principal se contó con el estudio SDT N° 317 liderado por DEP-DGA (2011). Adicionalmente, para distribuir la recarga a nivel mensual, en este proyecto se plantea una metodología simplificada basada en los procesos hidrológicos

que predominan en la región. Los detalles del procedimiento realizado en las cuencas de la región de Arica y Parinacota se presenta en el Anexo VI.

Con relación a las subcuencas analizadas en la cuenca del río Caquena, en la Tabla 7.166 se presenta la información base utilizada. Cabe mencionar que el cálculo de la precipitación media anual se realizó utilizando el método de las isoyetas, descrito en el capítulo "Hidrometeorología" del Análisis Regional y para el caudal medio anual se contó con la información de la estación fluviométrica río Caquena en Vertedero.

Tabla 7.153 Información base utilizada de cada subcuenca del río Caquena. Fuente: elaboración propia.

Subcuencas	Coord. UTM N del Centroide	Altitud media [msnm]	Área [km²]	Pp media anual [mm/año]	Pp media anual [l/s]	Q medio anual [l/s]
Río Caquena	8.002.126	5.282	452	375	5.374,8	1.220

Para la estimación de la recarga neta, se estableció una relación entre el promedio de los caudales mínimos decadales (meses de junio, julio y agosto) y los caudales medios observados, y lo mismo pero con los caudales calculados. Lo anterior se adoptó siguiendo las hipótesis y conceptos hidrológicos del estudio SIT N° 317, a continuación se describen:

- Los flujos subterráneos son despreciables y los caudales superficiales controlados a la salida de la cuenca representan la escorrentía total.
- Se entenderá como "recarga neta de la cuenca", aquella parte de la escorrentía total de salida de una cuenca, compuesta por el agua que ha infiltrado al menos una vez y que ha transitado subterráneamente en algún momento, tal que su permanencia dentro de la cuenca es superior a la de un año hidrológico.
- Esta recarga neta o caudal base interanual de salida de la cuenca puede ser estimada, como el promedio de los mínimos decadales observados entre los meses de junio, julio y agosto. Existe consenso en interpretar las series hidrológicas del norte de Chile, bajo la perspectiva de ciclos hidrológicos decadales, a partir de los cual es razonable estimar el flujo base como el promedio de los 4 mínimos decadales observados históricamente.

De acuerdo a las correlaciones obtenidas, es factible asumir que la recarga neta en las cuencas altiplánicas de la XV Región, corresponde entre el 43% y el 46% de la escorrentía total. Adicionalmente, Aquaterra Ingenieros Ltda. (2011) en el estudio SIT N° 251, encontraron que los flujos subterráneos en la subcuenca del río Caquena son

despreciables frente al caudal de salida observado. En la Tabla 7.154 se muestran los valores de la estimación de la recarga neta.

Tabla 7.154 Caudales considerados en la correlación y estimación de la recarga neta. Fuente: elaboración propia.

Subcuencas	Q obs [l/s]	Q cal [l/s]	Q min decadal prom [l/s]	Recarga neta [l/s] (40% - Estudio SDT 137)	Recarga neta [l/s] (43% - Propuesto Actual)
Río Caquena	1.220	1.043	490	488	525

SÍNTESIS DE LA ESTIMACIÓN DE LAS PRINCIPALES RECARGAS

Una vez revisados los antecedentes de la subcuenca del río Caquena, relacionados con la estimación de la recarga y de analizar conceptualmente las componentes que condicionan el tránsito del agua hasta llegar al acuífero, fue adoptada la metodología regional propuesta por el estudio SIT N° 317.

Cabe mencionar que el valor obtenido de la recarga media anual en la subcuenca, es un referente que consideró varias hipótesis y simplificaciones. Sin duda la principal limitante en el análisis es la cantidad de información disponible, alguna de esta desconocida y/o no controlada. En la Tabla 7.155 se presenta de manera resumida las principales fuentes de recarga, el método utilizado y los valores estimados a nivel anual. Seguidamente en la Tabla 7.156 se presenta la distribución de la recarga estimada a nivel mensual, concentrándose esta en los meses con mayor registro precipitación, de enero a marzo.

Tabla 7.155 Síntesis de las principales estimaciones de recarga al acuífero en la cuenca del río Caquena. Fuente: elaboración propia.

Principales fuentes de recarga al acuífero	Método	Valor estimado anual [l/s]
		Río Caquena en Vertedero
Percolación de la PRECIPITACIÓN que a su vez contribuye a la escorrentía	Relación precipitación-escorrentía. Metodología adoptada del estudio SIT N° 317- DEP-DGA (2011)	525
Recarga neta anual del FLUJO BASE en el río Caquena parte alta		

Tabla 7.156 Valores de la recarga media mensual estimada en la cuenca del río Caquena. Fuente: elaboración propia.

Subcuencas	Distribución mensual de la recarga estimada [l/s]											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Río Caquena	212	193	121	0	0	0	0	0	0	0	0	0

7.7.2 Marco geológico

La cuenca de los ríos Uchusuma y Caquena se ubica en el extremo noreste de la región de Arica y Parinacota, en la Cordillera Occidental.

GEOLOGIA

Las rocas más antiguas que afloran en la cuenca de los ríos Uchusuma y Caquena son del periodo Oligoceno-Holoceno, entre las que se cuenta la Formación Lupica (OMl) principalmente al sur de la cuenca, en el sector oeste de la localidad de Caquena, donde también se encuentra la Formación Lauca (PlPl) como relleno. La Formación Putani (Mimp) aflora en el río Putani, al suroeste del poblado de Visviri. La Ignimbrita Lauca (Pll, Pil) se ubica discontinuamente a lo largo de toda la cuenca. La Formación Visviri (PPlv) se localiza en gran parte del sector de Visviri, cubriendo una gran extensión.

Las rocas volcánicas cenozoicas en la cuenca son del Mioceno Medio, Superior, del Plioceno y del Pleistoceno (Mmv, Msv, Plv, Pv) y se exponen principalmente al sur, en los alrededores de la localidad de Caquena y subordinadamente al extremo norte de la cuenca, al oeste de la localidad de Visviri. Los flancos de los edificios volcánicos son cubiertos por depósitos glaciares (Qg, PlHg).

Los depósitos salinos (PlHs) se localizan en el extremo noroeste de la cuenca, en la quebrada Coipacoipani. Los depósitos de remoción en masa (PlHrm) y los coluviales (PlHc) se observan discontinuos a lo largo de la cuenca, entre las localidades de Visviri y Caquena, mientras que los depósitos fluviales y aluviales del Plioceno, Pleistoceno y Holoceno (Plf, Plaf, Pf, Haf) se observan a lo largo de los cauces y quebradas. Los depósitos palustres (Hp) se ubican esencialmente en quebradas y depresiones en toda la cuenca, y en la quebrada Guallancallani se emplazan depósitos lacustres de edad pliocena (Pl).

TECTÓNICA Y ESTRUCTURAS

En la cuenca de los ríos Uchusuma y Caquena es posible observar las evidencias dejadas por la tercera etapa tectónica (Oligoceno-Holoceno), donde se producen los mayores cambios en el relieve. La estructura importante que se presenta en esta cuenca, al norte de Churiguaya, en el cordón del cerro Guane-Guane, es la parte media de la Formación Lupica formando un monoclinal regional de manteo 25°W.

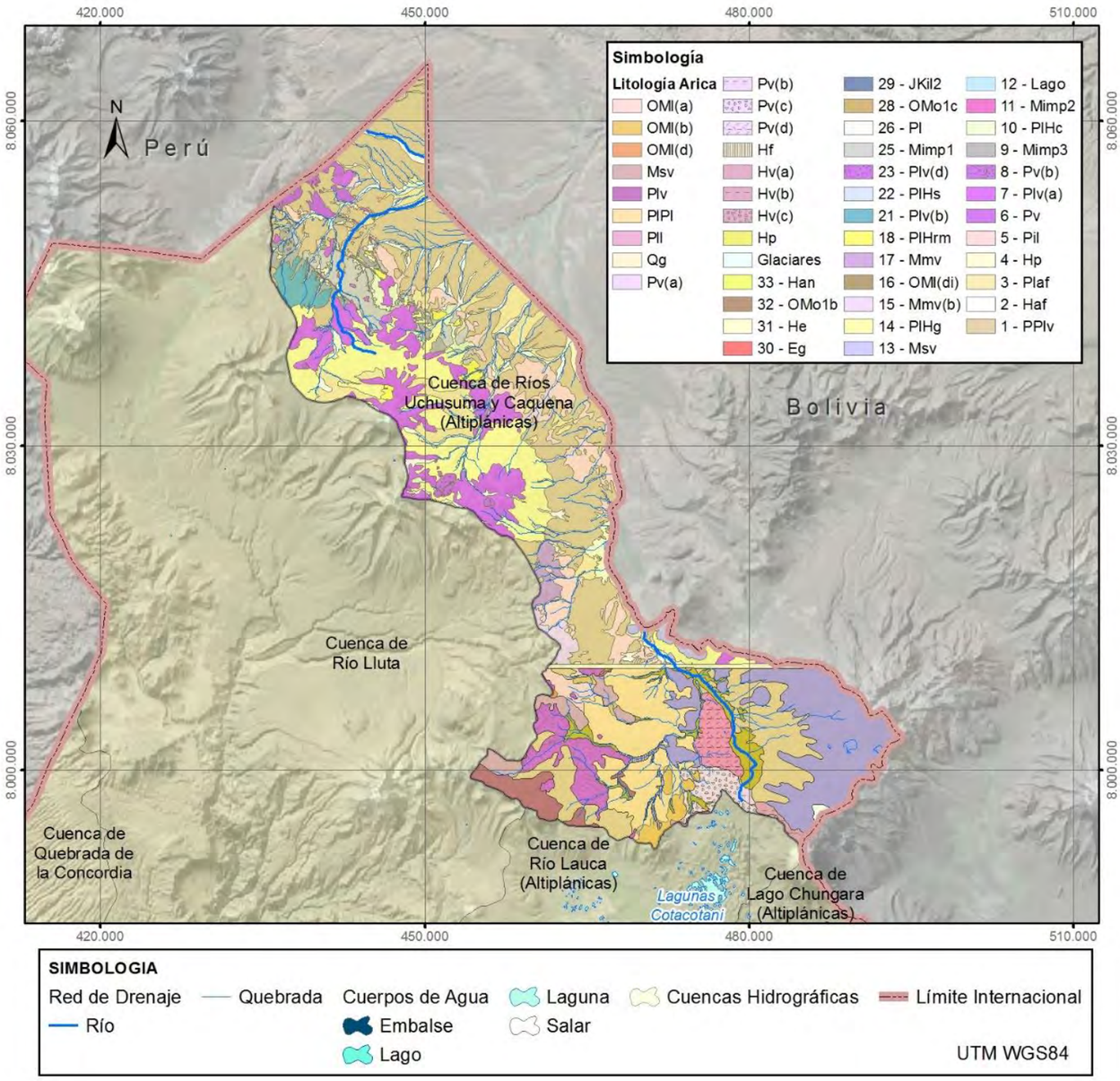


Figura 7.249 Mapa geológico de la cuenca de los ríos Uchusuma y Caquena. Fuente: modificado de García *et al.* (2004).

7.7.3 Caracterización Hidrogeológica

7.7.3.1 Antecedentes existentes

La cuenca de los ríos Uchusuma y Caquena no se ha estudiado en detalle desde el punto de vista hidrogeológico, en el que únicamente se han delimitado de un modo general los acuíferos principales y se han entregado algunas características básicas.

En el breve informe del INSTITUTO DE INVESTIGACIONES GEOLÓGICAS (Henríquez *et al.*, 1976) se reconocen dos áreas acuíferas en la cuenca, en el que en la Figura 7.250 se muestra el acuífero Caquena, asociado al río del mismo nombre, y el acuífero Visviri, asociado a los ríos Uchusuma, Colpas y Putani. En este estudio estiman que en aquella época el potencial del acuífero de Visviri sería del orden de 500 l/s y contendría agua de excelente calidad para uso industrial, agrícola y potable.

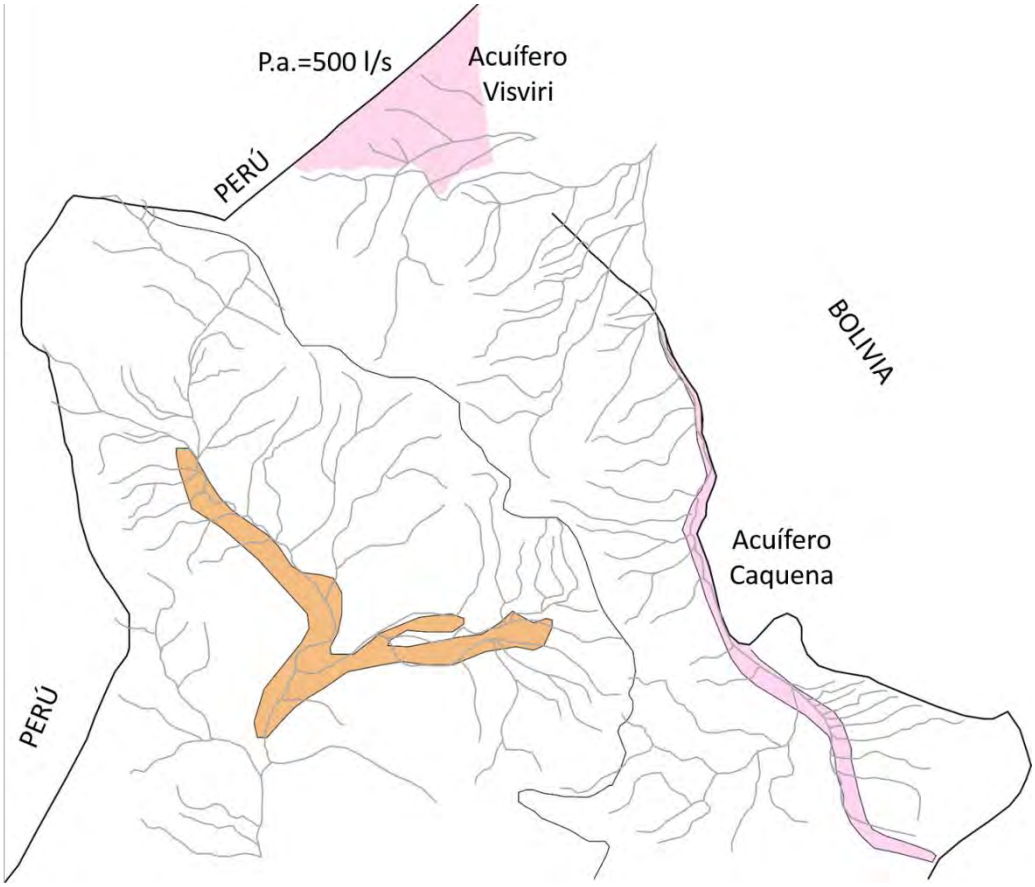


Figura 7.250 Esquema de acuíferos Visviri y Caquena. Fuente: modificado de Henríquez *et al.* (1976).

Posteriormente, el estudio DGA (2003) tuvo como objetivo delimitar los acuíferos que alimentan las vegas y bofedales presentes en la I, II y III Región, en el que particularmente comprende el Bofedal de Caquena, tal como se muestra en la Figura 7.251. En la zona del acuífero de Caquena no existen pozos, por lo que se cuenta con pruebas de bombeo para estimar los parámetros hidráulicos, por esta razón en el informe de la DGA (2003) se consideraron algunos parámetros hidráulicos de materiales geológicos similares existentes en otras cuencas.

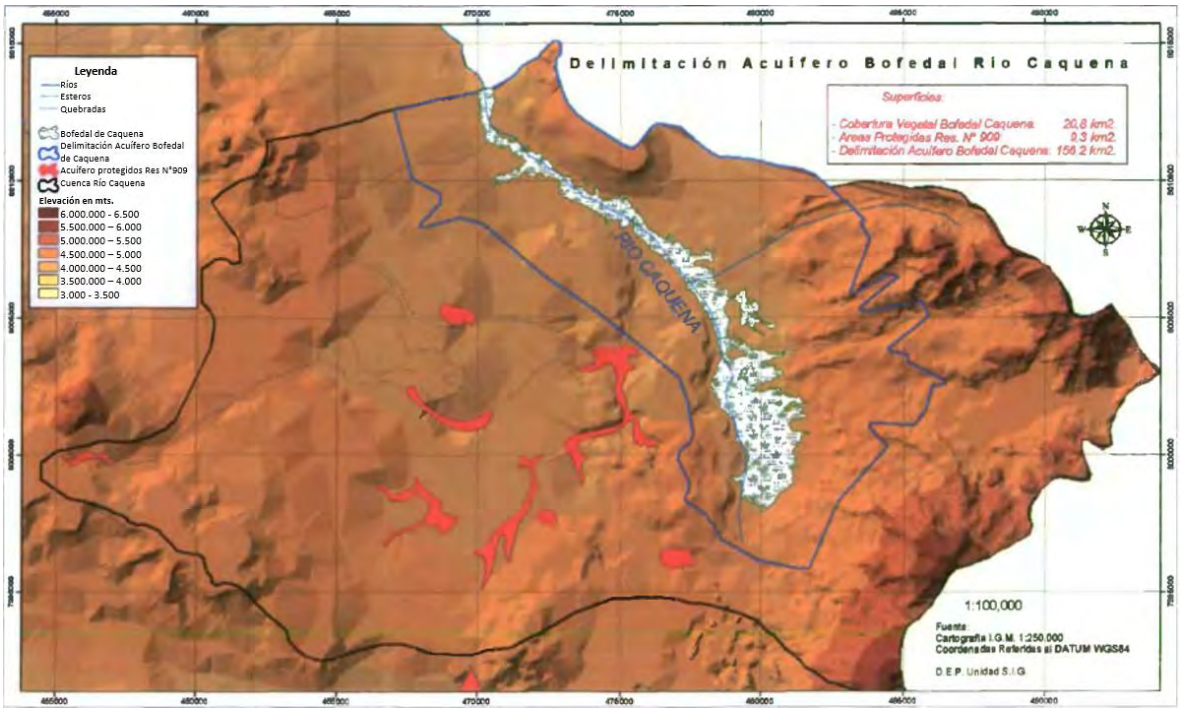
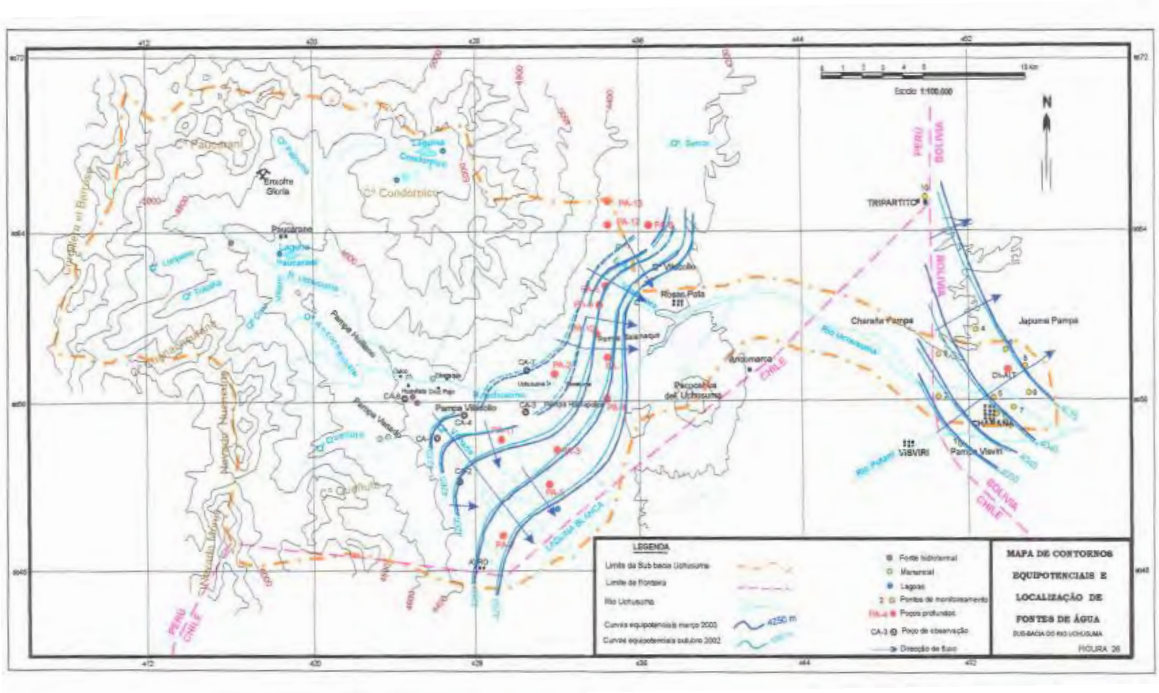
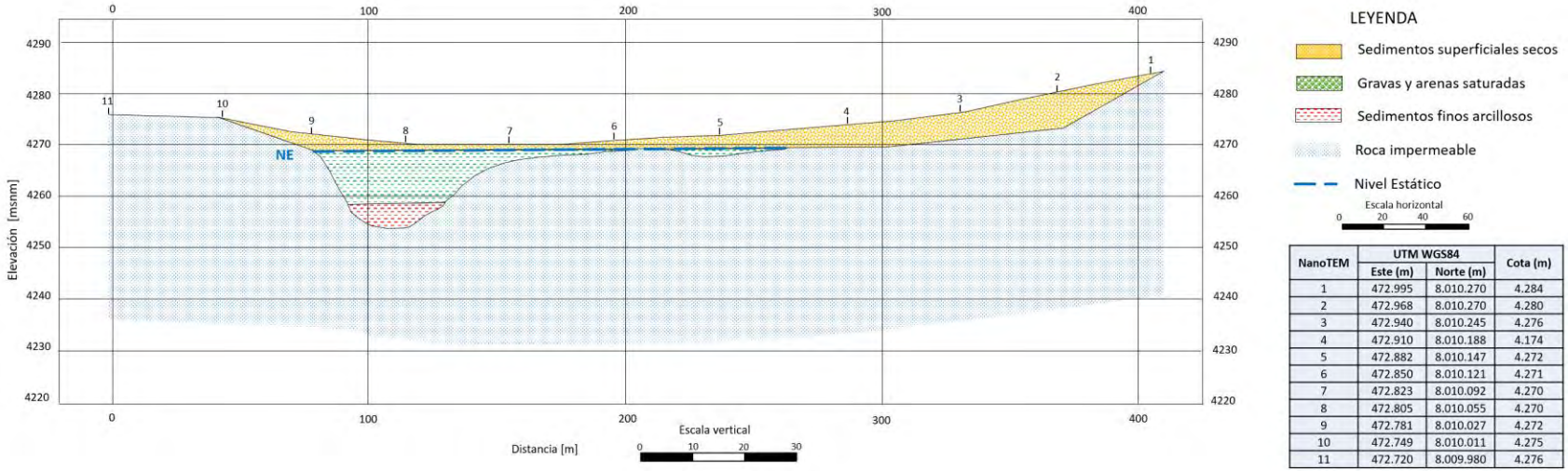


Figura 7.251 Delimitación del acuífero del bofedal de Caquena. Fuente: DGA (2003).

En la tesis doctoral de Apaza (2004) se elaboró una caracterización hidrogeológica de la cuenca del río Uchusuma en el territorio peruano y boliviano a partir de la información de una prospección geofísica, la estratigrafía de varios sondajes y la composición hidroquímica de las aguas. En ésta se desarrollaron perfiles geológicos, perfiles del modelo conceptual y un mapa piezométrico, el que se muestra en la Figura 7.252.


LEGENDA
MAPA DE CONTORNOS EQUIPOTENCIAIS E LOCALIZAÇÃO DE FONTES DE ÁGUA
TRIPARTITO
Chirapa Pampa
Japuma Pampa
Apacheta
Pampa Visviri
VISVIRI
CHUMAÑA
Pampa Vilacollo
Pampa Vilacollo
Pampa Vilacollo



NanoTEM	UTM WGS84		Cota (m)
	Este (m)	Norte (m)	
1	472.995	8.010.270	4.284
2	472.968	8.010.270	4.280
3	472.940	8.010.245	4.276
4	472.910	8.010.188	4.174
5	472.882	8.010.147	4.272
6	472.850	8.010.121	4.271
7	472.823	8.010.092	4.270
8	472.805	8.010.055	4.270
9	472.781	8.010.027	4.272
10	472.749	8.010.011	4.275
11	472.720	8.009.980	4.276

Figura 7.253 NanoTem interpretado en sección de salida de subcuenca inferior. Fuente: Modificado de Aquaterra (2011).

Adicionalmente, se consultó el estudio hidrológico del INRENA-DGAS (2002) en el que se realiza una "Evaluación y Ordenamiento de los Recursos Hídricos en las Cuencas de los Ríos Caplina y Uchusuma", y en el que se describe el sistema de captación, regulación y conducción del canal Contapujo y Uchusuma Alto desde la zona alta de la cuenca de Uchusuma hasta el trasvase en la cuenca del río Caplina, cuya capacidad máxima de porteo es de 2 m^3/s. Sin embargo, en condiciones de sequía se indica que se hace uso de 9 pozos localizados en el Aíro que abastecen mediante bombeo al canal Uchusuma, con una disponibilidad promedio de 350 l/s y una capacidad máxima de 700 l/s sin afectar las reservas permanentes. Estos pozos dan cuenta de la buena transmisividad y permeabilidad del acuífero del río Uchusuma.

7.7.3.2 Definición y caracterización de las unidades hidrogeológicas

A continuación se describen las unidades hidrogeológicas existentes en la cuenca de los ríos Uchusuma y Caquena a partir del mapa geológico García *et al.* (2012) y del mapa hidrogeológico 1.000.000 (DGA, 1989):

- Unidad Hidrogeológica I (importancia alta): corresponde a los materiales detríticos no consolidados de alta porosidad intergranular y carácter libre. Son depósitos fluviales y aluviales del Holoceno y Pleistoceno compuestos de gravas con intercalaciones de arenas y limos que rellenan quebradas.
- Unidad Hidrogeológica II (importancia alta): considera a las lavas andesíticas y dacíticas que tienen una permeabilidad primaria baja a nula pero por fracturación. Los Complejos Volcánico Caracarani, Chuquiananta, Churicagua Copatanca y de los volcanes Condori y Parinacota se caracterizan por tener familias de fracturas conectadas que originan acuíferos colgados y/o recargan otras unidades hidrogeológicas.
- Unidad Hidrogeológica III (importancia media): engloba los depósitos salinos del Pleistoceno-Holoceno. Son depósitos evaporíticos compuestos por boratos, sulfatos, carbonatos y cloruros. Este material se depositó en la laguna Blanca. Esta unidad presenta una permeabilidad primaria y una secundaria por disolución de sales.
- Unidad Hidrogeológica IV (importancia media): constituido por materiales sedimentarios semiconsolidados a consolidados. Esta unidad corresponde a los depósitos coluviales, eólicos, glaciares, palustres, de remoción en

masa, de avalancha de detríticos y a las Formaciones Visviri y Lauca. Están compuestos por materiales detríticos con diferente porcentaje de finos, lo cual provoca un descenso en la permeabilidad primaria de la unidad.

- Unidad Hidrogeológica V (importancia baja): son lavas, areniscas, conglomerados y brechas. Corresponde a las Formaciones Lupica (a, d) y Putani. La permeabilidad primaria de esta unidad es muy baja, pero está muy plegada y probablemente fracturada por las fuerzas compresivas sufridas. Localmente la Formación Lupica (d) presenta alteración hidrotermal.
- Unidad Hidrogeológica VI (importancia baja-muy baja): son lavas, tobas y flujos piroclásticos. Esta unidad corresponde a los remanentes volcánicos del Mioceno, domos volcánicos del Pleistoceno, la ignimbrita Lauca, el miembro ignimbrítico de las Formaciones Putani y Lupica (b) y los flujos piroclásticos. La permeabilidad primaria de esta unidad es muy baja, pero localmente puede presentar fracturas conectadas.
- Basamento: de acuerdo a los antecedentes con que se cuentan, no se ha logrado identificar la unidad impermeable de la cuenca.

En la Tabla 7.157 se resumen las unidades hidrogeológicas según la importancia hidrogeológica y el tipo de permeabilidad presente en la cuenca de los ríos Uchusuma y Caquena. Así mismo, en la Figura 7.254 se presenta el Mapa de las unidades según la importancia hidrogeológica presentes en la cuenca de los ríos Uchusuma y Caquena, en la que claramente se muestran las unidades de mayor importancia correspondientes a depósitos aluviales y fluviales.

Tabla 7.157 Resumen de las unidades hidrogeológicas de la cuenca de los ríos Uchusuma y Caquena. Fuente: elaboración propia.

Cuenca	Unidad Hidrogeológica	Descripción	Tipo de permeabilidad	Importancia hidrogeológica	Tipo de Unidad
Ríos Uchusuma y Caquena	I	Depósitos aluviales Depósitos fluviales	Primaria	Alta	Acuífero
	II	Complejos volcánicos	Secundaria	Alta –Media	Acuífero
	III	Depósitos salinos	Primaria Secundaria	Media	Supuestamente Acuitardo
	IV	Depósitos coluviales Depósitos eólicos Depósitos glaciares Depósitos palustres Depósitos remoción en masa Depósitos de avalancha Formación Visviri Formación Lauca	Primaria	Media	Supuestamente Acuitardo
	V	Formación Lupica (a, d) Formación Putani	Secundaria	Media-Baja	Supuestamente Acuitardo
	VI	Remanentes volcánicos Mioceno Domos volcánicos del Pleistoceno Ignimbrita Lauca Formación Putani (ignimbrita) Formación Lupica (b) Flujos piroclásticos	Secundaria	Baja	Supuestamente Acuícludo

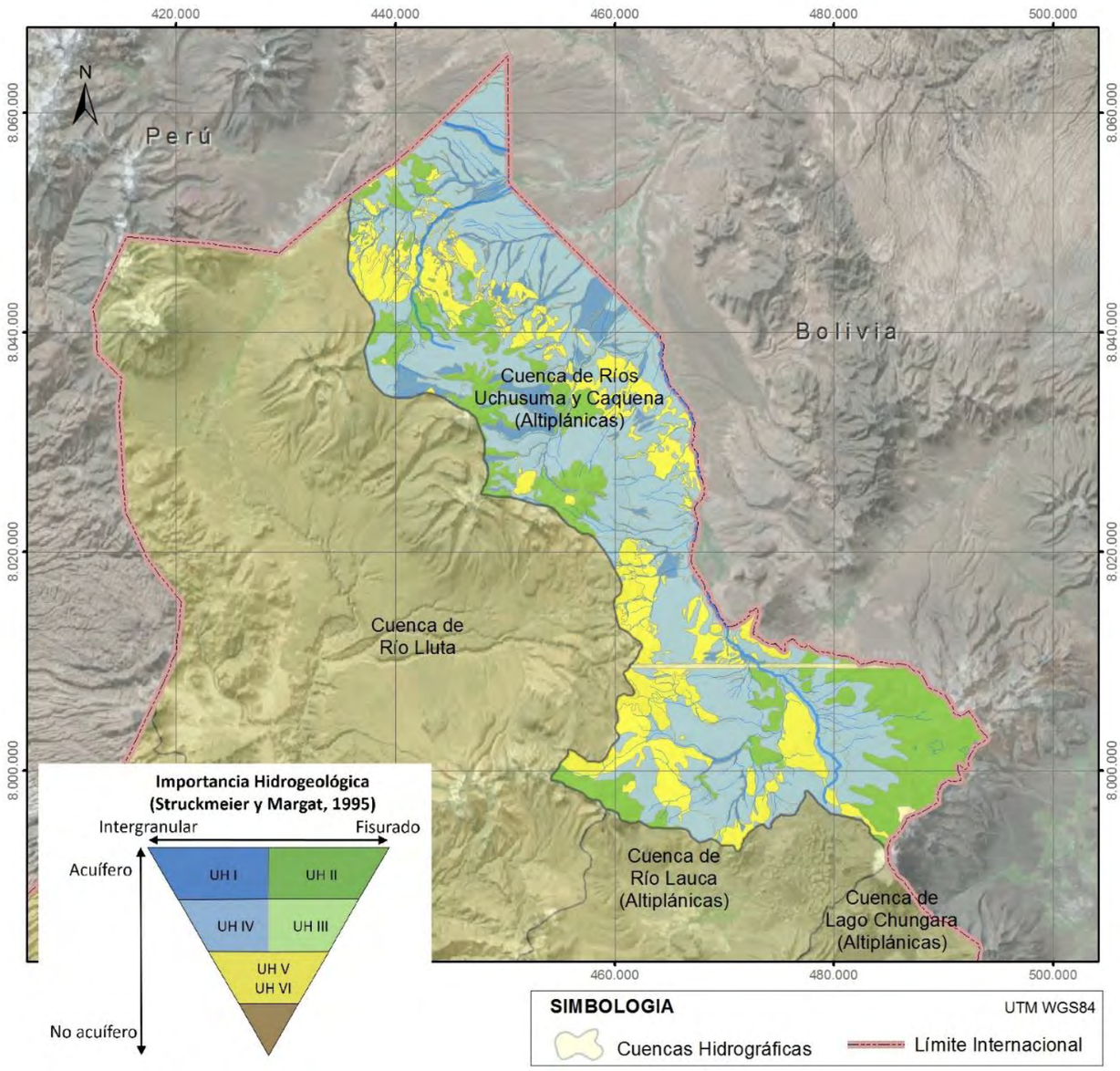


Figura 7.254 Mapa de las unidades según la importancia hidrogeológica presentes en la cuenca de los ríos Uchusuma y Caquena. Fuente: elaboración propia.

7.7.3.3 Parámetros hidráulicos

En la cuenca de los ríos Uchusuma y Caquena no existe registro de pruebas de bombeo que permita estimar valores de los parámetros hidráulicos de las unidades hidrogeológicas. Sin embargo, en el estudio de la DGA (2003) se definieron algunos parámetros hidráulicos de la Unidad Hidrogeológica II (volcanes del Pleistoceno) en base a los datos obtenidos en pozos localizados en las mismas formaciones geológicas, pero en otras cuencas del norte de Chile. Además, en la Tesis de Apaza (2004) se interpretaron un par de pruebas de bombeo de los pozos de respaldo del Canal Uchusuma, en las unidades hidrogeológicas I y II. Por lo tanto, en la Tabla 7.158 se han estimado los parámetros hidráulicos según la bibliografía y en los casos que no hay información se consideró la literatura existente para materiales geológicos similares.

Tabla 7.158 Resumen de los parámetros hidráulicos de cada unidad hidrogeológica de la cuenca de los ríos Uchusuma y Caquena. Fuente: elaboración propia.

Cuenca	Unidad Hidrogeológica	Régimen	T (m^2/día)	K (m/día)	Ss (m^{-1})	Sy (%)	Comentario
Ríos Uchusuma y Caquena	I	Libre	750	86		5-30	T y K estimado por Azapa (2004)
	II	Libre	1.960	10-30	$9E^{-3}$		T y K estimado por Azapa (2004) depósitos volcánicos
	III	Libre		$8E^{-7}$ – 1		--	K estimado por Domenico y Schwartz (1990) para rocas sedimentarias
	IV	Libre		$1E^{-3}$-$5E^{-1}$		--	K estimado por Domenico y Schwartz (1990) para rocas sedimentarias
	V	Libre		$7E^{-4}$-$1E^{-2}$		--	K estimado por Domenico y Schwatz (1990) y S por Dominico y Mifflin (1965)
		Confinado			$3E^{-6}$-$1E^{-5}$		
	VI	Libre		$1E^{-5}$-$7E^{-3}$		--	K estimado por Aguaconsult (2010) de la Fm. Lupica
		Confinado			$3E^{-6}$-$1E^{-5}$		

7.7.3.4 Piezometría

En el tramo chileno de la cuenca de los ríos Uchusuma y Caquena solo existe un pozo para el abastecimiento del poblado de Visviri, y no hay registro de niveles ni de exploraciones hidrogeológicas. Sin embargo, la tesis de Apaza (2004) registró algunos niveles de las unidades hidrogeológicas I y II. En la Figura 7.255 se muestran las isopiezas elaboradas por Apaza (2004) y las isopiezas inferidas a partir de las observaciones en terreno, los bofedales observados en las imágenes satelitales y de las curvas de nivel del IGM cada 50 m.

En el mapa piezométrico se identifica un flujo principal de dirección sur a noreste y un flujo convergente hacia el río Caquena a lo largo de la cuenca. Existen flujos en dirección oeste a este, proveniente de las zonas altas de los volcanes que se ubican en el límite oriental de la cuenca (cerro Condoriri). Del mismo modo el límite occidental formado por altas cumbres alimenta a las quebradas y finalmente al río Caquena con una dirección de flujo generalmente de oeste a este, desde las cotas altas hacia las bajas. Por último, desde el norte (Acuífero Uchusuma-Perú) existe una entrada de flujo subterráneo de dirección noroeste a sureste desde el territorio peruano hacia el boliviano pasando por Chile.

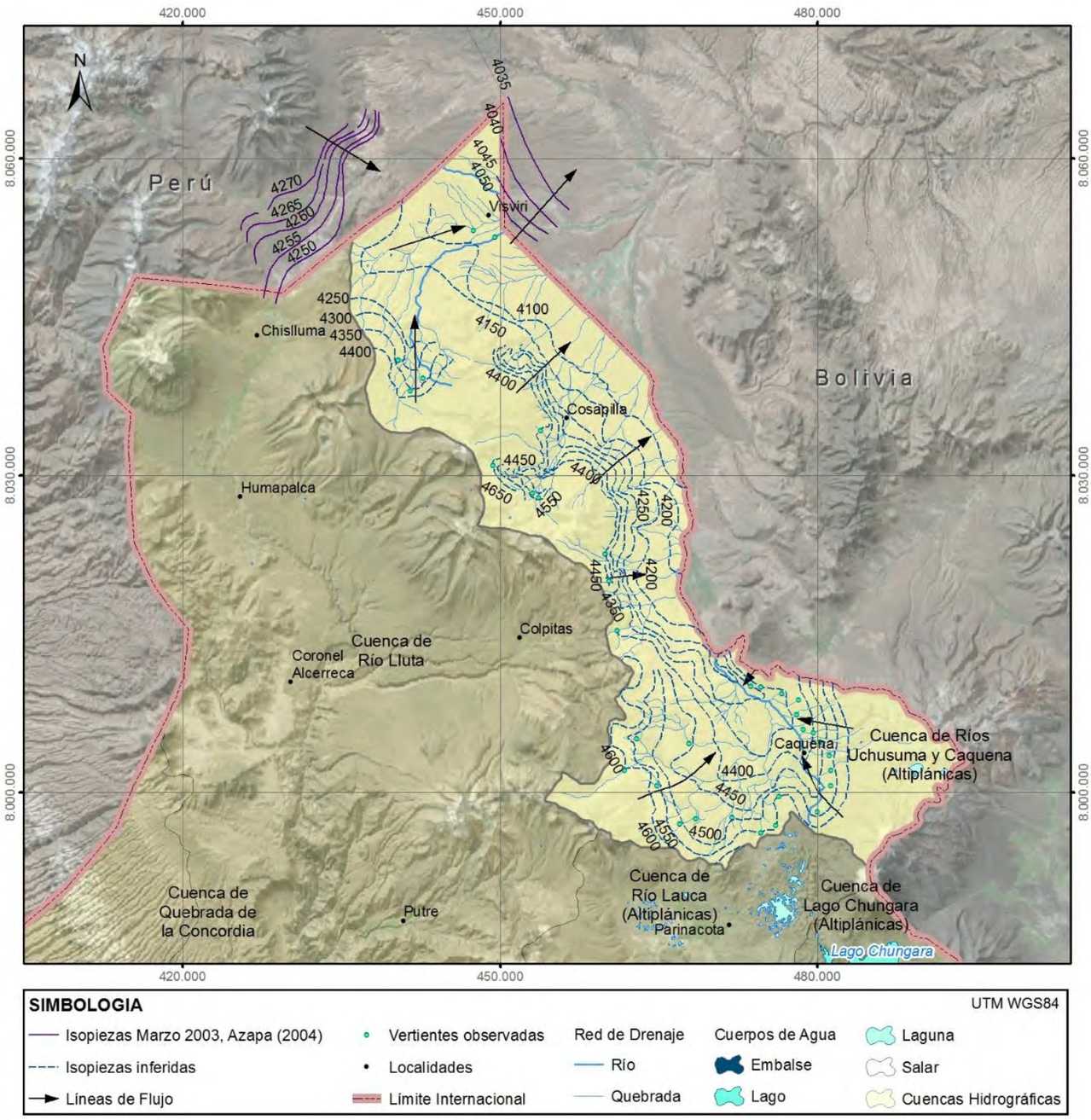


Figura 7.255 Mapa piezométrico en la cuenca de los ríos Uchusuma y Caquena. Fuente: elaboración propia.

7.7.4 Caracterización Hidroquímica

A continuación se analizaron los escasos antecedentes hidroquímicos que existen en la cuenca de los ríos Uchusuma y Caquena y los datos hidroquímicos e isotópicos obtenidos en las 4 campañas de terreno efectuadas en el presente estudio. A partir de esta información se caracterizaron hidroquímica e isotópicamente las aguas de los ríos Caquena y Putani y de sus tributarios. Por otro lado, se analizó el contenido de diferentes elementos de la aguas con la norma chilena para agua potable, NCh 409/1.Of2005.

7.7.4.1 Estudios hidroquímicos existentes

Los estudios o análisis hidroquímicos desarrollados en la cuenca de los ríos Uchusuma y Caquena previamente a este estudio es el monitoreo de calidad de agua de la Dirección General de Aguas (DGA). Niemeyer (1968) realizó un breve análisis de la calidad del agua en el río Caquena en el sector del pueblo con la misma toponimia y por último Ayala, Cabrera y Asociados (1994a) y DICTUC (2009) describen los datos hidroquímicos registrados en las estaciones "Río Caquena en Caquena" y "Río Caquena en Vertedero".

A fines de la década de los años 60, Niemeyer (1968) evaluó la posibilidad de desviar el río Caquena hacia el río Lluta para mejorar la calidad de las aguas de este último. Para ello se muestreo el agua del río Caquena en las cercanías del pueblo Caquena para posteriormente definir la calidad del agua del río Lluta si se mezclase con el río Caquena.

En los informes de Ayala, Cabrera y Asociados (1994a) se describe la composición química de las aguas del río Caquena muestreadas en dos puntos, la estación "Río Caquena en Caquena" y la estación "Río Caquena en Vertedero". A partir de esta información considera que las aguas del río Caquena son alcalinas, pH promedio de 7,9, una conductividad eléctrica que varía entre 600 y 1.600 µS/cm, con un promedio de 1.200 µS/cm. Los valores de bicarbonatos son altos, de 280 mg/L, en cambio los carbonatos son bastante bajos, no sobrepasando los 4,3 mg/L en promedio. En el caso del sodio se mantiene constante entre las dos estaciones, sin embargo, los contenidos de magnesio, calcio y potasio disminuyen entre estos dos puntos. Los sulfatos y cloruros presentan comportamiento opuesto, disminuyendo para el caso de los

primeros y aumentando los segundos, siendo los valores promedios 220 mg/L y 160 mg/L respectivamente. El contenido de nitratos no supera los 0,2 mg/L, siendo de promedio un valor de 0,06 mg/L. En lo que respecta al arsénico se tienen valores que el promedio superan 0,1 mg/L, mientras que el boro presenta valores muy diferentes entre el valor registrado en el pueblo de Caquena, de 2,7 mg/L, y en la estación "Río Caquena en Vertedero", con un valor medido de 3,6 mg/L. El hierro presenta valores inferiores a 1,2 mg/L, no sobrepasando en promedio los 0,9 mg/L. Por último el cobre presenta valores bajos, no superando los 0,05 mg/L en promedio.

La DGA registró el pH, la conductividad eléctrica, y los parámetros químicos de boro, arsénico y hierro en las estaciones "Río Caquena en Guacollo", "Río Cosapilla en Cosapilla", "Colpas en Visviri" y "Río Putani en Visviri" en el año 1980. En cambio, en la estación "Río Caquena en vertedero" se registró el pH, la conductividad eléctrica y el contenido en metales desde el año 1980 hasta 2014.

En el informe DICTUC (2009) se compila gran cantidad de resultados de análisis hidroquímico efectuados en las cuencas altiplánicas del norte de Chile. En esta base de datos se encuentran los resultados del monitoreo de aguas en la estación de la DGA "Río Caquena en Vertedero" desde el año 1980 hasta 1992. La Figura 7.256 muestra los diagramas de Piper y Schoeller-Berkaloff de estas aguas, en color morado se han presentado las aguas recolectadas durante el invierno altiplánico. Se observa que son aguas cloruradas-bicarbonatadas, pero durante los meses del invierno altiplánico son aguas bicarbonatadas-cloruradas, reflejo de la química de las precipitaciones (bicarbonatadas). Los cationes que predominan son el magnesio y el sodio por igual. En el diagrama Schoeller-Berkaloff se identifica que son aguas muy diluidas durante todo el año, pero aún más durante los meses afectados por el invierno altiplánico.

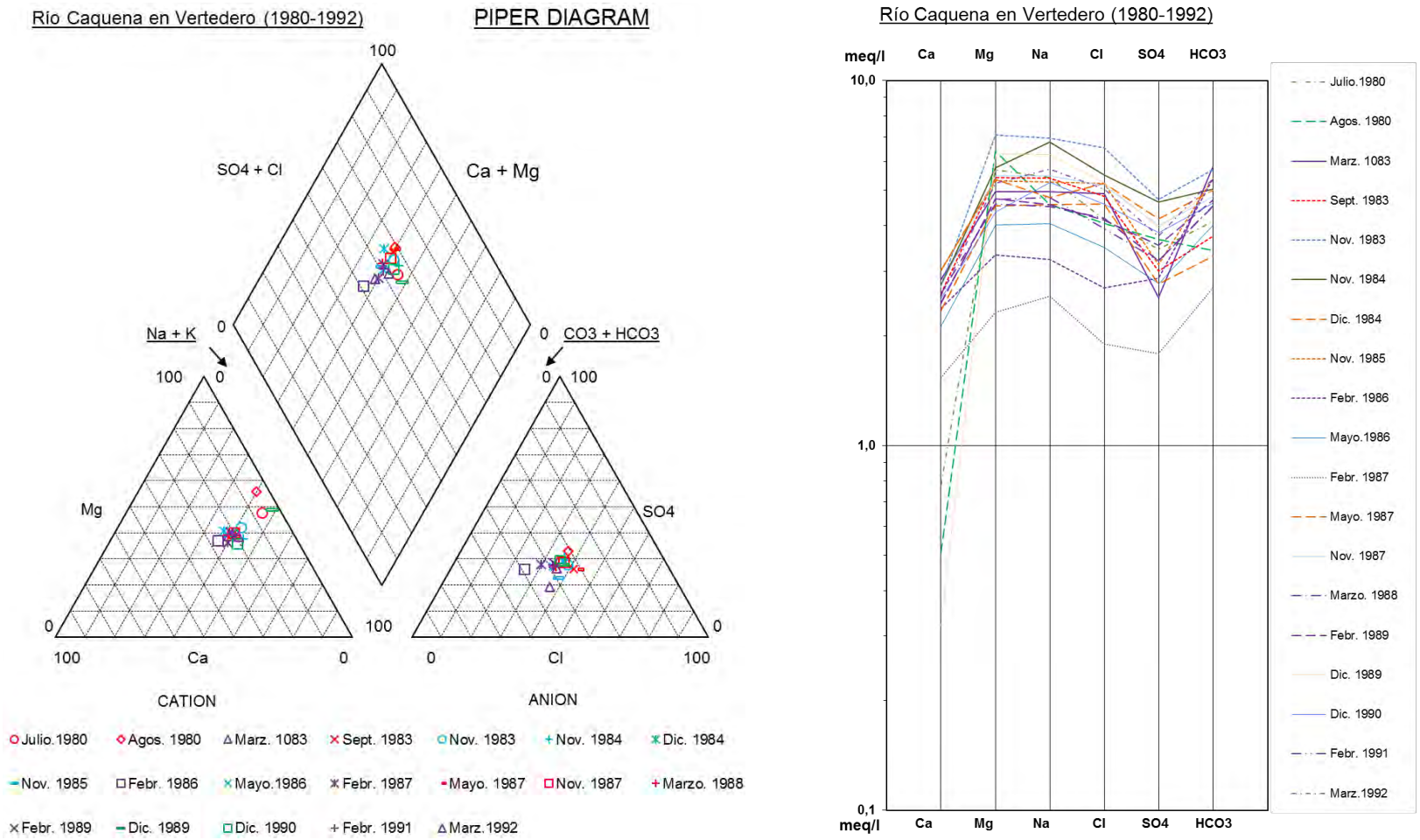


Figura 7.256 Diagramas de Piper y de Schoeller-Berkaloff de las muestras analizadas hidroquímicamente en la **estación de la DGA "Río Caquena en Vertedero",** correspondiente a la base de datos del estudio de DICTUC (2009). Fuente: modificado de DICTUC (2009).

En la gráfica de la Figura 7.257 se identificó que en el año 1988 hubo un contenido máximo de boro, de 15,5 mg/L, pero si no se considera este dato el contenido de boro varía entre 1 y 4,3 mg/L. Tal como se puede observar en la Figura 7.258 el contenido de arsénico oscila entre 0,05 y 0,33 mg/L, siendo siempre superior al límite establecido por la norma NCh 409/1.

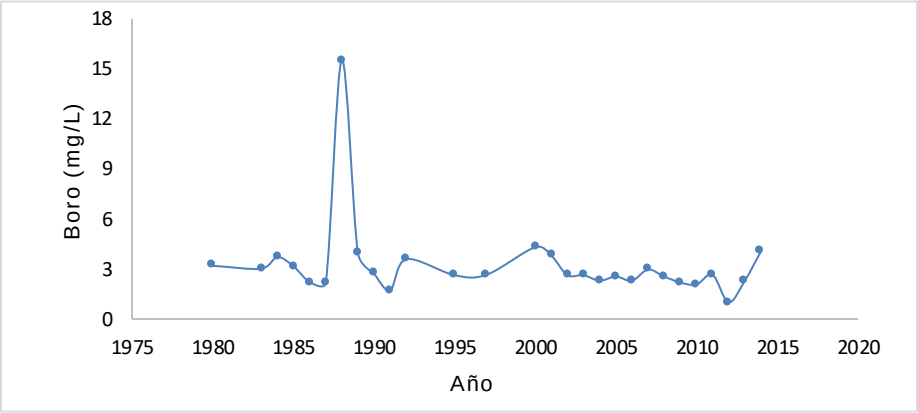


Figura 7.257 Registro del contenido de boro **en la estación "R**ío Caquena en vertedero**",** en periodo 1980-2014. Fuente: elaboración propia.

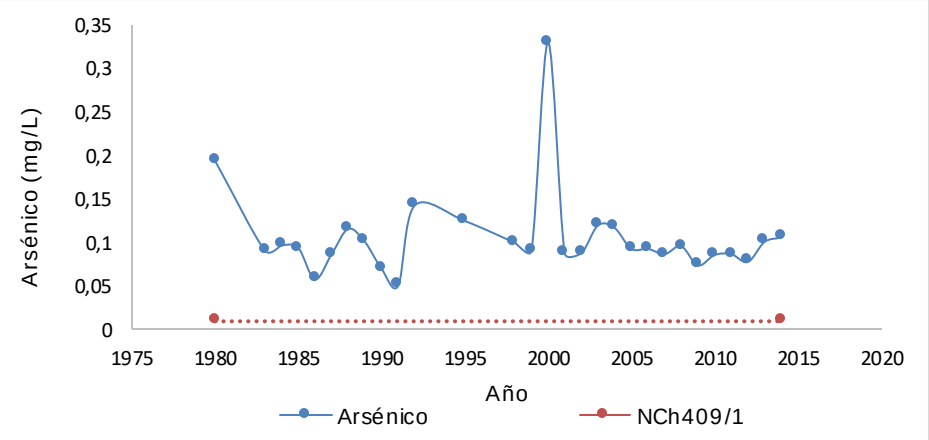


Figura 7.258 **Registro del contenido de arsénico en la estación "Río Caquena en vertedero",** en periodo 1980-2014. Fuente: elaboración propia.

7.7.4.2 Campaña de muestreo

La cuenca de los ríos Uchusuma y Caquena fue muestreada en las cuatro campañas del presente estudio para caracterizar hidroquímica e isotópicamente y determinar la calidad del agua de algunos elementos y parámetros según la norma chilena para agua potable NCh 409/1 de los ríos Caquena, Putani, la quebrada Coipacoipani y el estero Cosapilla, y para evaluar si se produce variación estacional en la composición

hidroquímica de las aguas. El programa de muestreo de este estudio se diseñó para complementar de manera efectiva la información disponible. En la Tabla 7.159 se resume el número de mediciones de los parámetros fisicoquímicos registrados *in situ*, el número de muestras tomadas para el análisis hidroquímico y para el análisis isotópico y en la Figura 7.259 se muestra la ubicación de los puntos de muestreo. En el Anexo VIII se describe el protocolo seguido en terreno para la toma de muestras de agua.

Tabla 7.159 Resumen de las actividades realizadas en la cuenca de los ríos Uchusuma y Caquena en las campañas de muestreo. Fuente: elaboración propia.

Campaña	Fecha	Medición parámetros fisicoquímicos *in situ*	Muestras para análisis hidroquímico	Muestras para análisis isotópico
Primera	18 y 19 de noviembre de 2015	21	21	11
Segunda	02, 04, 05 y 06 de marzo de 2016	21	21	14
Tercera	23 y 25 de mayo y 02 y 17 de junio de 2016	20	18	13
Cuarta	23 y 24 de agosto de 2016	14	14	8

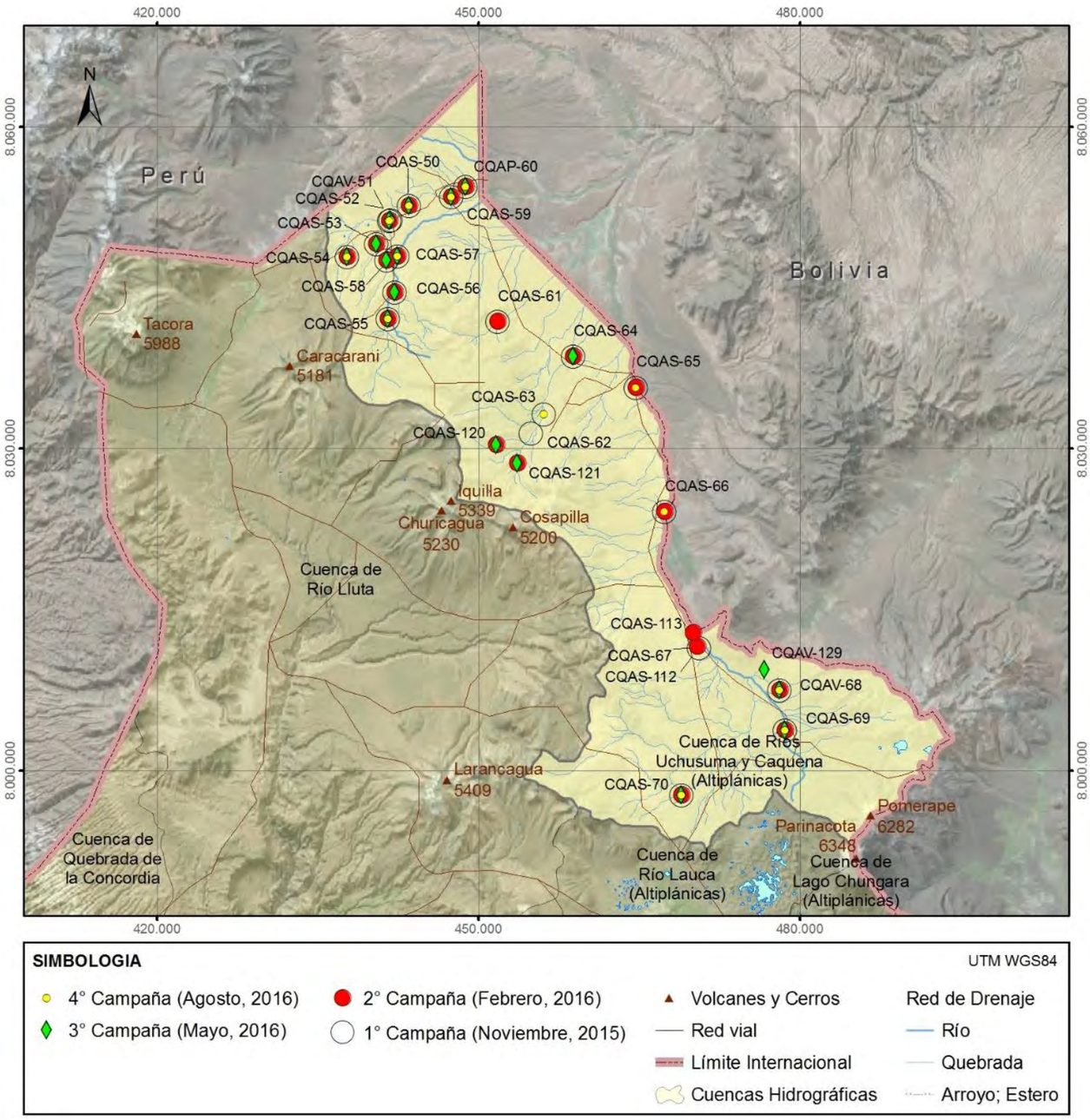


Figura 7.259 Ubicación de las muestras analizadas hidroquímica en la cuenca de los ríos Uchusuma y Caquena en las campañas de muestreo. Fuente: elaboración propia.

7.7.4.3 Parámetros fisicoquímicos *in situ*

En las 4 campañas de terreno se midieron los parámetros fisicoquímicos de las muestras que se tomaron para el análisis hidroquímico e isotópico. En esta sección se evalúan los valores de temperatura, pH, conductividad eléctrica y Sólidos Disueltos Totales (TDS) para caracterizar estos parámetros fisicoquímicos e identificar si existe alguna variación espacial y estacional de estos en la cuenca de los ríos Uchusuma y Caquena.

TEMPERATURA

La temperatura registrada en la cuenca de los ríos Uchusuma y Caquena presenta un amplio rango de variación, entre 1 y 25°C, tal como se indica en la Tabla 7.160. La significativa variación térmica de las aguas superficiales es reflejo de la oscilación térmica diaria que se produce en el altiplano.

En la Figura 7.260 se muestran las temperaturas de las aguas superficiales registradas en cada campaña de terreno. Las temperaturas más altas se midieron en el mes de febrero mientras que las temperaturas más bajas se tomaron en mayo y agosto de 2016. Sin embargo, en la Figura 7.261 se observa que la temperatura en las aguas subterráneas es prácticamente constante en el tiempo. Esta diferencia térmica entre aguas superficiales y subterráneas se debe a que las aguas superficiales están influenciadas directamente por las condiciones climáticas mientras que este efecto en las aguas subterráneas es amortiguado por el suelo y sedimentos.

Tabla 7.160 Valores máximos, mínimos y promedio de temperatura registrados en cada campaña de muestreo en la cuenca de los ríos Uchusuma y Caquena. Fuente: elaboración propia.

Temperatura (°C)	1°Campaña Noviembre 2015	2°Campaña Febrero 2016	3°Campaña Mayo 2016	4°Campaña Agosto 2016
Máxima	22	25,9	17,2	17,6
Mínima	1,5	10,5	2,6	4,1
Promedio	13,7	17,8	9,88	12,55

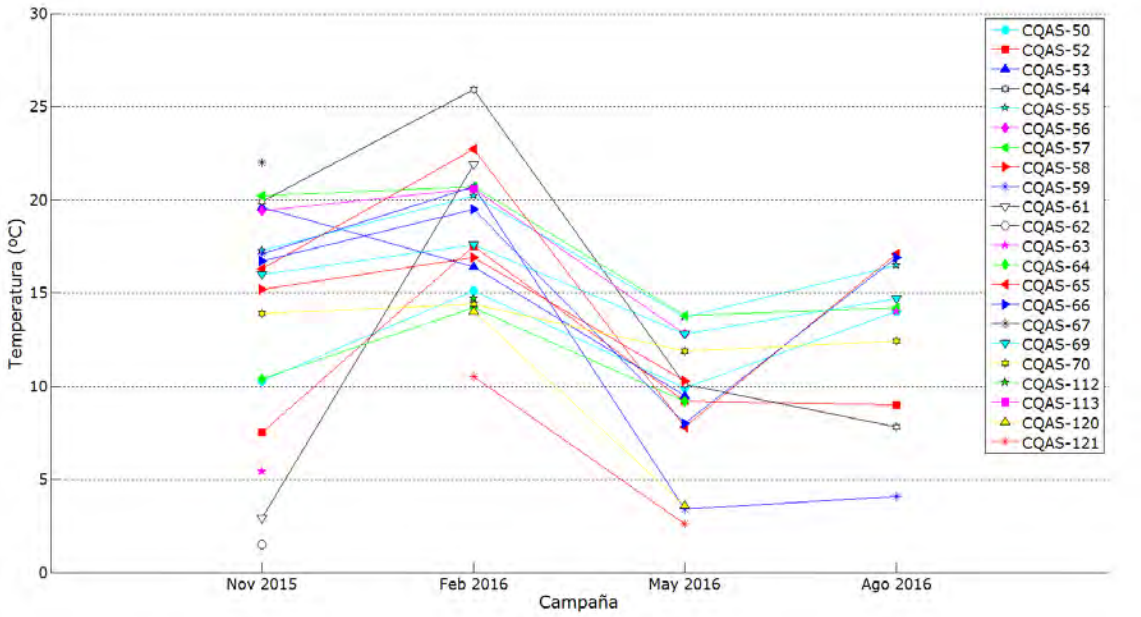


Figura 7.260 Valores de temperatura registrados en las aguas superficiales en las campañas realizadas en la cuenca de los ríos Uchusuma y Caquena. Fuente: elaboración propia.

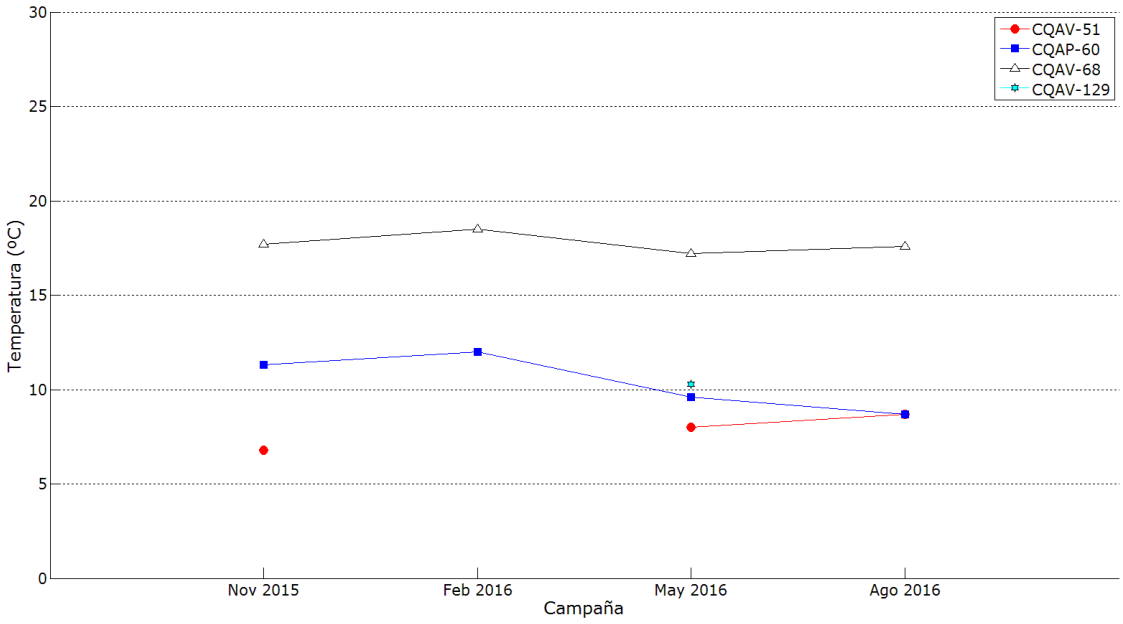


Figura 7.261 Valores de temperatura registrados en las aguas subterráneas en las campañas realizadas en la cuenca de los ríos Uchusuma y Caquena. Fuente: elaboración propia.

PH

Las aguas de la cuenca de los ríos Uchusuma y Caquena son aguas neutro-alcalinas, cuyo pH varía entre 6,6 y 9,9. La Tabla 7.161 resume los valores máximos, mínimos y promedios de pH registrados en las cuatro campañas de terreno realizadas en la cuenca de los ríos Uchusuma y Caquena durante el presente estudio.

Tabla 7.161 Valores máximos, mínimos y promedio de pH registrados en cada campaña de muestreo en la cuenca de los ríos Uchusuma y Caquena. Fuente: elaboración propia.

pH	1°Campaña Noviembre 2015	2°Campaña Febrero 2016	3°Campaña Mayo 2016	4°Campaña Agosto 2016
Máxima	9,1	9,9	8,9	8,6
Mínima	7,1	7,3	6,7	6,6
Promedio	8,3	8,4	7,8	7,7

Los valores de pH registrados en las aguas superficiales oscilan entre 7 y 9,9, ubicándose los mayores valores de pH en el río Putani, en el lago Lagunillas y en determinados tramos del río Caquena. En cambio, las aguas subterráneas tomadas en las vertientes de la cabecera del río Caquena y de la quebrada Coipacoipani y en el pozo de Visviri presentan valores de pH que varían entre 6,5 y 8,5. En las Figura 7.262 y Figura 7.263 se refleja que, generalmente, en el registro realizado en febrero 2016 se tomaron valores levemente más altos que en la campaña efectuada en noviembre de 2015, sin embargo, en mayo y agosto 2016 se midieron valores más bajos que en las campañas anteriores, tanto en aguas superficiales como subterráneas.

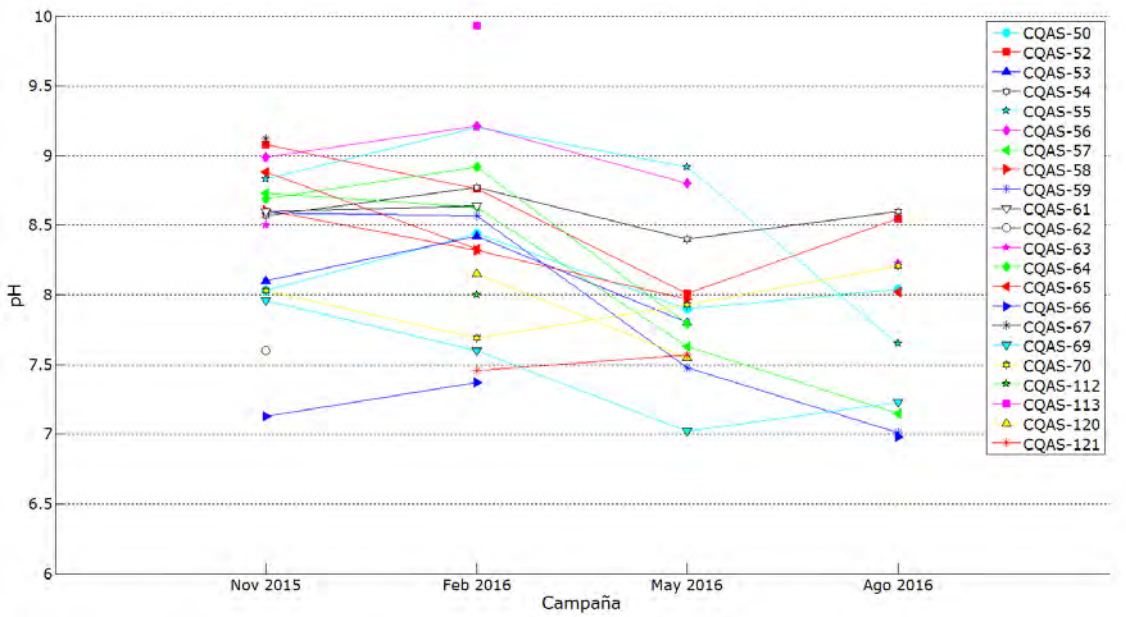


Figura 7.262 Valores de pH registrados en las aguas superficiales en las campañas realizadas en la cuenca de los ríos Uchusuma y Caquena. Fuente: elaboración propia.

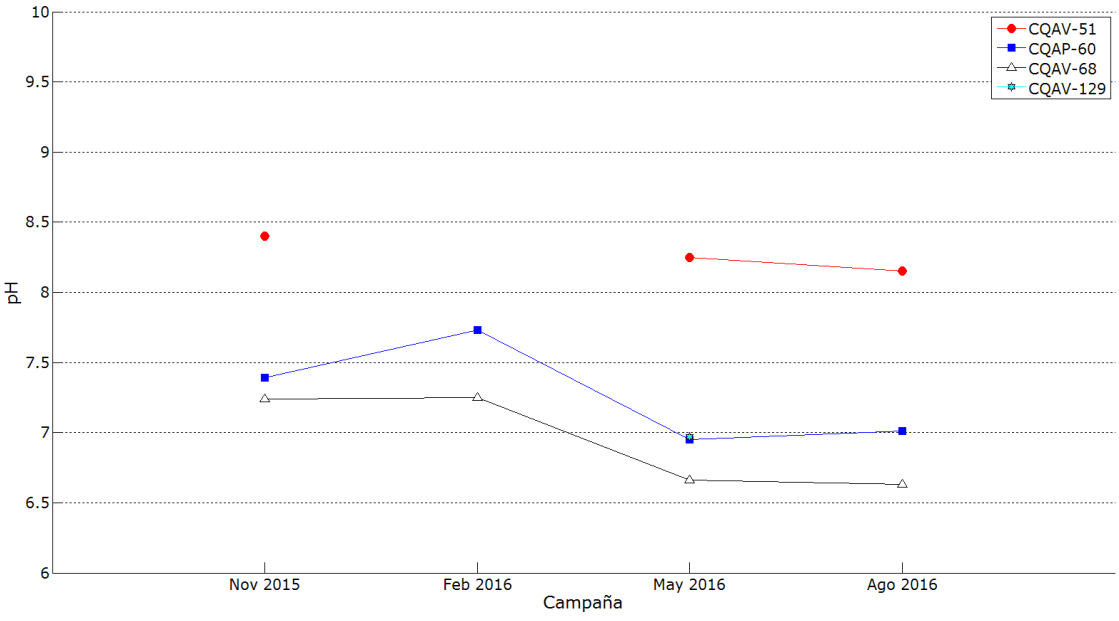


Figura 7.263 Valores de pH registrados en las aguas subterráneas en las campañas realizadas en la cuenca de los ríos Uchusuma y Caquena. Fuente: elaboración propia.

CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

La conductividad eléctrica oscila entre 26.000 y 100 µS/cm, sin embargo la mayoría de las muestras presentaban una conductividad inferior a 5.000 µS/cm. La Tabla 7.162 resume los valores máximos, mínimos y promedios registrados de la conductividad eléctrica en las cuatro campañas de terreno realizadas en el presente estudio. En la campaña de muestreo efectuada en febrero de 2016 se registraron valores de conductividad eléctrica poco fiables, por lo que se analizan los datos obtenidos en el laboratorio.

Tabla 7.162 Valores máximos, mínimos y promedio de conductividad eléctrica registrados en cada campaña de muestreo en la cuenca de los ríos Uchusuma y Caquena. Fuente: elaboración propia.

CE (µS/cm)	1°Campaña Noviembre 2015	2°Campaña Febrero 2016 (laboratorio)	3°Campaña Mayo 2016	4°Campaña Agosto 2016
Máxima	17.100	21.329	17.360	25.900
Mínima	152,2	92	197	173
Promedio	2.111	2.432	2.331	4.453

La conductividad eléctrica de las aguas analizadas hidroquímicamente en noviembre de 2015 oscila entre 152 y 17.100 µS/cm. En la Figura 7.264 se muestra que, generalmente, las aguas superficiales son aguas frescas (menores a 1.000 µS/cm), las aguas del río Caquena asciende a 1.500 µS/cm y la quebrada Guallancallani (CQAS-61) presenta 1.770 µS/cm, sin embargo, la quebrada Coipacoipani alcanza 17.100 µS/cm y 10.000 µS/cm en las muestras CQAS-50 y CQAS-52. Las aguas analizadas presentan la misma tendencia en todas las campañas de muestreo, sin embargo, en febrero de 2016 las aguas presentaban una conductividad eléctrica levemente mayor que en noviembre de 2015 y más baja en la tercera y cuarta campaña, es decir, mayo y agosto de 2016.

En la Figura 7.265 se muestra que las aguas subterráneas son aguas frescas, cuya conductividad eléctrica no supera las 1.250 µS/cm, excepto la vertiente que alimenta a la quebrada Coipacoipani, CQAV-51. La conductividad eléctrica de las aguas subterráneas es constante en el tiempo monitoreado, menos la muestra CQAV-51 que presenta 4.300 µS/cm en noviembre de 2015 y asciende a 25.900 µS/cm en agosto de 2016, valor bastante anómalo.

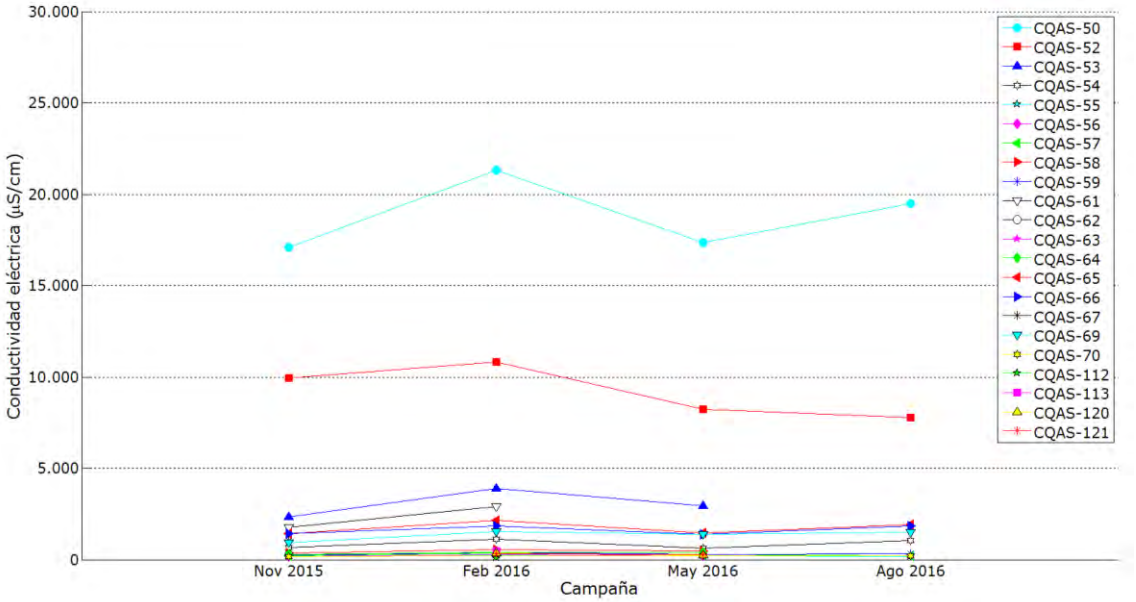


Figura 7.264 Valores de conductividad eléctrica registrados en las aguas superficiales en las campañas realizadas en la cuenca de los ríos Uchusuma y Caquena. Fuente: elaboración propia.

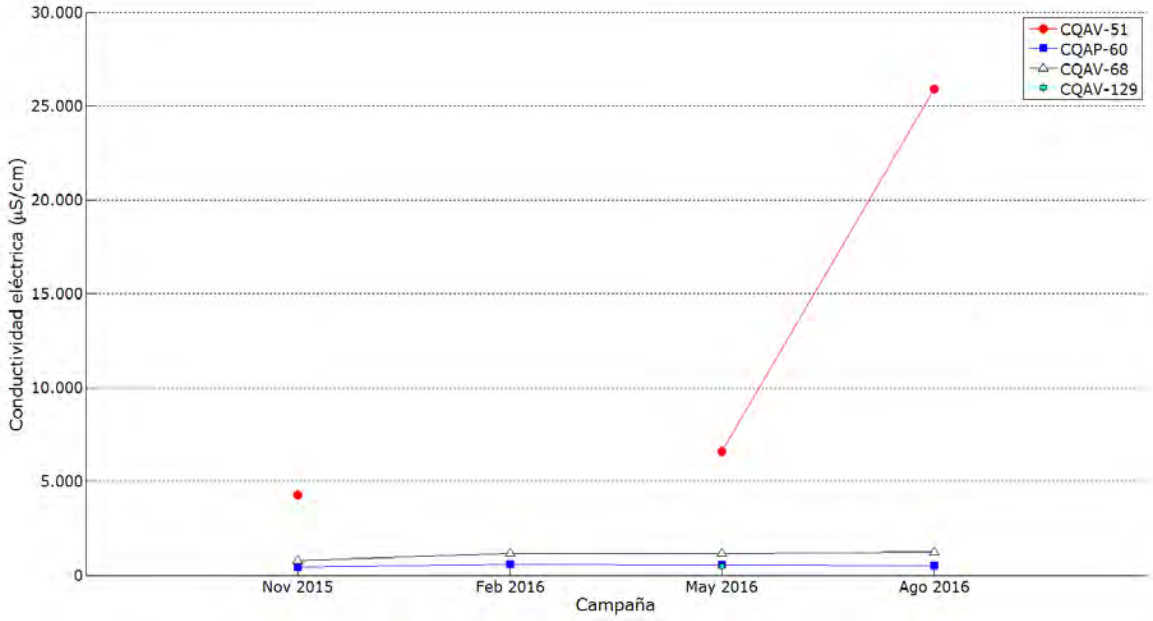


Figura 7.265 Valores de conductividad eléctrica registrados en las aguas subterráneas en las campañas realizadas en la cuenca de los ríos Uchusuma y Caquena. Fuente: elaboración propia.

SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES

En la Tabla 7.163 se resumen los valores máximos, mínimos y promedios de sólidos disueltos totales registrados en las cuatro campañas de terreno realizadas en el presente estudio, cuyo análisis es similar a la CE.

Tabla 7.163 Valores máximos, mínimos y promedio de total de sólidos disueltos registrados en cada campaña de muestreo en la cuenca de los ríos Uchusuma y Caquena. Fuente: elaboración propia.

TDS (mg/L)	1°Campaña Noviembre 2015	2°Campaña Febrero 2016 (laboratorio)	3°Campaña Mayo 2016	4°Campaña Agosto 2016
Máxima	10.940	13.366	11.430	16.550
Mínima	97	117	126	111
Promedio	1.352	1.645	1.473	2.853

7.7.4.4 Modelo hidroquímico de las aguas

CONTROL DE CALIDAD ANÁLISIS QUÍMICOS

En la Tabla 7.164 se presentan los resultados del balance iónico en el que la mayoría de las muestras cumplen el error máximo. Sin embargo, en la campaña de febrero de 2016 se produjo un error mínimo de -19,85% debido al alto contenido de sedimentos, lo que fue superado por la filtración de la muestra y reanálisis de los elementos mayoritarios disueltos en algunas muestras.

Tabla 7.164 Resumen de los valores máximos y mínimos del error del balance iónico de la composición química de las muestras de las cuatro campañas de muestreo en la cuenca de los ríos Uchusuma y Caquena. Fuente: elaboración propia.

Error del balance iónico	1°Campaña Noviembre 2015	2°Campaña Febrero 2016	3°Campaña Mayo 2016	4°Campaña Agosto 2016
Máximo	3,84%	7,68%	10,96%	8,58%
Mínimo	-4,15%	-19,85%	1,18%	-3,89%

ANÁLISIS DE FACIES QUÍMICAS

En los diagramas de Piper y de Schoeller-Berkaloff se interpretaron de color azul las aguas superficiales del río Caquena, el río Putani de color negro, las aguas superficiales de la quebrada Coipacoipani color café, las muestras del estero de Cosapilla y sus

tributarios de color morado, las diferentes quebradas de color verde, las aguas subterráneas del pozo ubicado en Visviri de color naranja y las vertientes de color rojo.

En el diagrama de Piper de la Figura 7.266 se representaron la composición química de las muestras de agua analizadas en la cuenca de los ríos Uchusuma y Caquena durante la primera campaña de terreno. La quebrada Coipacoipani es alimentada por varias quebradas, entre las que se encuentra la quebrada de aguas bicarbonatadas sódica (CQAS-54), que nace próxima a Challaserca, por la vertiente que pasa por Queullere (CQAS-53) que al cruzar el camino son aguas sulfatadas cálcicas y por la vertiente CQAS-58 de tipo cloruro-sulfatadas sódico-cálcicas. Una vez se unen estas quebradas las aguas de la quebrada Coipacoipani son cloruradas sódicas (CQAS-52), mientras que la muestra CQAV-51 tomada a escasos metros de la muestra CQAS-52 es de tipo sulfatada sódica. Aguas abajo, la muestra CQAS-50 es clorurada sódica. La marca hidroquímica de las aguas de la quebrada Coipacoipani puede estar influenciada por las aguas procedentes del Lago Blanco.

En el diagrama de Piper se representaron en color verdoso, las muestras recogidas en el río Putani durante la primera campaña, desde la naciente hacia aguas abajo hasta Visviri. En general son aguas de tipo sulfatadas, pero con alto porcentaje de bicarbonatos, cuyo contenido de cationes en la naciente (CQAS-55), es cálcico-magnésicas.

En el sector medio-sur de la cuenca, las aguas que nacen en vertientes de los conos volcánicos que limitan la cuenca en el borde poniente son aguas sulfatadas sódico-cálcicas, exceptuando una muestra bicarbonatada, en cambio la vertiente ubicada en cerro Condoriri, límite surponiente de la cuenca, son aguas cloruradas sódicas. El río Caquena en Caquena son mezcla de las aguas de los dos bordes que alimentan el río, sin embargo, curso abajo las aguas son cloruradas sódicas, similar a las aguas de la vertiente que nace en el cerro Condoriri. Esto implicaría que el río Caquena tiene como principal fuente de recarga el borde volcánico surponiente de la cuenca (Pv(a)).

En el diagrama Piper se presentan de color naranjo las aguas muestreadas en el río Caquena y las vertientes que lo alimentan. Las aguas del río Caquena en el puente de Caquena (CQAS-69) son de tipo sulfatos-bicarbonatadas magnésico-sódica, aguas abajo el río Caquena recibe el aporte de las aguas de la vertiente que son cloruradas

sódicas (CQAV-68) y más aguas abajo de este punto se incorpora la quebrada Ullani, que en Lagunillas (CQAS-70) son aguas sulfatadas sódico-cálcicas. Aguas abajo de la confluencia de estos aportes, la composición hidroquímica de la muestra CQAS-67 en el río Caquena es cloruro-sulfatada sódico-magnésica. En el sector donde el río Caquena constituye la frontera con Bolivia, CQAS-66 y CQAS-65, la composición hidroquímica se estabiliza siendo aguas cloruradas sódicas, la misma huella hidroquímica que la vertiente CQAS-68, pero esta última con mayor contenido de sales disueltas. Por otro lado, la quebrada del cerro Nevado de Chiquinanta, cerca de Caamana, la muestra CQAS-62 es de tipo bicarbonatada y con un contenido de cationes similares (Mg, Na y Ca), mientras que aguas abajo cuando se junta con la quebrada que canaliza las aguas de los cerros Iquilla, Churicahua, Copotanca y Cosapilla son aguas sulfatadas sódico-cálcicas. En el curso más bajo de esta quebrada las aguas continúan siendo sulfatadas sódico-cálcicas, CQAS-64. La muestra CQAS-61, próxima a Guallancallari, presenta la misma huella química, pero con mayor grado de contenido en elementos mayores.

Del análisis realizado en febrero de 2016 se concluyó que las facies obtenidas en noviembre de 2016 se mantienen constantes en el tiempo. Únicamente se observó un mayor contenido de bicarbonatos en el nacimiento del río Putani en febrero y en la muestra tomada en Lagunillas.

En los diagramas Schoeller-Berkaloff se observa que la quebrada Coipacoipani y la vertiente que alimenta a este quebrada (CQAV-51) presenta las aguas más mineralizadas de la cuenca, y por debajo están las aguas del río Caquena y las vertientes que la alimentan en la cabecera al río Caquena, mientras que las aguas menos mineralizadas son las aguas del río Putani y del estero Cosapilla y sus tributarios.

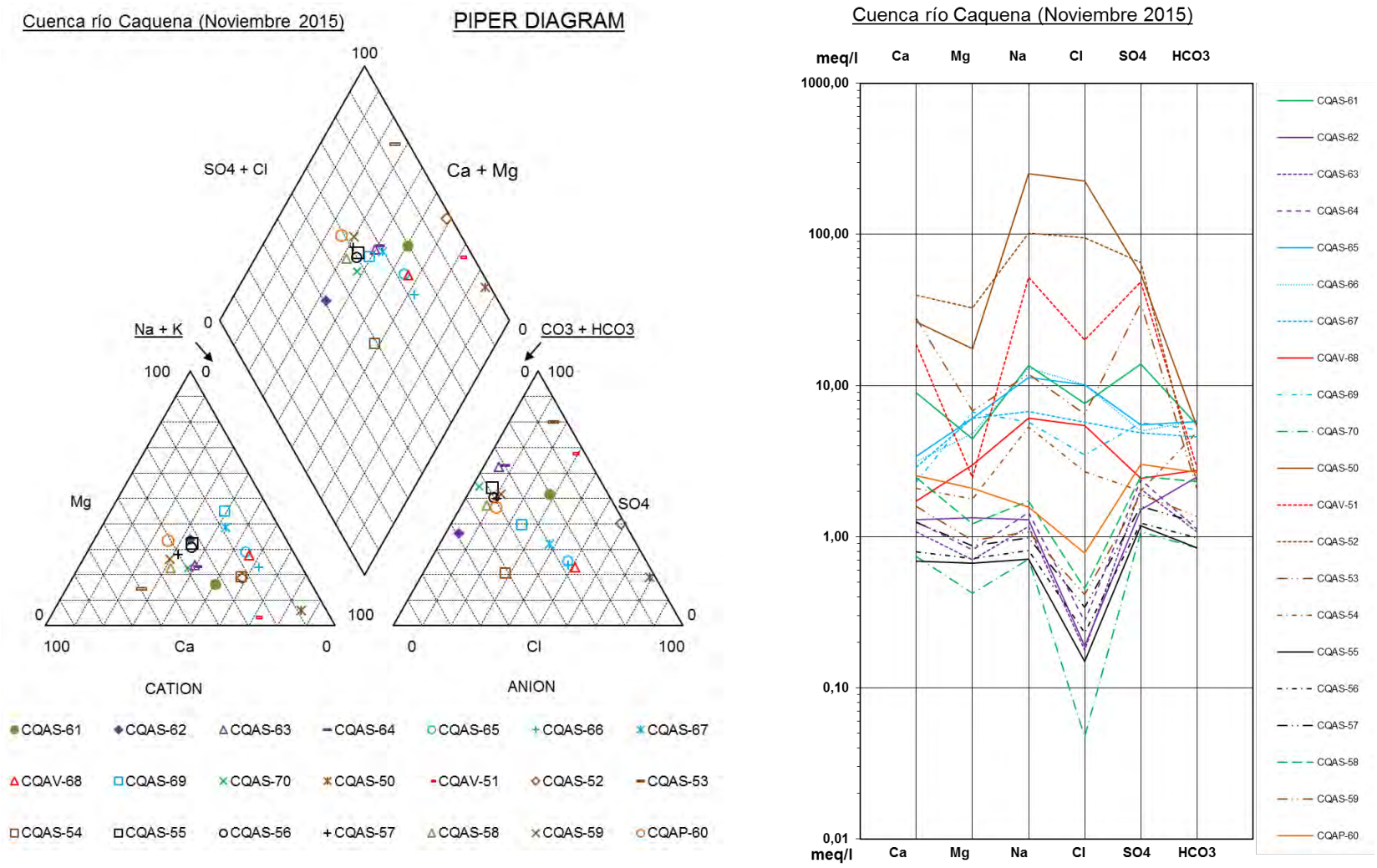


Figura 7.266 Diagramas de Piper y Schoeller-Berkaloff de las muestras analizadas hidroquímica en la cuenca de los ríos Uchusuma y Caquena, campaña noviembre de 2015. Fuente: elaboración propia.

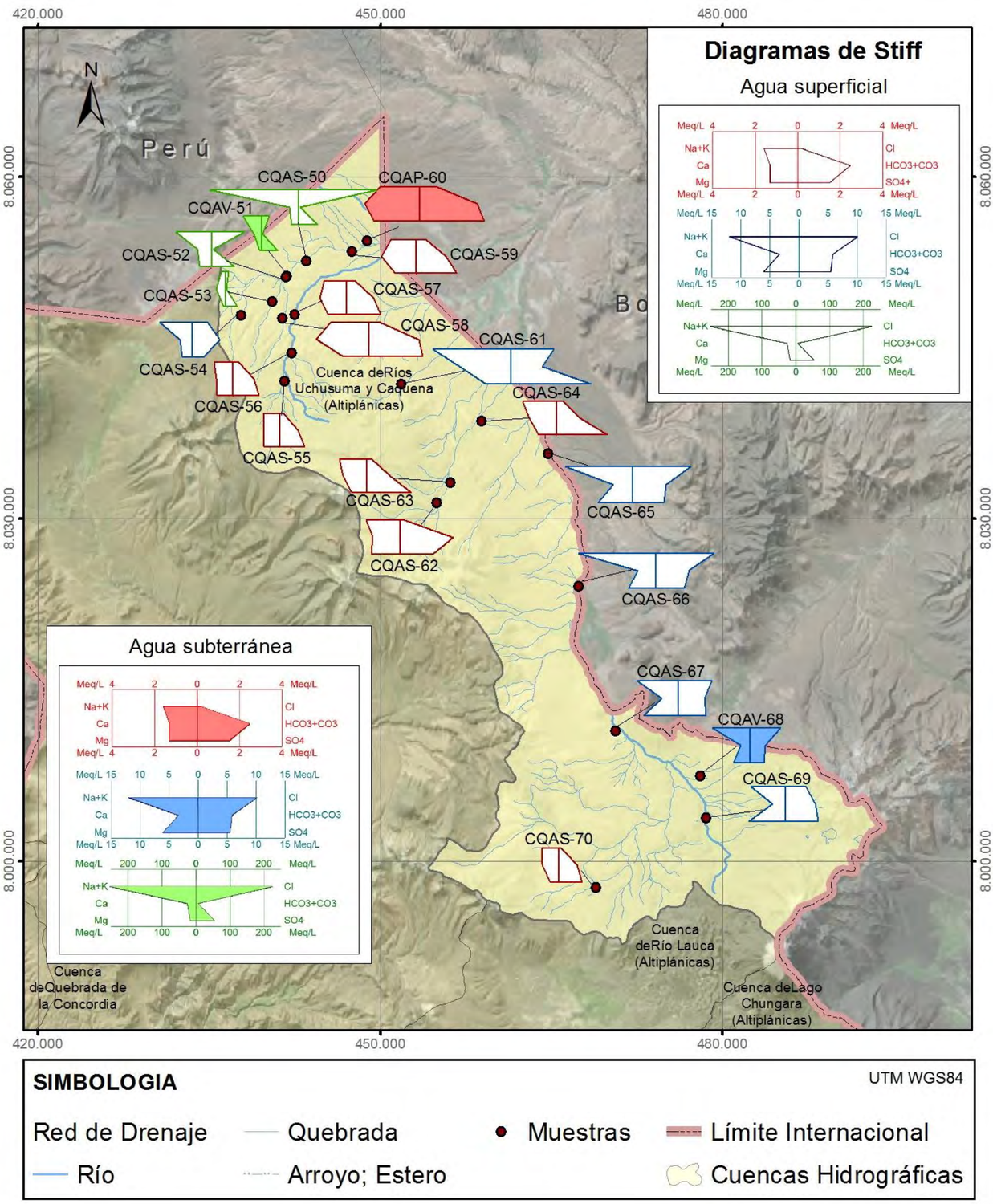


Figura 7.267 Diagramas de Stiff de las muestras analizadas hidroquímica en la cuenca de los ríos Uchusuma y Caquena, campaña noviembre de 2015. Fuente: elaboración propia.

En el Anexo VIII se presentan los gráficos del contenido de elementos mayoritarios y minoritarios obtenidos en el análisis realizado en las 4 campañas de muestreo. Las aguas superficiales contienen mayor contenido de elementos mayoritarios y minoritarios que las aguas subterráneas, sobre todo las muestras de la quebrada Coipacoipani (CQAS-50 y CQAS-51). En la Figura 7.268 se presenta la muestra tomada en la vertiente de la quebrada Coipacoipani (CQAV-51) que destaca por contener un alto nivel de potasio, sodio, sulfatos, calcio, fluoruros y cloruros en agosto de 2016.

Figura 7.268 Muestra CQAS-51 tomada en una vertiente de la quebrada Coipacoipani. Fuente: elaboración propia.

Destaca el alto contenido de selenio y amonio en los resultados de la composición hidroquímica de algunas muestras de agua superficial muestreadas en agosto 2016, y de zinc en las aguas analizadas en noviembre de 2015.

Evolución de la composición química de las aguas

Las aguas del río Caquena en el pueblo Caquena son aguas alcalinas, sulfatos-bicarbonatadas magnésico-sódicas, pero que van evolucionando a cloruradas sódicas. Esta evolución química de las aguas es hacia las mismas facies que la vertiente que alimenta dicho río desde el cerro Condoriri, desde el límite suroriente de la cuenca. Desde el sector surponiente, el río Caquena recibe las aguas frescas, básicas y sulfatos-bicarbonatadas cálcico-sódicas de Lagunillas, que en febrero pasan a ser bicarbonatadas cálcico-sódicas y pH neutro. Esto implicaría que el río Caquena tiene

como principal fuente de recarga el borde volcánico surponiente de la cuenca (Pv(a)).

Aguas abajo, el río Caquena recibe el aporte de agua del estero Cosapilla. El estero Cosapilla nace de la confluencia de las quebradas Chujlluta, afloramiento del complejo volcánico Copatanca, y Choco, del complejo volcánico Chuquiananta. Estas aguas evolucionan de aguas frescas, bicarbonatadas a sulfatadas cálcico-sódicas.

En otra quebrada más al norte, nace la quebrada Guallancani del cerro Chiansaya. La quebrada Guallancani se caracteriza por tener aguas sulfatadas sódicas con alto contenido de calcio.

El río Putani nace del afloramiento de las aguas que aporta el complejo volcánico Caracarani y desde la Pampa Ucho, la cual está recargada por el lado norte del complejo volcánico Chuquiananta. El río Putani, desde la naciente hacia aguas abajo hasta Visviri, se caracteriza por presentar aguas frescas, de pH básico y un alto contenido de arsénico. Las facies son sulfatadas, pero con alto porcentaje de bicarbonatos, el contenido de cationes está en equilibrio, siendo ligeramente más predominante el calcio. En febrero se observó un mayor contenido de bicarbonatos en el nacimiento del río Putani.

La quebrada Coipacoipani nace de la confluencia de numerosas quebradas cuyas facies varían desde aguas frescas sulfatadas cálcicas a bicarbonatadas sódicas, aunque la propia quebrada Coipacoipani presenta una alta conductividad eléctrica y aguas cloruradas sódicas. Se muestreó una vertiente que alimentaba a la quebrada y eran aguas salobres sulfatadas sódicas. La muestra de la quebrada Coipacoipani en la carretera A-93 son aguas frescas y sulfatadas cálcicas, tienen el mismo contenido de sulfatos y calcio, pero menos cloruros y sodio que aguas arriba. La quebrada Coipacoipani presenta las aguas más mineralizadas de la cuenca, por debajo están las aguas del río Caquena y las aguas menos mineralizadas son las aguas del río Putani y del estero Cosapilla y sus tributarios. Las muestras tomadas en la quebrada Coipacoipani son las muestras con mayor contenido de boro y litio de la cuenca, lo cual junto al alto contenido de calcio, potasio, sulfatos y cloruros podría indicar una influencia de los depósitos evaporíticos del lago Blanco, ubicado en el sector fronterizo con Perú.

Las aguas subterráneas del pozo de abastecimiento del pueblo de Visviri son neutras, frescas y facies sulfatos-bicarbonatadas cálcico-magnésicas.

7.7.4.5 Calidad de las aguas

En la primera campaña de terreno, noviembre de 2015, se analizaron los contenidos de elementos mayoritarios y minoritarios disueltos en las aguas superficiales y subterráneas para poder comparar con el contenido de elementos mayoritarios y minoritarios totales analizados en el resto de las campañas de muestreo. En el Anexo VIII se presentan los resultados de las mediciones de parámetros *in situ* y análisis de laboratorio, y dentro de cada tabla se remarcaron en rojo aquellos valores que sobrepasan la norma chilena para uso de agua potable NCh 409 y en color verde los valores que superan el límite de aluminio y boro establecido en la norma para riego NCh 1.333.

Las 21 muestras analizadas en la cuenca de los ríos Uchusuma y Caquena en la primera campaña de terreno efectuada en noviembre de 2015 presentaron un contenido de cadmio, cianuro, cobre, cromo, magnesio, nitratos, nitritos, relación nitratos/nitrito, amoniaco y selenio por debajo del límite establecido en la norma NCh 409/1. Ninguna muestra de agua es apta para el consumo humano, ya que todas menos la vertiente CQAS-70 exceden los límites de arsénico establecido en la norma. Sin embargo, la muestra CQAS-70 tomada en el lago Lagunillas supera el hierro indicado en la norma. El resto de las muestras superan el nivel de arsénico, hierro, manganeso, mercurio, plomo, sulfatos, sólidos disueltos totales, zinc disuelto y/o pH.

Durante la segunda campaña de muestreo, febrero de 2016, se analizaron 21 muestras de agua. Únicamente la muestra CQAS-112 es apta para el consumo humano, ya que el resto de muestras superan los niveles de arsénico, cloruros, fluoruros, hierro, magnesio, manganeso, mercurio, sulfatos, sólidos disueltos totales y/o pH determinados en la norma NCh 409. Por otro lado, 10 de las muestras sobrepasan el límite de boro y en una muestra el contenido de aluminio establecido en la norma de riego NCh 1.333.

Posteriormente, del análisis de las 18 muestras de agua tomadas en mayo 2016 se obtuvo que ninguna es apta para el consumo humano debido a que sobrepasan el contenido de arsénico, cloruros, cromo, fluoruros, hierro, magnesio, manganeso,

plomo, sulfatos y/o sólidos disueltos totales y pH determinados en la norma NCh 409. En 8 de las muestras se supera el límite de boro indicado en la norma de riego NCh 1.333.

Por último, en agosto de 2016 se analizaron 14 muestras de agua superficial y subterránea, las cuales ninguna es apta para el consumo humano, ya que sobrepasan los niveles de arsénico, cloruros, fluoruros, hierro, magnesio, manganeso, selenio, sulfatos, sólidos totales disueltos y/o pH que establece la norma de agua potable NCh 409. Por otro lado, 8 de las muestras analizadas superan el límite de boro establecido en la norma de riego NCh 1.333.

El análisis de la calidad de las aguas durante las 4 campañas efectuadas en la cuenca de los ríos Uchusuma y Caquena concluye que no son aguas para el consumo humano, ya que sobrepasan siempre el límite de arsénico, entre otros elementos.

7.7.4.6 Isotopía de las aguas

En el presente estudio se tomaron muestras de aguas superficiales y subterráneas a lo largo de la cuenca de los ríos Uchusuma y Caquena y de las diferentes quebradas que existen en la cabecera de la cuenca para el análisis isotópico de la molécula del agua. En la Figura 7.269 se muestra la ubicación de los puntos de aguas superficiales y subterráneas que se analizaron en cada campaña de muestreo para el análisis isotópico. La cuenca no cuenta con estudios isotópicos realizados anteriormente.

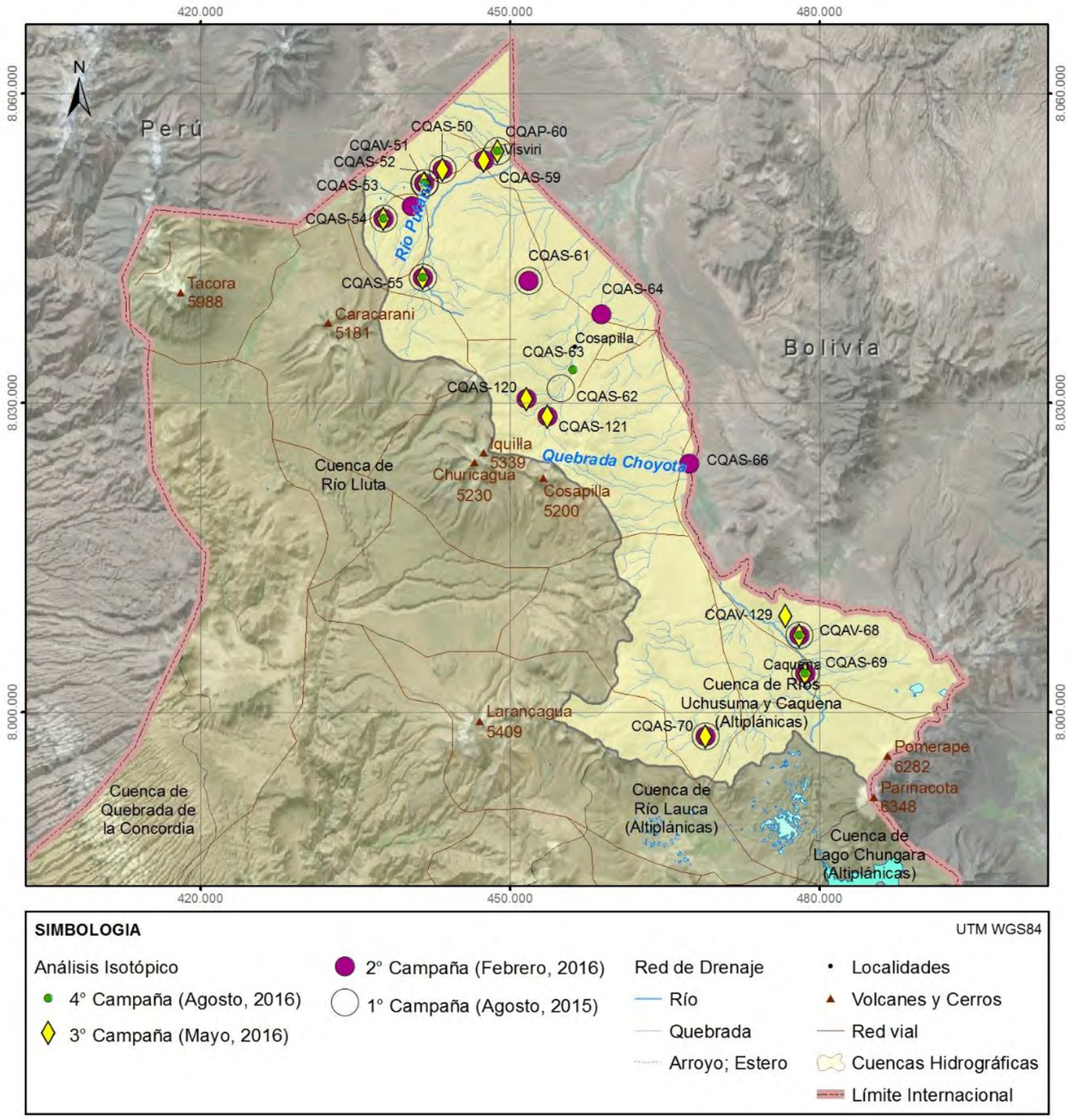


Figura 7.269 Ubicación de las muestras analizadas isotópicamente en la cuenca de los ríos Uchusuma y Caquena en las diferentes campañas de terreno. Fuente: elaboración propia.

A continuación se interpretó la composición isotópica de las aguas superficiales y subterráneas recogidas en las cuatro campañas mediante la relación entre $\delta^{18}O$ y δD. En la Tabla 7.165 se indican los valores máximos y mínimos de oxígeno 18 y deuterio obtenidos en cada campaña de muestreo.

Tabla 7.165 Resumen de los valores máximos y mínimos de oxígeno 18 y deuterio obtenidos en las cuatro campañas de muestreo en la cuenca de los ríos Uchusuma y Caquena. Fuente: elaboración propia.

		1°Campaña Noviembre 2015	2°Campaña Febrero 2016	3°Campaña Mayo 2016	4°Campaña Agosto 2016
$\delta^{18}O$‰ SMOW	Máximo	-2,38	-5,18	-8,36	-3,60
	Mínimo	-16,24	-15,90	-16,15	-15,53
δD‰ SMOW	Máximo	-62	-71,95	-87,29	-68,06
	Mínimo	-118,94	-119,72	-119,35	-115,22

En la Figura 7.270 se presenta la composición isotópica de las muestras de agua superficiales analizadas. De color azul se muestran las aguas analizadas en noviembre de 2015, de color naranjo las tomadas en febrero de 2016, de color verde las aguas muestreadas en mayo de 2016 y de color rojo las muestras analizadas en agosto de 2016. Las muestras tomadas en una quebrada tributaria al estero Cosapilla y el estero Cosapilla, el río Caquena en Caquena y el río Putani en la cabecera no muestran fraccionamiento, ajustándose a la RMM, indicando que son aguas meteóricas. El resto de muestras reflejan un grado de evaporación, ya que se ajustan a las rectas con pendiente 4, siendo las más evaporadas las aguas de la quebrada Coipacoipani y sus quebradas y el lago Lagunillas.

La composición isotópica de las aguas subterráneas refleja menor grado de evaporación que las aguas superficiales, excepto la muestra tomada en una vertiente que alimenta a la quebrada Coipacoipani (CQAS-51). En la Figura 7.271 se observa que las aguas de las vertientes que alimentan al río Caquena desde el borde oriental son aguas livianas que no han sufrido ningún proceso de evaporación, mientras que las aguas del pozo ubicado en Visviri y de la vertiente que alimenta la quebrada Coipacoipani son aguas que han sufrido evaporación y se ajustan a las rectas con pendiente 4-5. Destaca el fuerte grado de evaporación que muestra la vertiente que alimenta la quebrada Coipacoipani en el mes de agosto, del mismo modo que indica la alta mineralización de estas aguas.

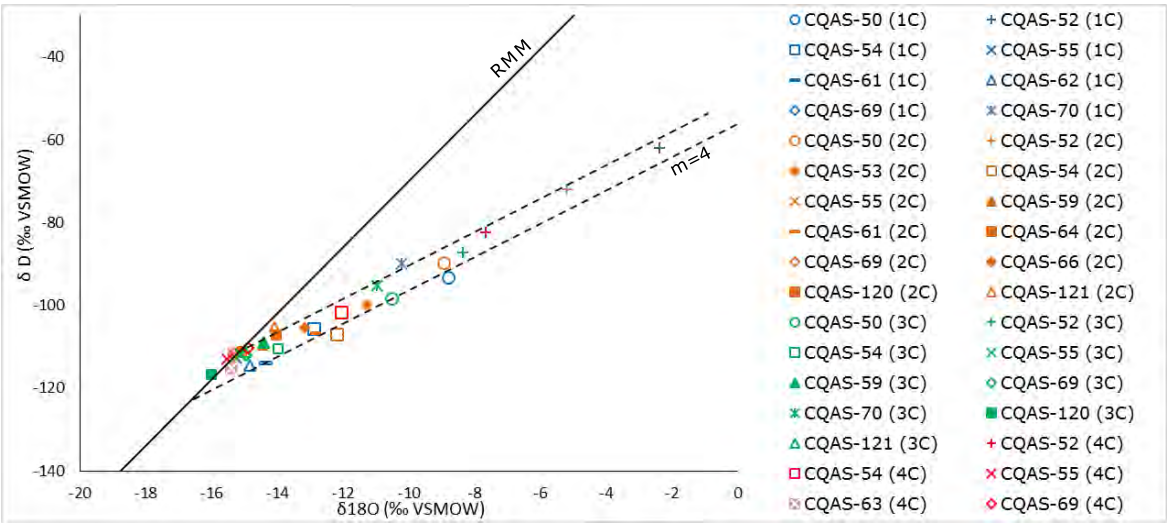


Figura 7.270 **Relación $\delta^{18}O/\delta D$ de las agua**s superficiales en las campañas realizadas en la cuenca de los ríos Uchusuma y Caquena. Fuente: elaboración propia.

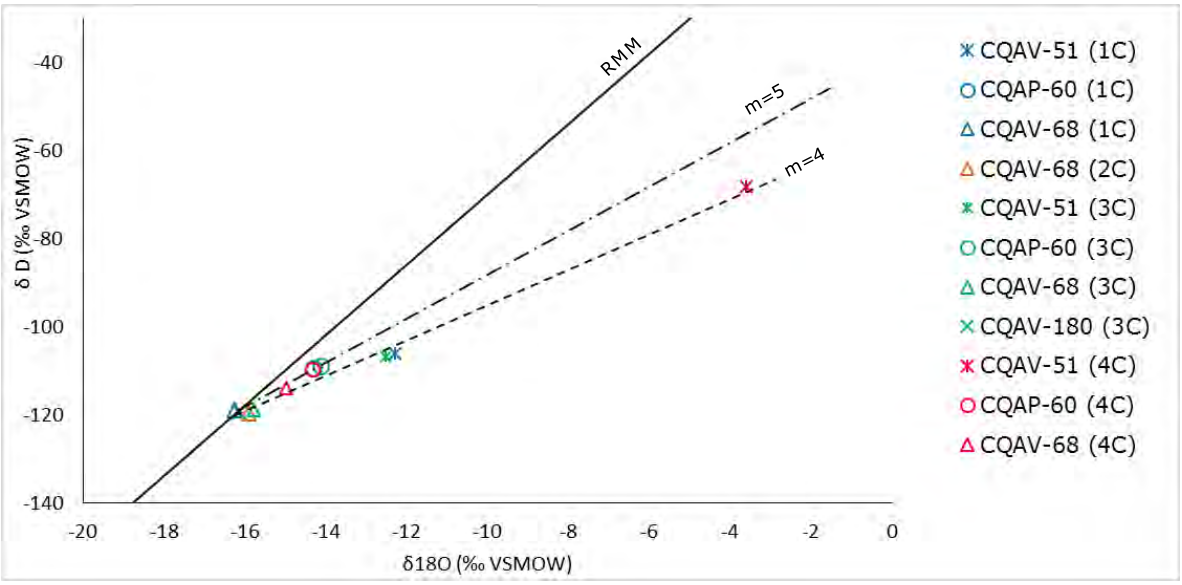


Figura 7.271 **Relación $\delta^{18}O/\delta D$ de las aguas subterránea en las** campañas realizadas en la cuenca de los ríos Uchusuma y Caquena. Fuente: elaboración propia.

7.7.5 Modelo Conceptual

La cuenca de los ríos Uchusuma y Caquena presenta un área de drenaje de 3.150 km^2, de donde aproximadamente el 42% (1.320 km^2) se desarrolla en territorio chileno. Ésta limita al norte con Perú, al sur con la cuenca altiplánica del río Lauca, al este con Bolivia y al oeste con la cuenca del río Lluta.

Los ríos Uchusuma y Caquena han sido agrupados por pertenecer a un sistema más grande y complejo, que se desarrolla casi totalmente en Bolivia y drena hacia el lago Poopó. Los principales usos del suelo en la cuenca (territorio chileno) son praderas matorrales (68%), áreas sin vegetación (20%), humedales (10%), y nieves - glaciares (2%). La cuenca se caracteriza por su meseta altiplánica y por la cordillera de los Andes (límite poniente), además de la presencia de aguas que alimentan vegas y bofedales.

La cuenca se encuentra en una zona de alta pluviometría. La precipitación media anual estimada con el método de las isoyetas es de 334 mm/año. Es válido considerar que una porción de la precipitación es interceptada por la vegetación, otra caería directamente en los humedales y depresiones, otra es evaporada y el agua que logra caer sobre la superficie de terreno posteriormente escurre hacia los cauces. El agua que logra infiltrarse es la que recarga al acuífero. Los escurrimientos superficiales se presentan durante todo el año, cuyos caudales medio anuales son de 450 l/s en río Caquena en Nacimiento, de 1.220 l/s en río Caquena en Vertedero, y de 230 l/s en río Colpacagua en Desembocadura.

Los Complejos Volcánico Caracarani, Chuquiananta, Churicagua Copatanca y los volcanes Condori y Parinacota constituyen acuíferos fracturados, que crean acuíferos colgados en las faldas de los volcanes y/o recargan directamente a los depósitos de materiales detríticos no consolidados. En la falda de estos volcanes se encuentra una unidad hidrogeológica de menor importancia compuesta por materiales sedimentarios semiconsolidados a consolidados. Esta unidad corresponde a los depósitos coluviales, eólicos, glaciares, palustres, de remoción en masa, de avalancha de detríticos y a las Formaciones Visviri y Lauca. En cambio, la unidad con mayor importancia hidrogeológica corresponde a los depósitos fluviales y aluviales del Holoceno y Pleistoceno compuestos de gravas con intercalaciones de arenas y limos que rellenan quebradas. Los parámetros hidráulicos del acuífero, se han estimados en una transmisividad de 750 m^2/día, una conductividad hidráulica de 86 m/día y un almacenamiento de 5 al 30%.

La dirección del flujo subterráneo principal es de sur a noreste y un flujo convergente hacia el río Caquena a lo largo de la cuenca. Por último, desde el norte (Acuífero Uchusuma-Perú) existe una entrada de flujo subterráneo de dirección noroeste a sureste desde el territorio peruano hacia el boliviano pasando por Chile.

El río Caquena en el pueblo Caquena son aguas alcalinas, sulfato-bicarbonatadas magnésico-sódicas, pero van evolucionando a cloruradas sódicas, debido al aporte de las vertientes que alimentan dicho río desde el cerro Condoriri, límite suroriente de la cuenca.

Desde los diferentes volcanes se originan quebradas con aguas de diferentes composiciones hidroquímicos, desde bicarbonatadas a sulfatadas cálcico-sódicas o sódicas. El río Putani se caracteriza por presentar aguas frescas, alcalinas, sulfatadas cálcicas, y un alto contenido de arsénico.

La quebrada Coipacoipani nace de la confluencia de numerosas quebradas cuyas facies varían desde aguas frescas sulfatadas cálcicas a bicarbonatadas sódicas, aunque la propia quebrada Coipacoipani presenta una alta conductividad eléctrica y aguas cloruradas sódicas con alto contenido de boro, litio, calcio, potasio, sulfatos y cloruros, lo cual podría indicar una influencia de los depósitos evaporíticos del lago Blanco, en territorio peruano.

Las aguas subterráneas del pozo de abastecimiento del pueblo de Visviri son neutras, frescas y facies sulfato-bicarbonatadas cálcico-magnésicas.

El análisis de la calidad de las aguas durante las 4 campañas efectuadas en la cuenca de los ríos Uchusuma y Caquena concluye que no son aguas para el consumo humano, ya que sobrepasan generalmente el límite de arsénico, entre otros elementos.

En la Figura 7.272 se muestra el esquema del modelo conceptual de la cuenca de los ríos Uchusuma y Caquena, cuyas entradas principales al sistema superficial estaría dada por las precipitaciones y al sistema subterráneo por las recargas al acuífero. En ésta se observa que las principales recargas al acuífero se producen por la infiltración de las precipitaciones y por el aporte lateral desde el acuífero de Uchusuma en territorio peruano. Mientras que las descargas corresponden principalmente a la salida superficial y subterránea hacia Bolivia y, en menor magnitud, el aporte desde el acuífero a los cauces de los ríos, las vertientes que alimentan a los ríos y quebradas y el caudal que se extrae del pozo ubicado en la localidad de Visviri para consumo de agua potable.

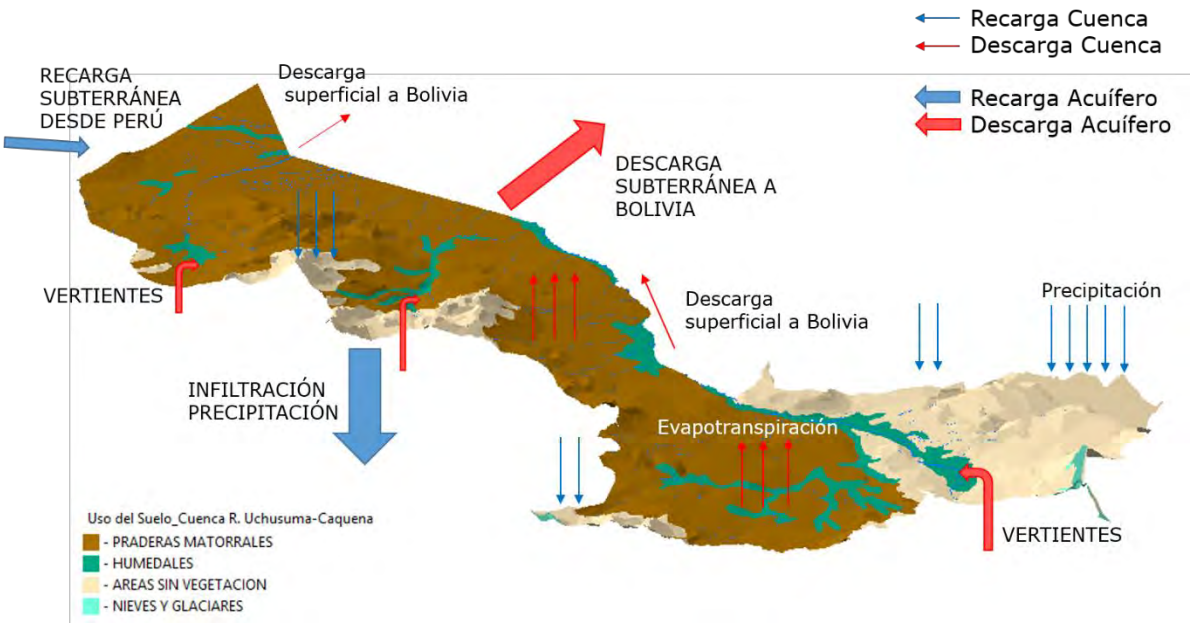


Figura 7.272 Esquema del modelo conceptual hidrogeológico de la cuenca de los ríos Uchusuma y Caquena. Fuente: modificado de la capa uso del suelo tomada del portal web del SINIA http://ide.mma.gob.cl/.

7.8 Cuenca del lago Chungara

La cuenca del lago Chungara es cerrada, tiene una superficie de 276 km^2 y el espejo del lago ocupa un área de 22.8 km^2. El lago Chungara se destaca por ser uno de los más altos del mundo, situado a una cota de 4.500 msnm, se encuentra rodeado por diversas cumbres nevadas, como el conjunto de los nevados de Payachata, compuesto por los volcanes Parinacota y Pomerape, situados al Norte. En el Sur se destacan los nevados de Quimsachata, compuestos por el volcán Guallatire, el cerro Capura y el cerro Acotango. En el Este se encuentra el portezuelo Tamboquemado y en el Oeste el Cerro Choquelimpie.

En la Figura 7.273 se presenta la ubicación de la cuenca del lago Chungara y su red de drenaje.

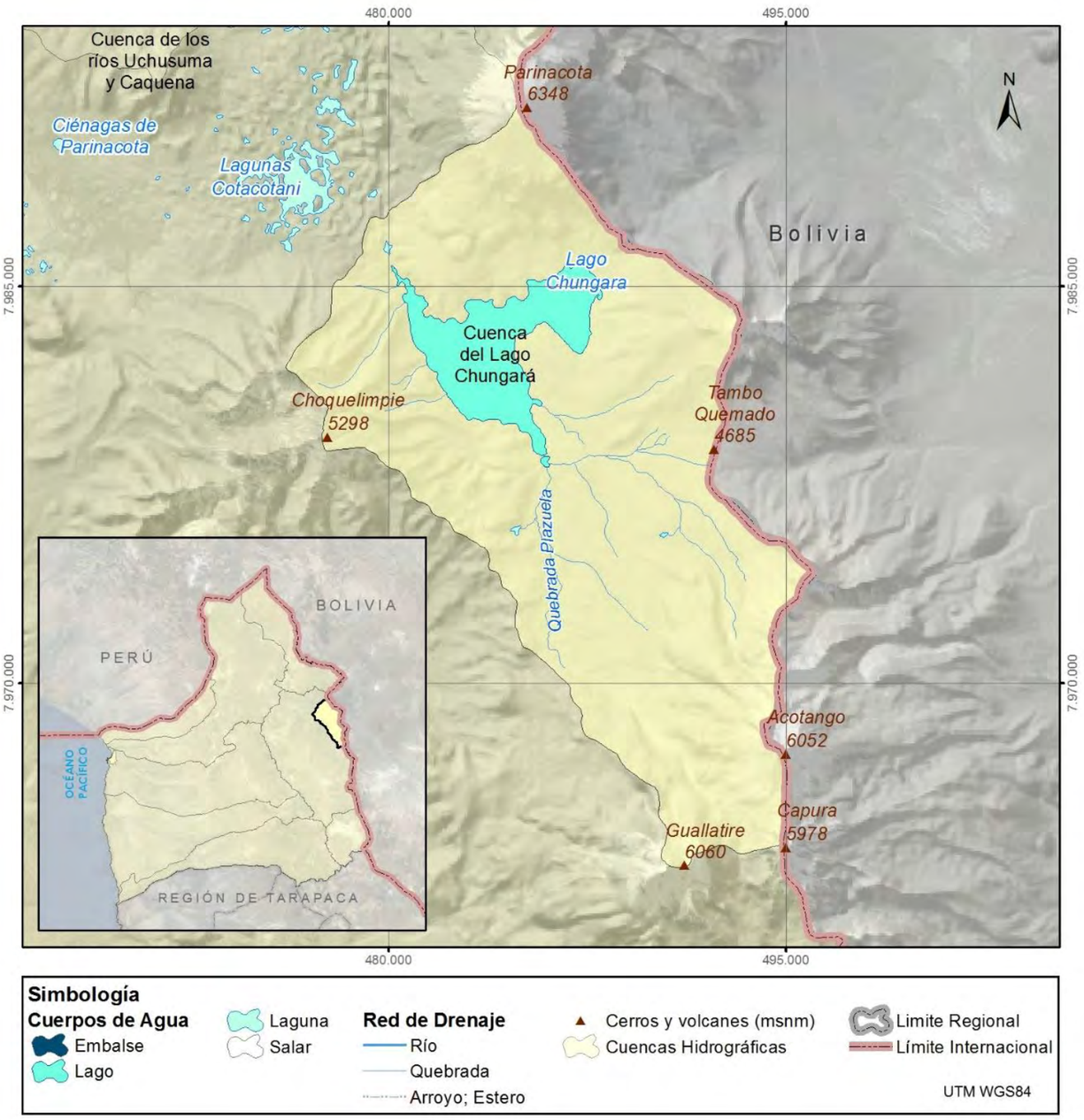


Figura 7.273 Ubicación de la cuenca del lago Chungara. Fuente: elaboración propia.

7.8.1 Caracterización Hidrológica

Como lo menciona DICTUC (2009), es una cuenca de características endorreicas, alongada en la dirección norte − sur, y colindante por el oeste con la cuenca del río Lauca. La principal alimentación del lago proviene del río Chungara (quebrada Plazuela), que drena un área oriental a los pies de los nevados de Quimsachata (cerros Acotango, Capurata y Umarata). Es un río de poca longitud, al igual que varios de los ríos que se desarrollan en el altiplano, debido a que los grandes volcanes o cerros de esta zona caen abruptamente a los valles donde se forman lagunas y salares.

También hay tributarios de menor envergadura, que drenan al lago desde los cerros que lo rodean, por el este (cerros de Quisiquisini), al igual que los afluentes desde los pies del cerro Choquelimpie al oeste y por el sur (estero Sopocolane y vertientes Mal Paso y Ataja). Además, existen antecedentes de la cuenca que estiman la existencia de una conexión hidrológica entre la cuenca del lago Chungara y la cuenca del río Lauca.

7.8.1.1 Definición y caracterización de la cuenca del lago Chungara

DELIMITACIÓN DE LA CUENCA

En la Figura 7.273 se muestra la delimitación y red de drenaje de la cuenca del lago Chungara. El criterio utilizado para la delimitación se explicó en el apartado "Definición y Caracterización de las Cuencas de la Región" en el capítulo de "Análisis Regional". De manera resumida el criterio es básicamente topográfico.

CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS DE LA CUENCA

La morfología de la cuenca del lago Chungara es un referente para establecer la dinámica esperada de la escorrentía superficial y se caracteriza por el análisis de tres parámetros, los relativos a la forma, al relieve y a la red de drenaje. Éstos se calcularon con el uso de SIG, además de utilizar expresiones matemáticas para este fin. La metodología se muestra en detalle en el Anexo VI.

En relación a la forma, la cuenca tiene un coeficiente de compacidad (K_G) de 1,38, por tanto su forma es ovalada. La densidad del drenaje de la cuenca del lago Chungara definida como la longitud total de los cauces sobre el área de la cuenca, en este caso fue de 0,10 km/km^2 que corresponde a una densidad de drenaje pobre.

Para construir la curva hipsométrica de la cuenca fue necesario reclasificar las bandas del DEM y calcular las áreas acumuladas intermedias. Según la curva hipsométrica (Figura 7.274), la cuenca tiene una topografía variable iniciando desde la cota mínima de 4.559 msnm hasta la máxima de 6.311 msnm. Sin embargo, el 50% de la cuenca tiene una altura mayor a 4.760 msnm.

De acuerdo a la metodología presentada en el Anexo VI, esta curva hipsométrica se clasifica de tipo C y corresponde a una cuenca sedimentaria que está en la fase de vejez.

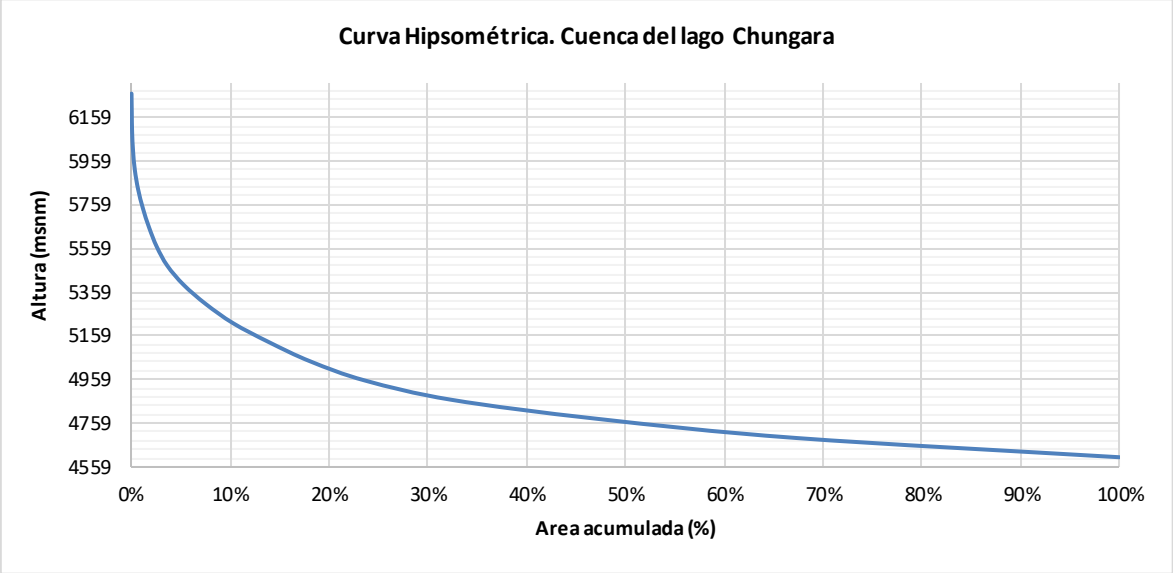


Figura 7.274 Curva hipsométrica de la cuenca del lago Chungara. Fuente: elaboración propia.

7.8.1.2 Caracterización de la red de drenaje

El diagrama unifilar del lago Chungara se indica en la Figura 7.275. En este se incluye las quebradas aportantes, sólo una con nombre identificado. No se cuenta con estaciones fluviométricas en la cuenca, por lo tanto no se conoce el caudal medio anual que traería los escurrimientos.

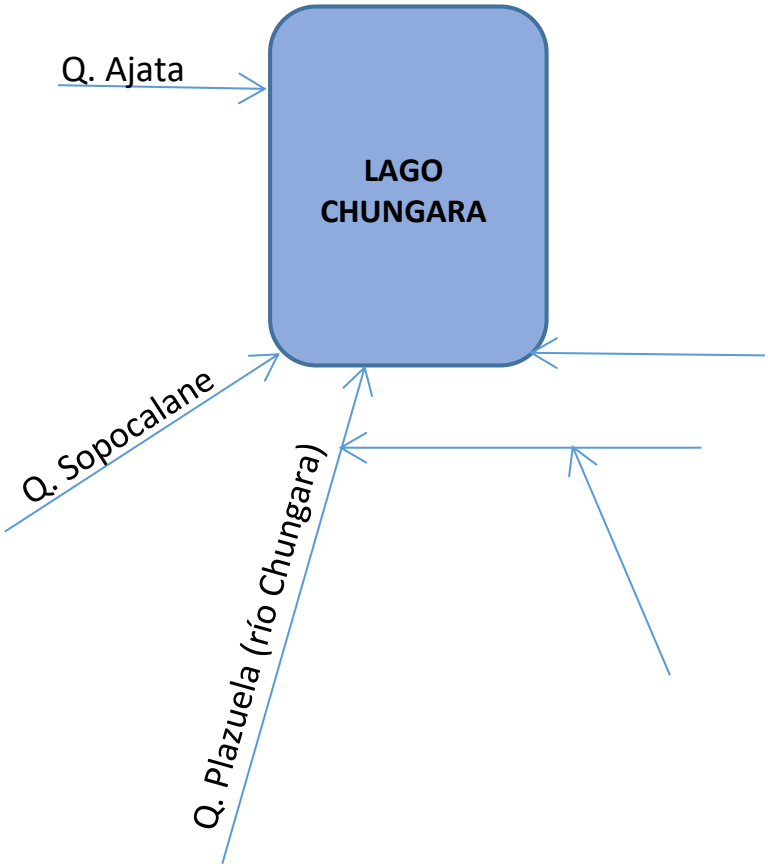


Figura 7.275 Diagrama Unifilar del lago Chungara. Fuente: elaboración propia.

7.8.1.3 Hidrometeorología

La cuenca del lago Chungara cuenta con registros históricos de dos estaciones meteorológicas administradas por la DGA, Chungara Reten y Chungara Ajata. Adicionalmente, las estaciones Cotacotani y Chucuyo Reten fueron consideradas como de influencia en la cuenca. Las coordenadas y periodos de información disponible de las estaciones se presentan en la Tabla 7.166. Cabe mencionar que la estación Chungara Ajata cuenta con instrumentos de medición de las variables: temperatura, humedad relativa y evaporación, y la estación Cotacotani tiene registros hasta el año 1989 del tanque evaporímetro tipo A.

En adelante el análisis de las variables hidrometeorológicas de la cuenca se realiza a nivel regional, con la finalidad de incluir un mayor número de estaciones localizadas en cuencas vecinas con características hidrológicamente similares.

Tabla 7.166 Coordenadas y periodo de información de las estaciones meteorológicas en la cuenca. Fuente: elaboración propia.

Estación Meteorológica DGA	Código BNA	DATUM WGS84 H19S		Altitud	Periodo	Años	Estado
		UTM Este	UTM Norte				
Chungara Retén	01010007-0	485.379	7.978.738	4.570	1968-2014	47	V
Chungara Ajata	01010010-0	480.618	7.983.774	4.585	1983-2014	32	V
Cotacotani	01020014-8	475.383	7.989.485	4.550	1961-2014	54	V
Chucuyo Reten	01020016-4	468.750	7.985.849	4.400	1960-2014	55	V

V: Vigente.

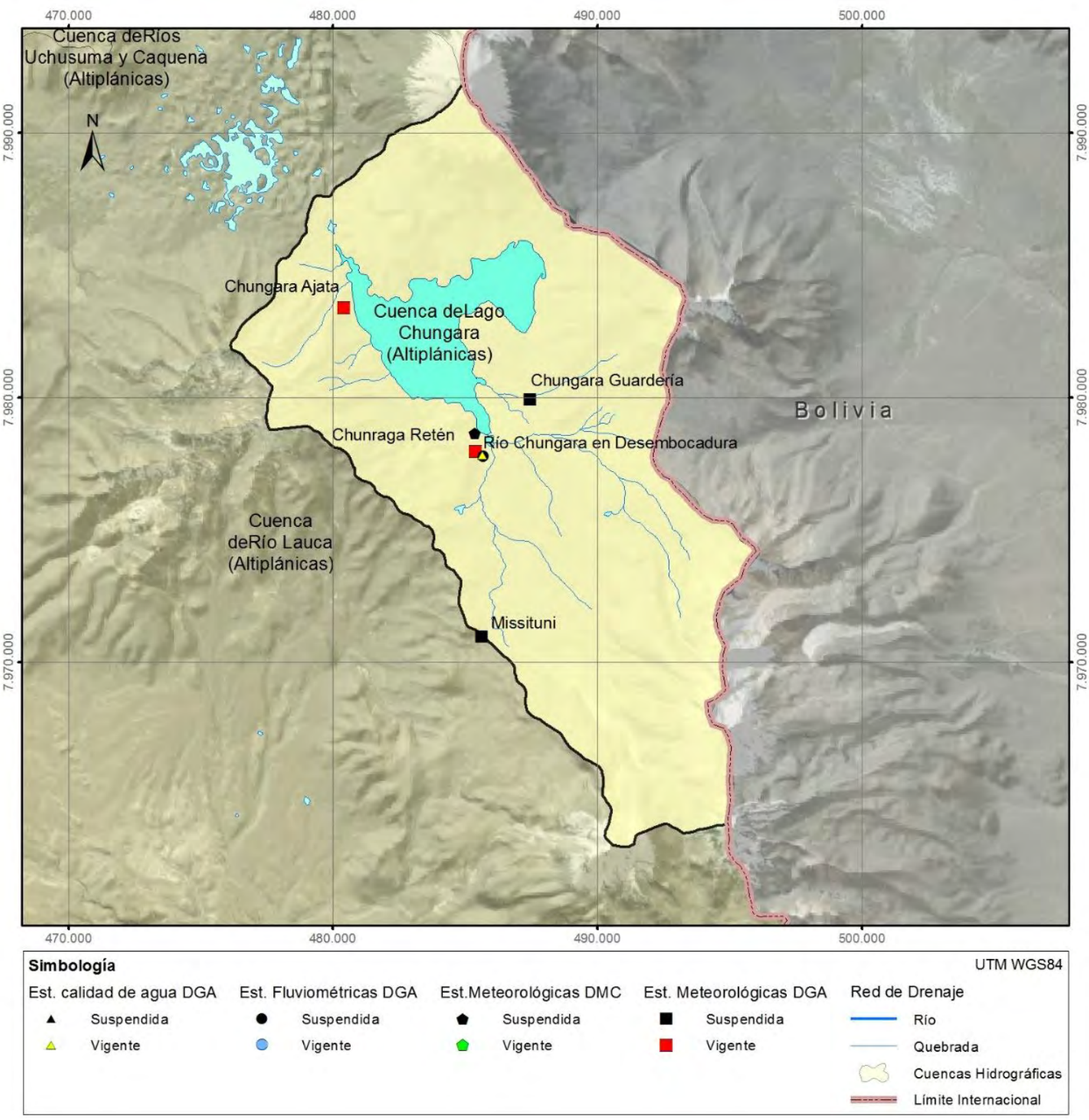


Figura 7.276 Ubicación estaciones de calidad de agua, fluviométricas y meteorológicas en la cuenca del lago Chungara. Fuente: elaboración propia.

PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL Y MEDIA MENSUAL

Para el análisis de la precipitación media anual y media mensual se tomaron los registros de 30 años (periodo 1985 al 2014) de las estaciones pluviométricas existentes, que permiten analizar las variaciones de la precipitación. En la Figura 7.277 se presenta el registro de precipitación media anual en la estación Chungara Ajata [4.585 msnm] localizada en dirección noreste de la cuenca.

Se observa los años húmedos, secos y promedio que se han presentado en la cuenca. Los años más húmedos en el periodo analizado, han sido 1985, 1987, 2001, 2006 y 2013. Por el contrario los años más secos en los últimos 30 años fueron 2010 y 2011.

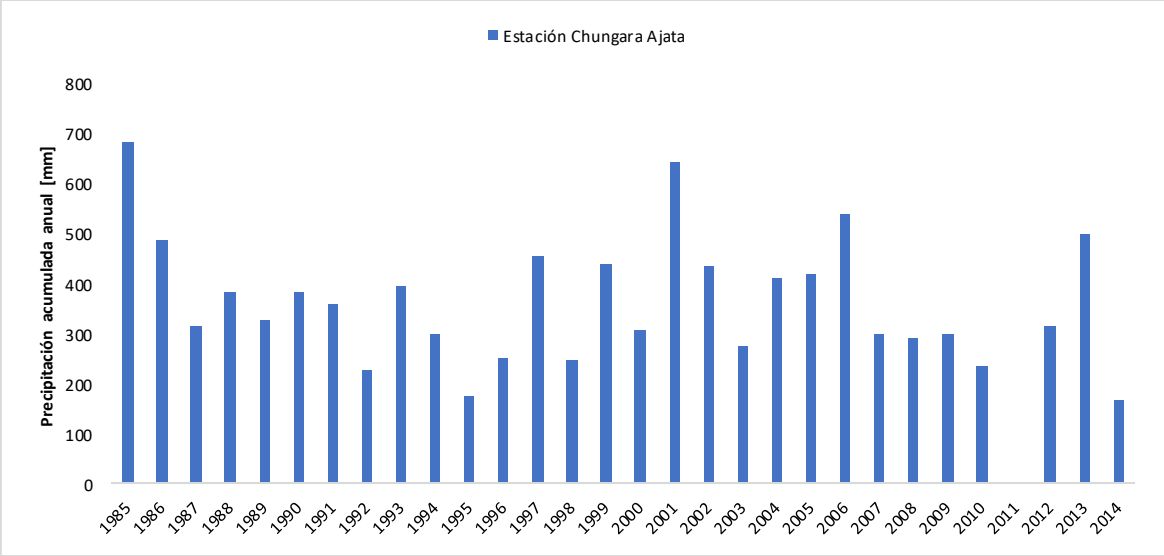


Figura 7.277 Precipitación media anual registrada en las estaciones de la cuenca del lago Chungara. Fuente: elaboración propia.

A nivel regional se trazaron las isoyetas de precipitación media anual, construidas a partir de los datos registrados en 28 estaciones meteorológicas, 24 de ellas ubicadas en la XV Región de Arica y Parinacota y las 4 restantes en la I Región de Tarapacá. La información utilizada de las estaciones fue previamente completada y analizada, como se explicó en el subcapítulo "Análisis de las variables espacial y temporal" del capítulo "Análisis Regional".

De esta manera, haciendo un zoom en la cuenca del lago Chungara, las isoyetas de precipitación se presentan en la Figura 7.278. Se observa que la precipitación media anual en la cuenca es del orden de los 300 mm a los 450 mm al año, siendo esta una

cuenca con altitudes elevadas (> 4.000 msnm), que registra lluvias intensas. En la Tabla 7.167 se especifica la precipitación ponderada de acuerdo al área de influencia entre isoyetas, obteniendo que la precipitación media anual en la cuenca es del orden de los 359,4 mm.

Tabla 7.167 Ponderación de la precipitación según área de influencia entre isoyetas en la cuenca del lago Chungara. Fuente: elaboración propia.

Isoyetas de Precipitación (mm)		Área entre isoyetas (km^2)	Precipitación media multianual 1985-2014 (mm)
300	350	127,2	41.327
350	400	53,0	19.871
300	450	68,9	25.853
>	450	27,3	12.299
			359,4 Precipitación media anual en la cuenca

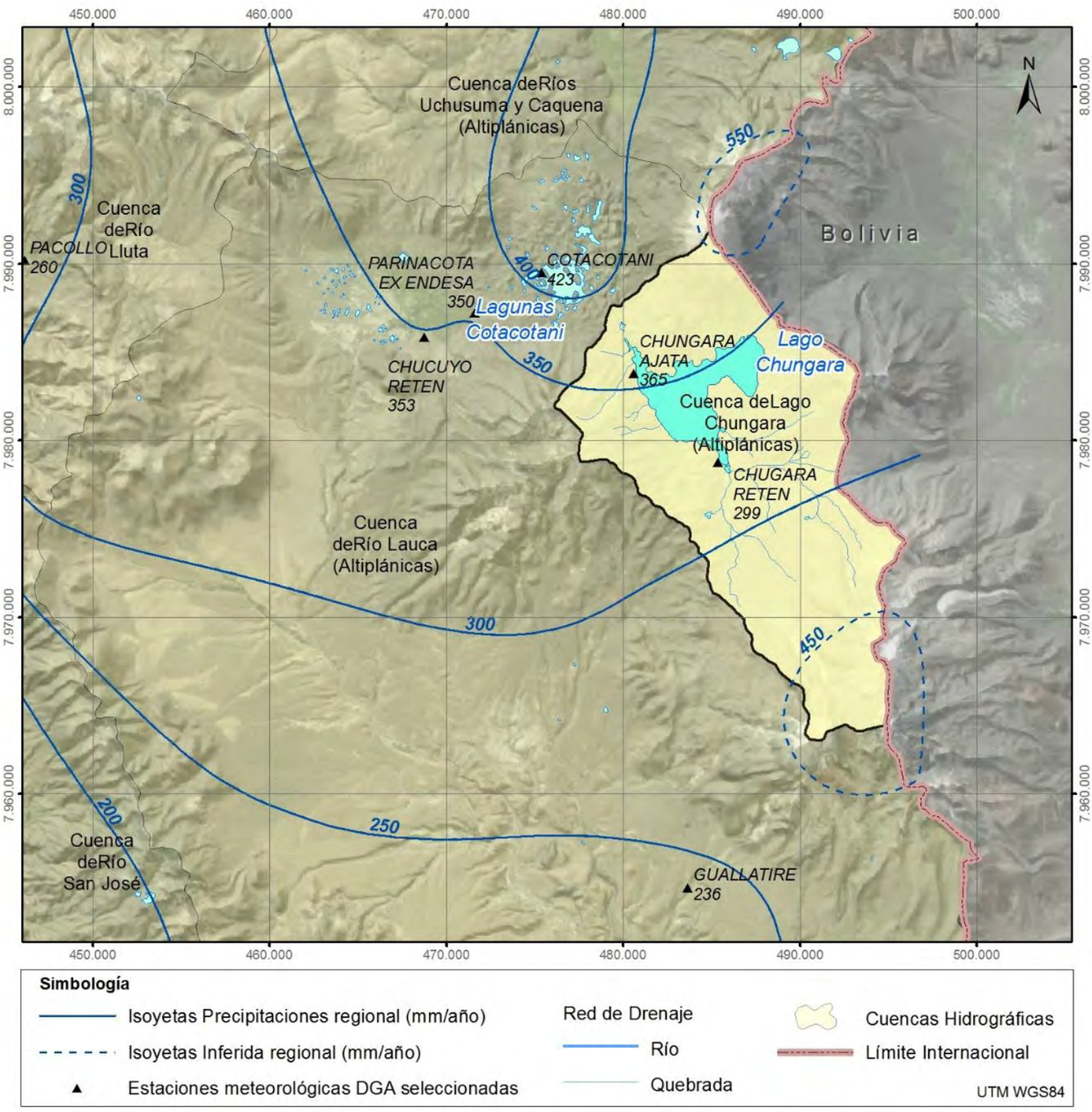


Figura 7.278 Isoyetas de precipitación media anual regional en la cuenca del lago Chungara. Fuente: elaboración propia.

Por otro lado, en la Tabla 7.168 se muestra la precipitación media anual de la cuenca del lago Chungara en dos periodos, un periodo lluvioso de diciembre a marzo en donde se presenta mayor al 85% de la precipitación anual y un periodo medianamente seco de Abril a Noviembre donde ocurren precipitaciones esporádicas. En general, en la región de Arica y Parinacota las precipitaciones se concentran en la temporada estival producto del llamado "invierno altiplánico".

Tabla 7.168 Precipitación media anual en la cuenca del lago Chungara. Fuente: elaboración propia.

Estación pluviométrica DGA	PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL PERIODO 1985-2014				
	DIC-MAR		ABR-NOV		TOTAL
	Pp [mm]	Pp [%]	Pp [mm]	Pp [%]	Pp [mm]
Chungara Ajata	318	87%	47	13%	365
Chungara Retén	262	88%	37	12%	299
Cotacotani	363	86%	60	14%	423
Chucuyo Retén	318	90%	35	10%	353

La magnitud de la precipitación media mensual en la cuenca se presenta en la Tabla 7.169 y de manera gráfica se observa la variación temporal en la Figura 7.279. Las lluvias se concentran en los meses de diciembre, enero, febrero y marzo, del orden de los 58 mm a 134 mm. El mes más seco es junio registrándose precipitaciones de 1 mm a 2 mm.

Tabla 7.169 Precipitación media mensual en la cuenca del lago Chungara. Fuente: elaboración propia.

Estación pluviométrica DGA	Altitud [msnm]	Precipitación media mensual [mm] periodo 1985-2014												
		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Pp ACUM
Chungara Ajata	4.585	118	124	84,1	62,4	13,5	2,2	4,0	3,7	4,4	1,9	4,4	12,6	48
Chungara Reten	4.570	104	104	74,3	45,2	8,3	2,2	3,0	10,4	1,6	0,9	2,4	8,2	38
Cotacotani	4.550	134	99	68,8	18,9	2,4	2,4	3,6	5,8	2,2	7,9	16,8	61,8	423
Chucuyo Reten	4.400	129	88	58,4	11,6	1,7	0,9	7,2	3,0	1,5	1,8	7,1	42,3	353

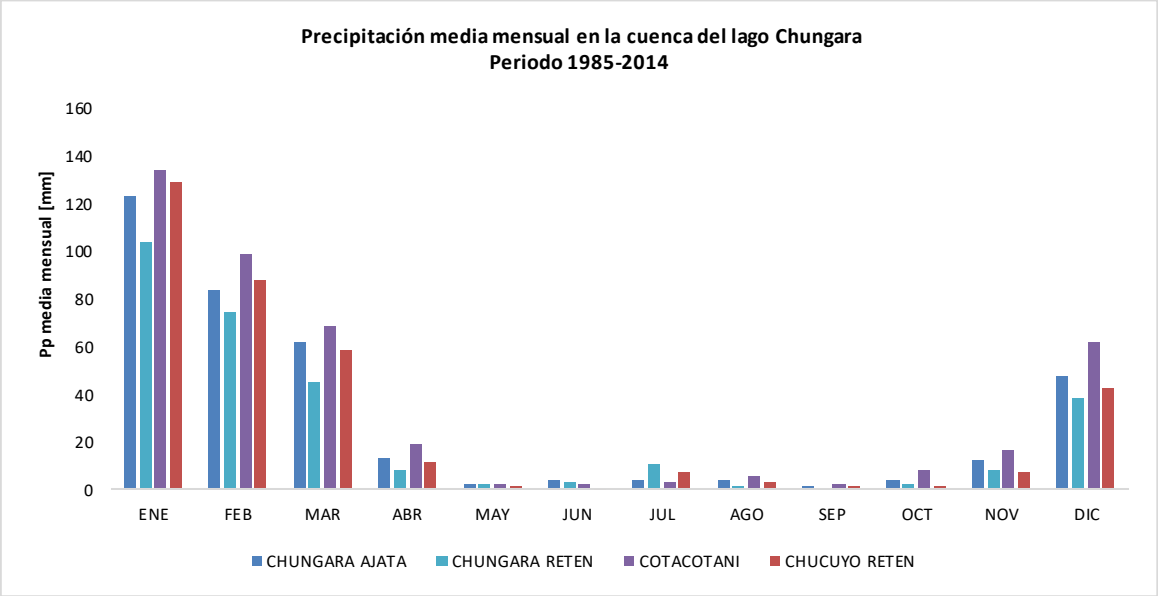


Figura 7.279 Variación mensual de la precipitación media en la cuenca del lago Chungara. Fuente: elaboración propia.

De acuerdo a Quintana E. (1989), en los meses del invierno altiplánico (época de lluvias de verano), la temperatura superficial de la lago Chungara asciende sobre los 8°C, siendo los meses de Junio, Julio y Agosto (época de las heladas), los de más bajas temperaturas. Además se menciona que el ciclo anual de temperaturas en Chungara aparentemente mantiene su tendencia a través de los años.

EVAPORACIÓN MEDIA ANUAL Y MEDIA MENSUAL

En la cuenca, las estaciones meteorológicas Chungara Ajata y Cotacotani cuentan con registros históricos de evaporación potencial del tanque tipo A, a partir de la década de 1960 y 1980, respectivamente, hasta el año 1988 en la segunda. Sin embargo, la mayor parte de los registros anuales cuentan con menos de 7 meses de información. Por consiguiente, para el análisis de la evaporación media se consideraron todas las estaciones ubicadas en las cuencas altiplánicas de la región que contarán con registros anuales superior a 9 meses. En la Tabla 7.170 se referencian las coordenadas y periodos utilizados.

Por otro lado, en el subcapítulo "Evapotranspiración" del componente "Análisis Regional", se presentan todas las estaciones meteorológicas de la XV Región de Arica y Parinacota y I Región de Tarapacá que miden evaporación potencial del tanque tipo A. Se realiza un análisis más detallado a nivel regional.

Tabla 7.170 Coordenadas y periodo de información de las estaciones con medición de evaporación tanque tipo A. Fuente: elaboración propia.

Estación Meteorológica DGA	Código BNA	DATUM WGS84 H19S		Altitud	Periodo	Años	Estado del Tanque
		UTM Este	UTM Norte				
Caquena	01001005-5	478.658	8.003.810	4.400	1981-1990	9	S
Parinacota Ex Endesa	01020017-2	471.626	7.987.205	4.420	1985-1997	12	S
Chungara Ajata	01010010-0	480.618	7.983.774	4.585	1984-2011	27	V
Cotacotani	01020014-8	475.323	7.989.490	4.500	1960-1989	29	S
Coyacagua *	01050007-9	517.429	7.782.949	3.990	1964-2006	42	V
Pampa Lirima Lagunilla *	01730018-0	515.706	7.805.083	3.940	1982-2006	24	V

V: Vigente, S: Suspendida. * Estación ubicada en la I Región de Tarapacá, datos tomados de DICTUC (2008).

Los registros de la evaporación potencial media mensual se presenta en la Tabla 7.171. La mayor evaporación en las cuencas altiplánicas, entre ellas la del lago Chungara, ocurre en los meses de septiembre, octubre, noviembre y diciembre. Los valores más bajos de evaporación se registran en los meses de junio y julio. A escala regional en relación a la cuenca, se estima una tasa de evaporación potencial media anual menor o igual a 4,5 mm/d.

Tabla 7.171 Evaporación potencial mensual en las cuencas altiplánicas. Fuente: elaboración propia.

Estación pluviométrica DGA	Evaporación del tanque tipo A mensual [mm]												
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
CAQUENA	127	122	122	116	128	93	102	122	144	155	168	166	1.565
PARINACOTA EX ENDESA	134	128	132	142	125	121	119	136	147	172	162	154	1.672
CHUNGARA AJATA	85	86	105	124	120	106	103	115	136	154	156	140	1.430
COTACOTANI	129	117	129	158	161	147	153	166	183	214	213	184	1.954
COYACAGUA *	197	175	194	185	153	127	134	155	188	228	241	241	2.218
PAMPA LIRIMA LAGUNILLA *	182	161	187	159	141	103	105	136	168	218	224	221	2.005

* Estación ubicada en la I Región de Tarapacá sobre las cuencas altiplánicas, datos tomados de DICTUC (2008).

De acuerdo a Matraz (2015), en la estación Chungara Ajata se observa que la evaporación es más sensible a las variaciones en la humedad, ya que cuando disminuye la humedad se produce un aumento de la evaporación. Para esta estación

se obtuvo un coeficiente de correlación entre la evaporación y la humedad de 0,57, siendo éste casi veinte veces mayor que la correlación con la temperatura que fue de 0,02.

7.8.1.4 Fluviometría

La cuenca del río Chungara cuenta con una estación de control fluviométrico administrada por la DGA, denominada río Chungara en desembocadura, la cual no está vigente, y sólo lo estuvo durante tres años. En la Tabla 7.172 se indican las coordenadas y el periodo de tiempo que según la DGA estuvo vigente.

Por otro lado, Matraz (2015) mencionó que la estación se encuentra en mal estado, ya que sólo mide una parte del caudal del río Chungara y la otra parte no pasa por la sección de la estación. En septiembre de 2014 se aforó un caudal total de 221 l/s en la desembocadura del río Chungara.

Tabla 7.172 Coordenadas y periodo de información de la estación fluviométrica en la cuenca del lago Chungara. Fuente: elaboración propia.

Estación Fluviométrica DGA	Código BNA	DATUM WGS84 H19S		Altitud [msnm]	Periodo	Años	Estado
		UTM Este	UTM Norte				
Río Chungara en desembocadura	01010002-K	485.908	7.978.462	4.518	1973-1997	3	S

S: Suspendida

7.8.1.5 Levantamiento Hidrológico

En el presente estudio se realizaron dos campañas de terreno, en donde se seleccionaron 4 puntos de medición en afluentes de importancia en el drenaje de la cuenca del Lago Chungara. Adicionalmente, se adopta la campaña de aforo realizada por Matraz (2015). Los métodos de aforo utilizados fueron el flujómetro y de forma manual.

En la Tabla 7.173 se especifican las coordenadas de los puntos aforados tanto históricos como recientes y en la Tabla 7.174 se muestra su localización en la cuenca.

Tabla 7.173 Coordenadas de los puntos aforados en estudios de referencia y campaña reciente. Fuente: elaboración propia.

ID	Sitio de Aforo	DATUM WGS84 H19S		Año	Estudio de referencia
		UTM Este	UTM Norte		
01-AL	río Chungara en estación DGA junto al puente carretera internacional	485.706	7.978.556	2014	Matraz (2015)
CHAS-125	Bofedal en quebrada aportante al Lago Chungara	480.357	7.984.277	2016	ICASS (2016)
CHAS-126	-	480.749	7.983.595		
CHAS-127	-	485.849	7.975.396		
CHAS-128	-	483.277	7.979.364		

Tabla 7.174 Caudales obtenidos de las campañas de aforos en la en la cuenca del Lago Chungara. Fuente: elaboración propia.

No	Sitio de aforo	CAUDAL AFORADO					
		Campaña Matraz (2015) 31 Sep 2014		Campaña III 19-20 May 2016		Campaña IV 11-12 Ago 2016	
		Método	Q [l/s]	Método	Q [l/s]	Método	Q [l/s]
1	01(1)-AL	Flujómetro	62,7				
2	01(2)-AL	Flujómetro	253,8				
3	CHAS-125			Manual	17	Manual	11,1
4	CHAS-126			Manual	11,7		
5	CHAS-127			Manual	5,3	Manual	8,5
6	CHAS-128					Manual	4,7

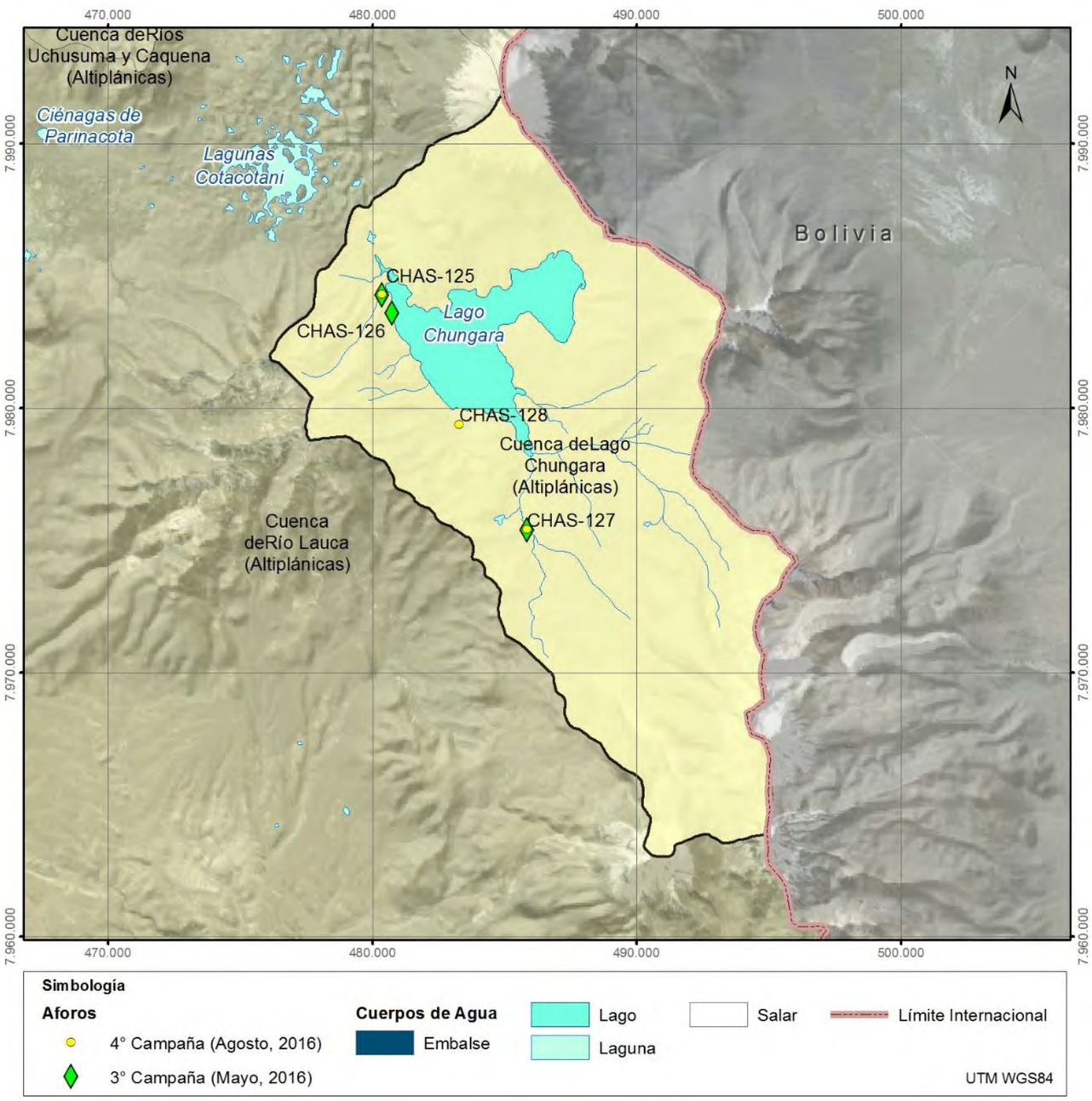


Figura 7.280 Localización de los sitios aforados en la cuenca del Lago Chungara. Fuente: elaboración propia.

Al comparar la magnitud de los aforos realizados, se observa que los aforos 01-AL (Matraz, 2015) realizados sobre el río Chungara en septiembre de 2014, representa el mayor caudal de escurrimiento superficial en la cuenca. Los caudales aforados en los otros afluentes son menores, aunque se podría considerar que son escurrimientos permanentes, al obtener similitud en los caudales de las campañas III y IV.

Cabe mencionar que los aforos realizados permiten registrar un volumen de agua pasante en un momento específico, pero al no contar con registros históricos es limitante su comparación.

7.8.1.6 Modelación hidrológica

Como se explicó en los subcapítulos anteriores, la cuenca del Lago Chungara es endorreica, por lo tanto, el sistema de drenaje es interno, la precipitación que allí cae permanece ahí mismo, abandonando el sistema únicamente por infiltración o evaporación, favoreciendo esto entre otras cosas, la concentración de sales y los procesos químicos. Otro aspecto no menor, es la continua comunicación del lago con el acuífero adyacente, situación de gran importancia analizar dentro de la hidrología del sistema.

Para realizar una modelación hidrológica del sistema, se requiere conocer la topobatimetría del lago en distintos periodos (secos y húmedos), la topografía en mayor detalle de la cuenca en general y una cuantificación aproximada de los flujos subterráneos provenientes de los cerros vecinos y de la conexión con las Lagunas de Cotacotani (cuenca del río Lauca), entre otros. De esta manera, este análisis tiene una complejidad mayor a la información con la que se cuenta en este estudio y se escaparía de los alcances.

Sin embargo, uno de los referentes de la cuenca, es el estudio "Geoquímica de aguas en cuencas cerradas: I, II y III regiones-Chile" de Risacher *et al.* (1999), quienes realizaron un balance hídrico y salino en distintas cuencas cerradas del norte de Chile, entre ellas la del Lago Chungara. Se supone que las cuencas están en equilibrio dinámico, es decir que la concentración de sus componentes químicos es estable y no aumenta con los años. Todos los componentes que entran en la laguna o son consumidos por minerales, o participan en procesos biológicos o se infiltran por el fondo.

En la Figura 7.281 se muestra un esquema conceptual que resume las componentes consideradas en el análisis, donde S es la superficie de la laguna (m^2), H_e es la altura de evaporación potencial (m/año), H_p es la altura de las precipitaciones (m/año), V_e es el volumen de agua evaporada desde la superficie (m^3/año), V_{ap} es el volumen de los aportes por la cuenca de drenaje (m^3/año), V_i es el volumen de las infiltraciones (m^3/año), C_{ap} es la concentración promedio de un componente conservativo de los aportes (g/l) y C_L es la concentración promedio de ese componente conservativo en la laguna (g/l).

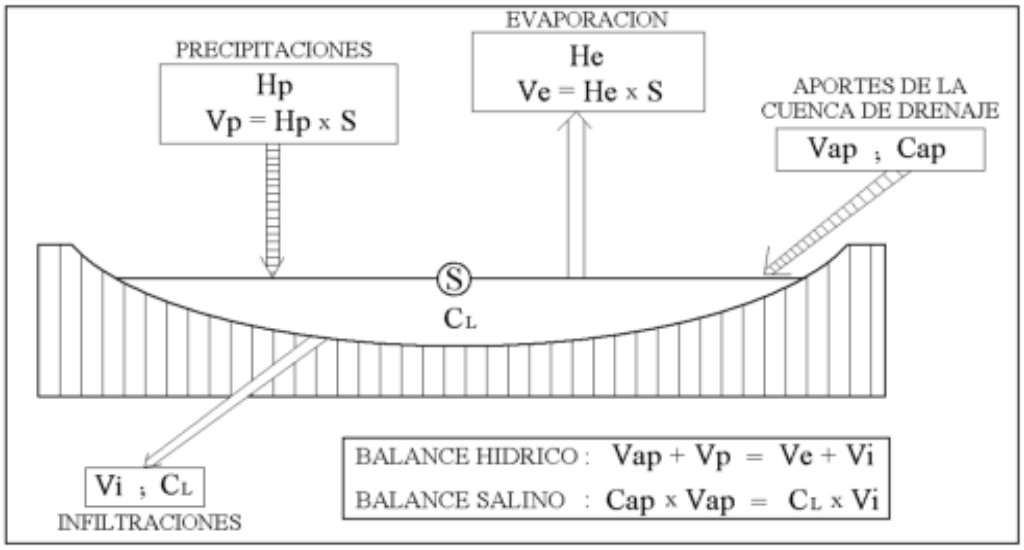


Figura 7.281 Esquema conceptual del balance hídrico y salino de una laguna en clima árido. Fuente: Risacher *et al* (1999).

Además se definido un parámetro adimensional, el coeficiente de escorrentía, que representa la razón entre lo que entra en el lago (V_{ap}) y lo que cae sobre la cuenca de drenaje (V_{dr}). Para el caso del Lago Chungara, el valor obtenido fue 0,25, siendo considerado un coeficiente alto, por lo tanto concluyen que los aportes al lago no provienen exclusivamente de lo que cae sobre su cuenca de drenaje, sino que recibe aportes subterráneos desde otras cuencas.

El componente conservativo utilizado en el análisis fue el cloruro, siendo la concentración de este homogénea en todo el lago. Finalmente, los valores utilizados para establecer el balance hídrico del lago se muestran en la Figura 7.282. Concluyendo que el Lago Chungara recibe dos tipos de agua de aporte, 75% de aguas muy diluidas de vía evolutiva alcalina carbonatada y el 25% más concentradas y de vía

evolutiva alcalina sulfatada. Del balance hídrico, el volumen de aporte superficial y subterráneo es de 669 l/s y el volumen de infiltraciones es de 32 l/s.

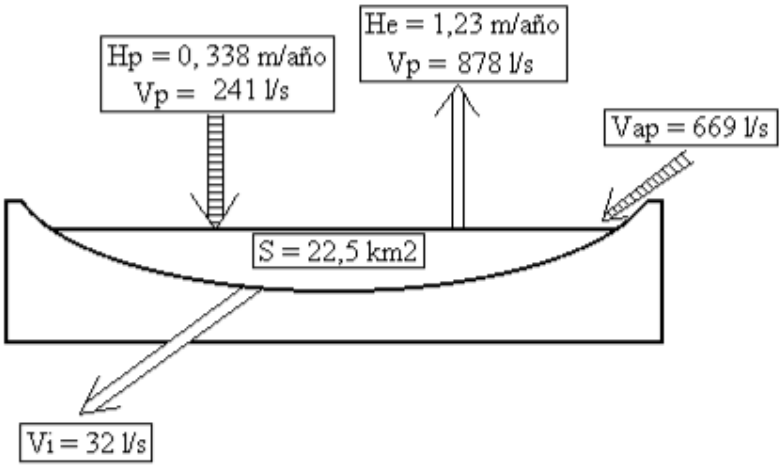


Figura 7.282 Balance hídrico y salino del lago Chungara. Fuente: Risacher *et al* (1999).

7.8.1.7 Estimación de la recarga de aguas subterráneas

Las recargas hacia el acuífero en la cuenca del Lago Chungara, provienen principalmente de las infiltraciones desde el fondo del lago y de los aportes de flujos subterráneos provenientes de los cerros vecinos. Estas se intensificarían durante el periodo de mayor precipitación de noviembre a marzo.

ANTECEDENTES

En el estudio "Relación de aguas superficiales y subterráneas en el área del lago Chungara y lagunas de Cotacotani, norte de chile: un estudio isotópico" liderado por Herrera *et al.* (2006), se investigó el sistema de circulación de las aguas subterráneas en el área Chungara-Cotacotani, mediante análisis isotópico del agua. Concluyeron que existe un flujo de agua subterránea desde el lago Chungara hacia las lagunas de Cotacotani y que aproximadamente un 58% del volumen del agua que alimenta las lagunas proviene del lago Chungara, mientras que el 42% restante lo hace de otros aportes subterráneos.

Risacher *et al.* (1999), a partir de los resultados obtenidos en el análisis del balance hídrico y salino en las cuencas cerradas del norte de chile, se obtuvo para el caso del lago Chungara, que el volumen de los aportes superficiales y subterráneos es de 669

l/s y el volumen de las infiltraciones desde fondo del lago a las napas subterráneas es de 32 l/s. Este último representa el 5% de los aportes en la cuenca.

Los aportes subterráneos estimados para el lago Chungara según Niemeyer (1964) son de 244 l/s. Sin embargo, en el estudio de Risacher *et al.* (1999), manifiestan que se desconoce el tipo de aguas de aportes subterráneos, por lo tanto sólo es factible indicar que el río Chungara puede colectar a su desembocadura aguas diluidas de tipo carbonatado que se mezclan con las aguas sulfatadas.

SÍNTESIS DE LA ESTIMACIÓN DE LAS PRINCIPALES RECARGAS

Una vez revisados los antecedentes de la cuenca del Lago Chungara, relacionados con la estimación de la recarga y de analizar conceptualmente las componentes que condicionan el tránsito del agua hasta llegar al acuífero, fue adoptado el resultado obtenido del balance hídrico y salino de Risacher et al (1999). En la Tabla x se presenta de manera resumida la fuente principal de recarga, el método utilizado y el valor estimado a nivel anual.

Tabla 7.175 Síntesis de las principales estimaciones de recarga en la cuenca del lago Chungara. Fuente: elaboración propia.

Principales fuentes de recarga al acuífero	Método	Valor estimado anual [l/s]
INFILTRACIÓN desde el fondo del Lago Chungara	Balance hídrico y salino de lagunas. Resultado adoptado de Risacher et al (1999)	32

7.8.2 Marco geológico

La cuenca del lago Chungara se ubica en la Cordillera Occidental, que constituye parte del altiplano.

GEOLOGÍA

Las rocas más antiguas presentes en la cuenca datan del periodo Oligoceno-Holoceno y pertenecen a la Formación Lupica (OMl), expuesta al sur del lago Chungara. La cuenca está limitada por cuerpos volcánicos del Mioceno Superior (Msv), del Pleistoceno (Pv) y del Holoceno (Hv), cuya laderas están parcialmente cubiertas por depósitos aluviales (Ha) y glaciares (Qg). Al sur del lago Chungara, en la quebrada Plazuela, se

depositaron sedimentos fluviales de edad pleistocena (Pf). Los depósitos palustres (Hp) se ubican localmente en una quebrada al oeste y al sur del lago Chungara.

TECTONICA Y ESTRUCTURAS

La cuenca del lago Chungara es de tipo intramontana, generada por movimientos tectónicos de alzamiento del altiplano a partir del Oligoceno - Mioceno.

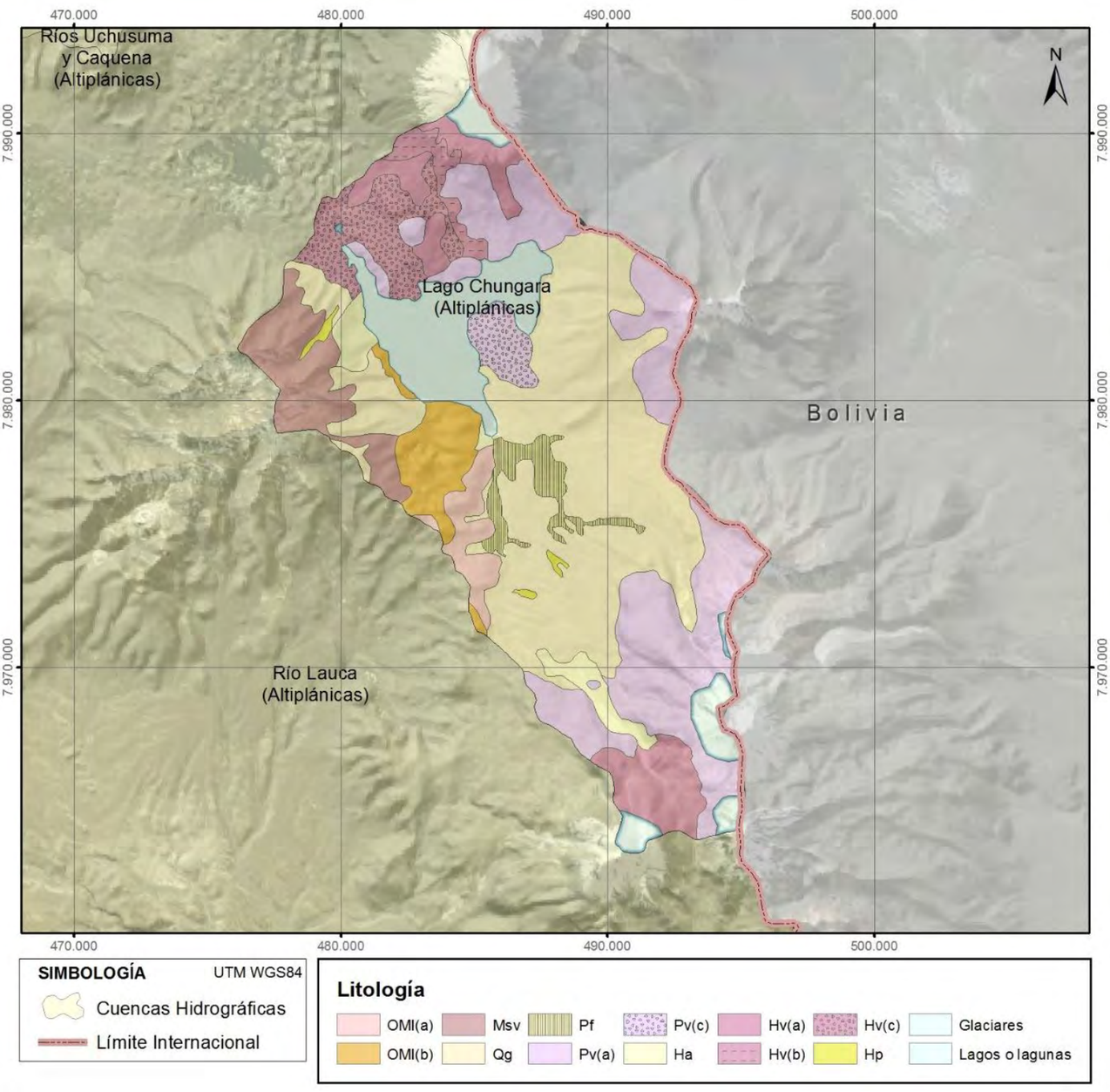


Figura 7.283 Mapa geológico de la cuenca del lago Chungara. Fuente: modificado de García *et al* (2004).

7.8.3 Caracterización Hidrogeológica

7.8.3.1 Antecedentes existentes

La cuenca del lago Chungara ha sido analizada por Niemeyer (1964), REG y Karzulovic (1981), Risacher *et al.* (1999), Herrera *et al.* (2006) y Matraz (2015). Los 4 estudios evaluaron y comprobaron la conexión hidráulica entre el lago Chungara y las lagunas de Cotacotani. Por otro lado, Risacher *et al.* (1999) realizó balances de masa de cloruros en el lago Chungara y las lagunas de Cotacotani para cuantificar las componentes de entrada y salida en cada sistema.

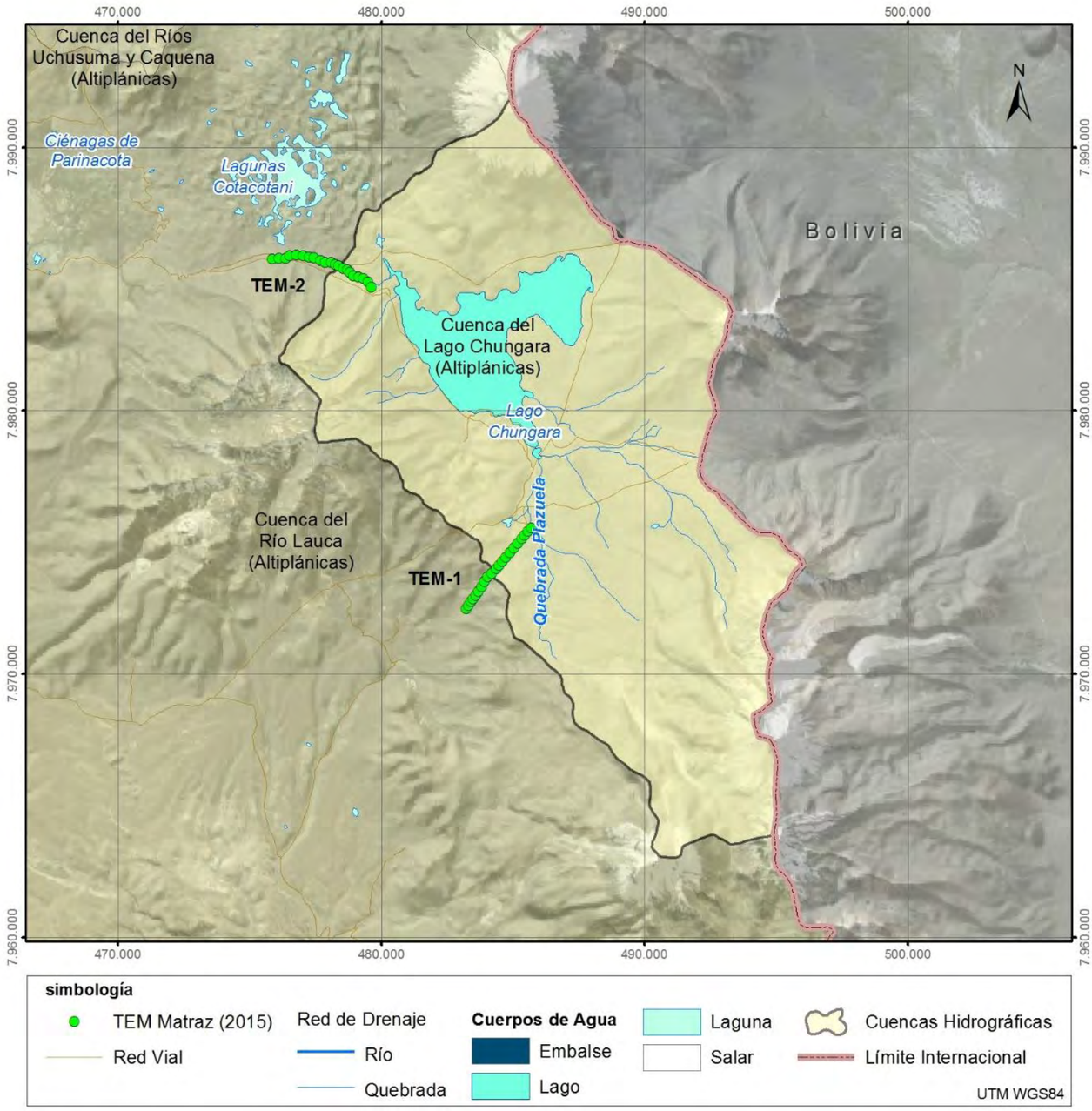


Figura 7.284 Ubicación cuenca del lago Chungara y de los puntos TEM realizados por Matraz (2015). Fuente: elaboración propia.

REG y Karzulovic (1981) determinaron que existe una conexión hidráulica entre el lago Chungara y las lagunas de Cotacotani. Defienden que la unidad volcánica tiene una alta permeabilidad por fracturas abiertas. El lago Chungara recibe el aporte de agua de Nevados Payachata, Nevados Quimsachata y volcán Guallatire y superficialmente el lago se alimenta desde el sur por el río Chungara y desde el occidente por las vertientes Ajata, Mal Paso y el estero de Sopocalane. La cuenca no cuenta con una salida de agua superficial, pero sí subterráneamente, hacia las lagunas de Cotacotani y por evaporación.

Herrera *et al.* (2006) analizó el tritio de las aguas subterráneas para identificar la edad de ésta e interpretó los datos de tritio mediante el modelo de flujo de pistón y el modelo exponencial. Herrera *et al.* (2006) determinó que el complejo volcánico Choquelimpie-Ajoya y el volcán Parinacota se comportan como acuíferos volcánicos fracturados. Estos acuíferos están formados por lavas andesíticas y dacíticas fracturados que originan manantiales, correspondientes a acuíferos colgados en el cono volcánico. Además consideró que los manantiales que surgen en el frente y base de las coladas de lava se producen porque las coladas de lava actúan como un conducto largo y estrecho, donde el agua es recargada en las cotas más altas, como se muestra en la Figura 7.285.

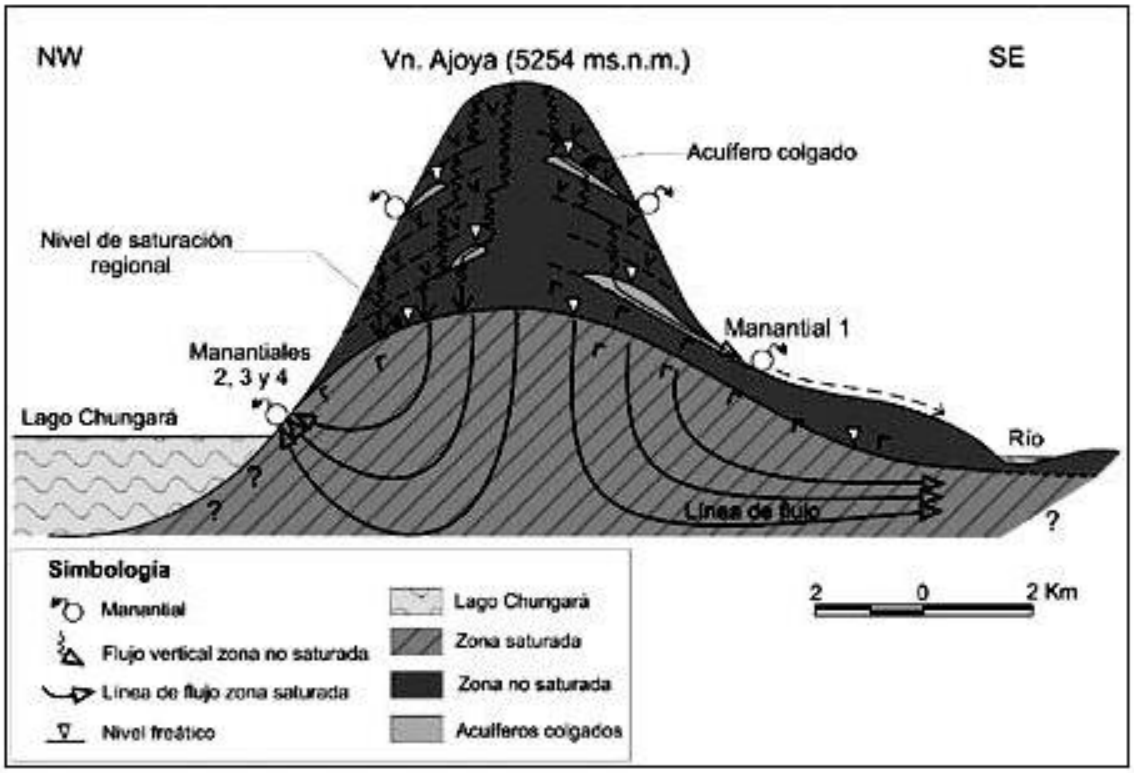


Figura 7.285 Perfil hidrogeológico del modelo conceptual de circulación del agua subterráneo en el volcán Ajoya (complejo volcánico Choquelimpie-joya). Fuente: Herrera et al. (2006).

Por último Matraz (2015) realizó una prospección geofísica en los bordes de la cuenca, mediante un perfil TEM para analizar la continuidad acuífera entre el lago Chungara y las lagunas de Cotacotani y otro perfil en el sector de la terma Chiriguaya. En la Figura 7.286 se muestra el perfil hidrogeológico elaborado en el collado entre el lago Chungara y las lagunas de Cotacotani.

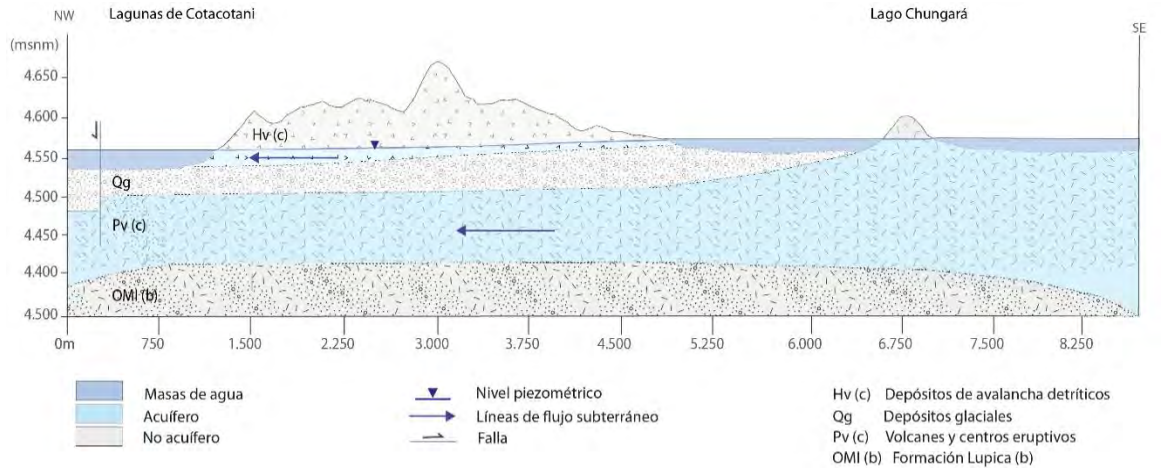


Figura 7.286 Perfil hidrogeológico TEM-1 del sector lago Chungara-lagunas de Cotacotani. Fuente: modificado de Matraz (2015).

Es necesario destacar que en la cuenca del lago Chungara no existen sondajes en los cuales se pueda conocer la estratigrafía en profundidad, el nivel freático del acuífero o se hayan podido realizar pruebas de bombeo para conocer los parámetros hidráulicos del acuífero.

7.8.3.2 Definición y caracterización de las unidades hidrogeológicas

A continuación se identificaron las unidades hidrogeológicas existentes en la cuenca del lago Chungara a partir de los antecedentes, el mapa geológico 1:250.000 de García *et al*. (2004) y del mapa hidrogeológico de Chile 1:1.000.000 (DGA, 1987):

- Unidad Hidrogeológica I (importancia alta): corresponde a los depósitos fluviales del cuaternario. Los depósitos fluviales del Pleistoceno constituidos por ripios y gravas clastosoportados, semiconsolidados, con intercalaciones de arenas, limos y, localmente, diatomitas. Esta unidad es un medio poroso y carácter libre.
- Unidad Hidrogeológica II (importancia alta): constituida por depósitos de avalancha de detritos del Holoceno y Pleistoceno. El depósito de avalancha embalsó el río Coillacota, generó el lago Chungara y habría formado las lagunas de Cotacotani, las que han sido interpretadas como estructuras de 'kettle-hole' (depresión originada en el terreno cuando el hielo que lo cubría se funde) dejadas por el hielo involucrado en el colapso e incorporado al depósito de avalancha. del volcán Parinacota (García *et al.*, 2004). Estos depósitos de avalancha poseen una porosidad primaria y carácter libre.

- Unidad Hidrogeológica III (importancia alta-media): considera a las lavas andesíticas y dacíticas que tienen una permeabilidad primaria baja a nula pero por fracturación presentan una media-alta importancia hidrogeológica. Los volcanes Parinacota, Nevados de Quimsachata, Quisi Quisini, y Ajota se caracterizan por tener familias de fracturas conectadas que originan acuíferos colgados y/o recargan otras unidades hidrogeológicas. Presentan acuíferos colgados en los conos volcánicos. La importancia hidrogeológica varía de alta a moderada según el grado de fracturación y conexión de las fracturas entre sí.
- Unidad Hidrogeológica IV (importancia media): corresponde a los depósitos glaciares. Los depósitos glaciales son morrenas laterales y/o frontales por lo que su geometría es elongada y de espesor máximo de 100 m de parabrechas polimícticas, consolidados a semiconsolidados, de fragmentos volcánicos y matriz limosa a arenosa. Estos depósitos se encuentran en las faldas de los edificios volcánicos Ajoya y de los Nevados de Quimsachata con carácter libre, pero en el sector de conexión con las lagunas Cotacotani se localizan entre los depósitos de avalancha de detritos del Holoceno y del Plioceno, confinando a los depósitos de avalancha de detritos, según Matraz (2015).
- Unidad Hidrogeológica V (importancia baja): constituida por la Formación Lupica (a). La Formación Lupica (a) está compuesta por lavas andesitas y dacíticas, tobas y brechas volcánicas y sedimentarias de un espesor de 300 a 600 m. Esta unidad habrá sufrido fracturamiento en la charnela del anticlinal Chiriguaya favoreciendo la transmisividad del agua subterránea por este material a través de un medio fracturado. Esta unidad presenta una importancia hidrogeológica de baja a moderada según el grado de fracturación y conexión de las fracturas entre sí. Cuando esta unidad aflora tiene carácter libre, sin embargo, generalmente suele estar confinada por la Unidad Hidrogeológica VI en la cuenca del lago Chungara.
- Unidad Hidrogeológica VI (importancia baja-media): corresponde a la Formación Lupica (b). Esta unidad está constituida por 400-1.000 m de tobas muy soldadas (ignimbritas), con intercalaciones de rocas sedentarias y de lavas. La Formación Lupica (b) confina a la Unidad Hidrogeológica IV. Esta unidad tiene una importancia hidrogeológica baja a muy baja.
- Basamento: no aflora en la cuenca del lago Chungara.

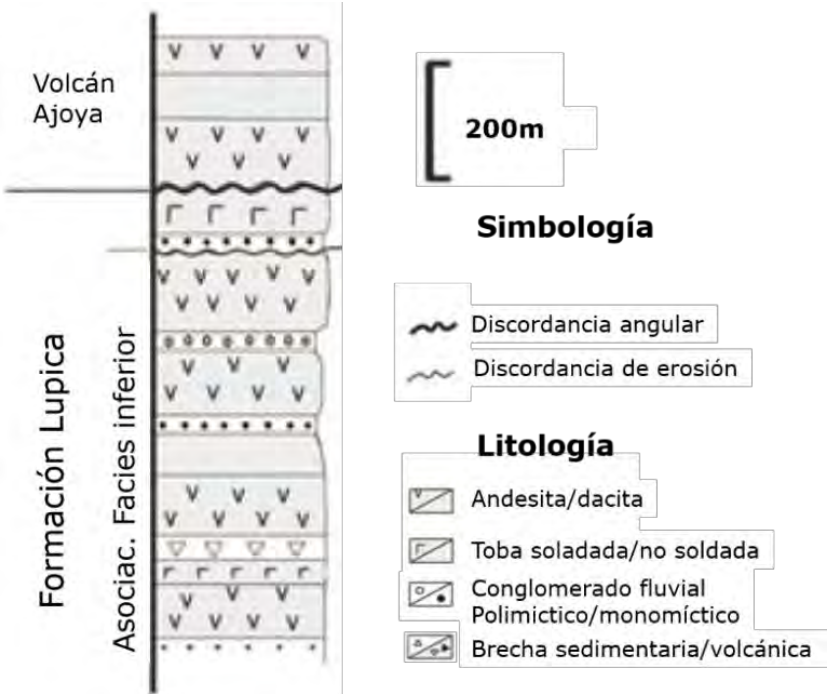


Figura 7.287 Columna estratigráfica del sector Chiriguaya. Fuente: modificado de García *et al.* (2006).

En la Tabla 7.176 se resumen las unidades hidrogeológicas según la importancia hidrogeológica, tipo de unidad, descripción geológica y tipo de permeabilidad, y en la Figura 7.288 se muestra el mapa de las unidades según la importancia hidrogeológica presentes en la cuenca del lago Chungara.

Tabla 7.176 Resumen de las unidades hidrogeológicas de la cuenca del lago Chungara. Fuente: elaboración propia.

Cuenca	Unidad Hidrogeológica	Descripción	Tipo de permeabilidad	Importancia hidrogeológica	Tipo de Unidad
Lago Chungara	I	Depósitos fluviales	Primaria	Alta	Acuífero
	II	Depósitos de avalancha de detríticos	Primaria	Media	Acuífero
	III	Complejos volcánicos	Secundaria	Alta- Media	Acuífero
	IV	Depósitos glaciares	Primaria	Media	Supuestamente Acuitardo
	V	Formación Lupica (a)	Secundaria	Baja	Supuestamente Acuitardo
	VI	Formación Lupica (b)	Secundaria	Baja-muy baja	Supuestamente Acuícludo

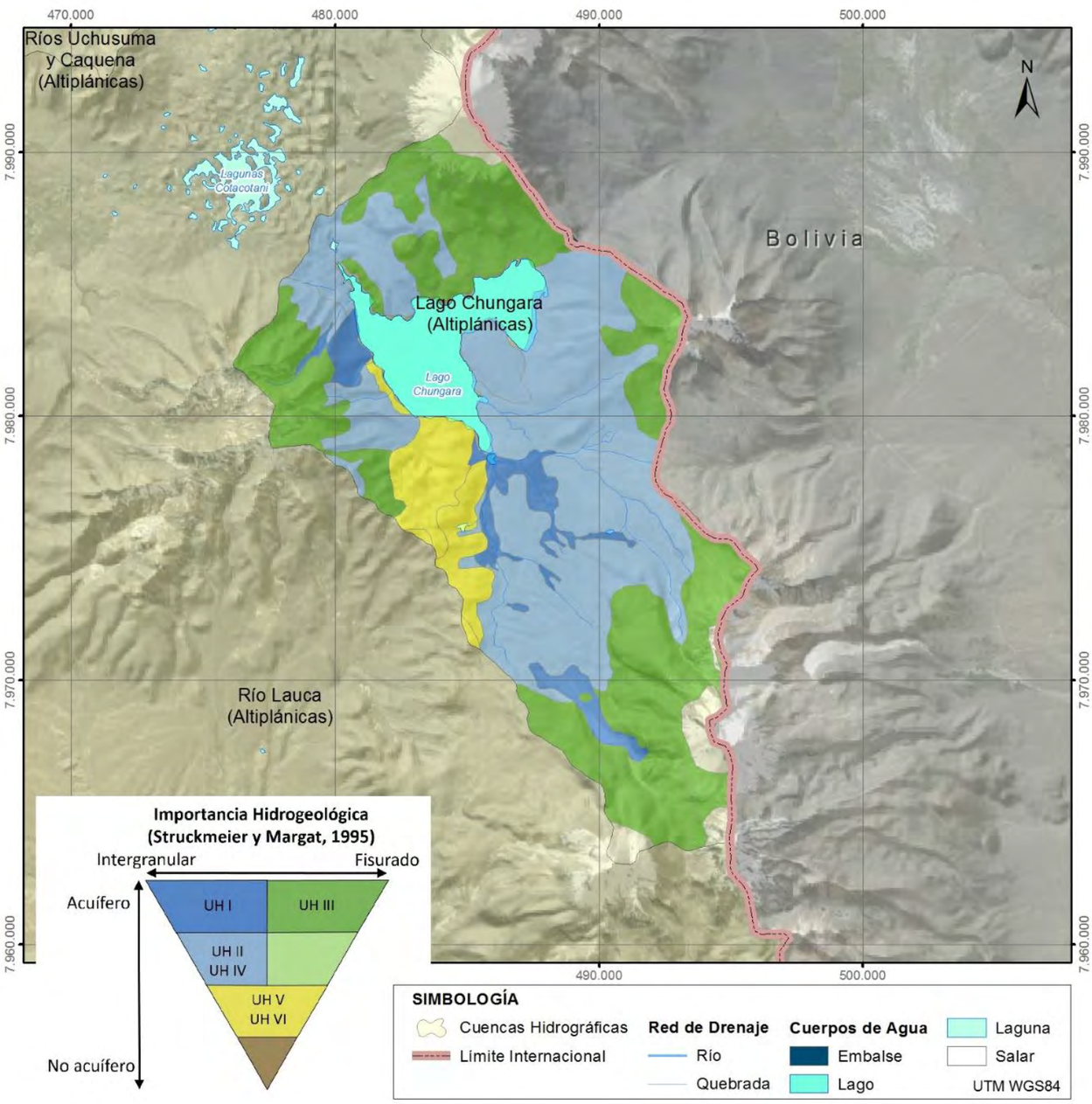


Figura 7.288 Mapa de las unidades hidrogeológicas presentes en la cuenca del lago Chungara. Fuente: elaboración propia.

7.8.3.3 Parámetros hidráulicos

Los parámetros hidráulicos estimados en esta sección son la conductividad eléctrica, transmisividad, porosidad drenable y coeficiente de almacenamiento de las diferentes unidades hidrogeológicas que existen en la cuenca del lago Chungara.

En la cuenca del lago Chungara no se han perforado pozos, por lo que nunca se ha efectuado una prueba de bombeo que permita estimar valores de los parámetros hidráulicos de las unidades hidrogeológicas. Por lo tanto, en la Tabla 7.177 se presentan los valores estimados de los parámetros hidráulicos según los valores definidos para unidades hidrogeológicas similares en otras cuencas aledañas, y en los casos que no hay información se consideró la bibliografía existente.

Para estimar con mayor fiabilidad la disponibilidad de recursos hídricos subterráneos se recomienda perforar un sondaje en los depósitos glaciares para caracterizar hidrogeológicamente mejor esta unidad. Al perforar el sondaje se identificaría la litología y se realizarían pruebas de bombeo, con el objetivo de determinar los parámetros hidráulicos de los depósitos glaciares.

Tabla 7.177 Resumen de los parámetros hidráulicos de cada unidad hidrogeológica de la cuenca del lago Chungara. Fuente: elaboración propia.

Cuenca	Unidad Hidrogeológica	Régimen	T (m^2/día)	K (m/día)	Ss (m^{-1})	Sy (%)	Comentario
Lago Chungara	I	Libre		0,1-10		5-30	K base al estimado con pruebas de bombeo, JICA (1995) y AC (98) en Lluta
	II	Libre		E^{-2}-10		--	K estimado por Domenico-Schwartz (1998) para rocas no consolidadas
	III	Libre		$1E^{-2}$-$1E^{2}$	--		K estimado por Aquaconsult (2010) depósitos volcánicos
	IV	Libre		$1E^{-3}$—$5E^{-1}$		--	K estimado por Domenico-Schwartz (1998) para rocas sedimentarias
	V	Libre		$1E^{-4}$-$7E^{-2}$		--	K estimado por Domenico-Schwartz (1998) y S por Dominico y Mifflin (1965)
		Confinado			$3E^{-6}$-$7E^{-5}$		
	VI	Libre		$1E^{-5}$-$7E^{-3}$		--	K estimado por Domenico-Schwartz (1998) y S por Dominico y Mifflin (1965)
		Confinado			$3E^{-6}$-$1E^{-5}$		

7.8.3.4 Piezometría

La piezometría, es decir, el nivel piezométrico de la superficie libre de agua sobre el nivel del mar en las unidades hidrogeológicas, se elaboró a partir de las vertientes, los cuerpos de agua, curvas de nivel cada 20 m, imágenes satelitales, observaciones de terreno y de las condiciones de borde de las conexiones con las cuencas vecinas.

En la Figura 7.289 se han trazado las isopiezas inferidas de acuerdo a los antecedentes descritos anteriormente, en el cual se observa que las isopiezas del sector oriental van de las zonas más altas a la depresión del lago, es decir, con dirección concéntrica al lago, y otra que presenta una isopieza menor hacia el sector noroeste que debería indicar la salida. La piezometría define principalmente dos direcciones de flujo subterráneo, unos flujos son convergentes al lago desde las cotas más altas y otro flujo tiene una dirección sureste-noroeste desde el lago Chungara hacia las lagunas de Cotacotani.

La laguna principal de Cotacotani está separada del lago Chungara por 4 km de material volcánico y la lámina de agua libre de la laguna de Cotacotani (4.526 msnm) está 18 m por debajo del lago Chungara (4.544 msnm). Por lo tanto, existe un gradiente hidráulico de agua subterránea de 45% entre el lago Chungara y las lagunas de Cotacotani, según los antecedentes revisados.

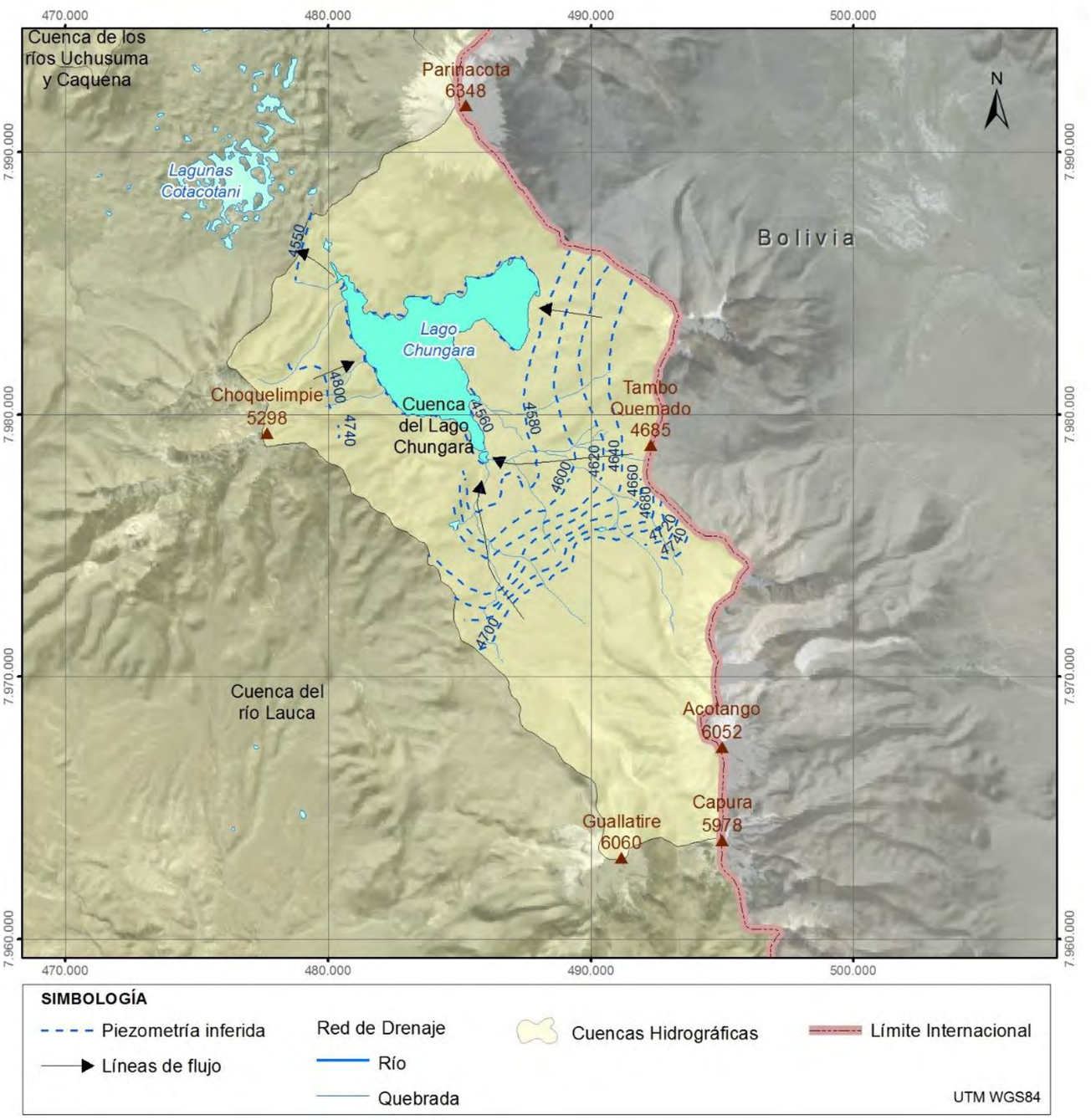


Figura 7.289 Mapa piezométrico inferido de la cuenca del lago Chungara. Fuente: elaboración propia.

7.8.4 Caracterización Hidroquímica

A continuación se analizaron los escasos antecedentes hidroquímicos que existen en la cuenca del lago Chungara y los datos hidroquímicos e isotópicos obtenidos en las 3 campañas de terreno efectuadas en el presente estudio. A partir de esta información se caracterizaron hidroquímica e isotópicamente las aguas de las quebradas, río Chungara y del lago Chungara. Por otro lado, se analizó el contenido de diferentes elementos de la aguas con la norma chilena para agua potable, NCh 409/1.Of2005.

7.8.4.1 Estudios hidroquímicos existentes

La cuenca del lago Chungara fue estudiada desde el punto de vista hidroquímico e isotópico para evaluar si existe conexión hidráulica entre el lago Chungara y las lagunas de Cotacotani. En el informe Risacher *et al*. (1999) se recolectaron y analizaron 8 muestras, las cuales corresponden a 3 muestras de aguas del lago Chungara, 1 al río Chungara en el bofedal y 4 muestras de manantial. Esta campaña se efectuó en mayo de 1996 y se llevó a cabo un análisis hidroquímico en todas las muestras y en la muestra CHR-3 se analizó hidroquímica e isotópicamente.

Posteriormente, se desarrolló un estudio para evaluar específicamente si existe conexión hidráulica entre el lago Chungara y las lagunas de Cotacotani mediante el análisis hidroquímico e isotópico de las aguas superficiales y subterráneas. Para ello, en Herrera *et al*. (2006) recogieron en la cuenca del lago Chungara y las lagunas de Cotacotani 32 muestras de agua para el análisis hidroquímico, 45 muestras para el análisis isotópico de $\delta^{18}O$ y δD, 5 muestras de precipitación y 9 muestras de agua para el análisis de tritio, durante 3 campañas de muestreo (enero de 2002, noviembre de 2002 y enero de 2004).

Estos datos de composición química analizados en los estudios anteriores y en el monitoreo de la DGA de calidad de las aguas en las estaciones "Río Chungara en Jarsuri", "Vertiente Ajata", "Vertiente Mal Paso", "Estero Sopocalane" y "Río Chungara en Desembocadura" fueron compilados en la base de datos del informe de DICTUC (2009).

Recientemente, en noviembre de 2014, se tomaron 3 muestras para el análisis químico e isotópico de $\delta^{18}O$ y δD en el estudio de Matraz (2015). En la Figura 7.290 se

presenta la ubicación de las muestra analizadas hidroquímica e isotópicamente por los diferentes autores en la cuenca del lago Chungara.

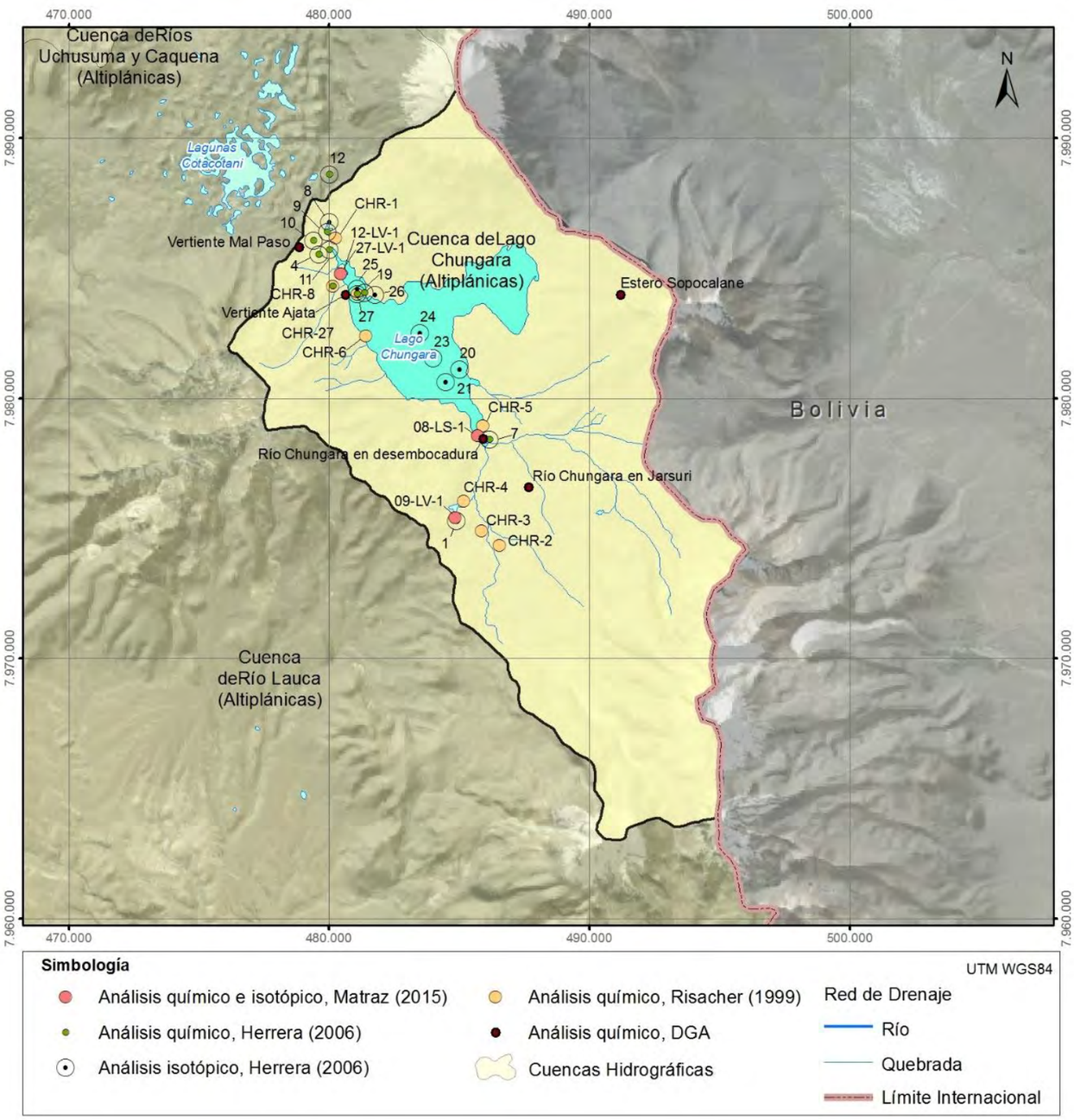


Figura 7.290 Ubicación de las muestras analizadas hidroquímica e isotópicamente en los antecedentes en la cuenca del lago Chungara. Fuente: elaboración propia.

En la Tabla 7.178 se presenta el número de análisis que hay en cada estación de calidad de agua de la DGA en ese periodo, en el caso de que exista algún dato de escasa fiabilidad o presente un error del balance iónico inaceptable se ha eliminado del análisis y el periodo del monitoreo que se reinterpreta, a partir de estos datos se calculó el promedio del valor de los parámetro fisicoquímicos de cada estación.

Tabla 7.178 Muestras consideradas en cada estación de la DGA para la estimación de parámetros promedios a partir de la base de datos de DICTUC (2008). Fuente: elaboración propia.

Estación DGA	N° datos analizados	N° datos eliminados	Periodo muestreo
"Río Chungara en Jarsuri"	6	0	1980-1981
"Vertiente Ajata"	22	1	1980-1992
"Vertiente Mal Paso"	25	2	1980-1992
"Estero Sopocalane"	7	0	1982-1996
"Río Chungara en Desembocadura"	26	1	1983-1992

7.8.4.2 Campaña de muestreo

La cuenca del lago Chungara fue muestreada en las dos últimas campañas de terreno con fin de verificar los estudios existentes. A partir de esta información se caracteriza hidroquímicamente e isotópicamente y se determina la calidad de agua de algunos elementos y parámetros según la norma chilena para agua potable NCh 409/1. El programa de muestreo de este estudio se diseñó para complementar de manera efectiva la información disponible. En la Tabla 7.179 se resume el número de mediciones de los parámetros fisicoquímicos registrados *in situ*, el número de muestras tomadas para el análisis hidroquímico y para el análisis isotópico y en la Figura 7.291 se muestra la ubicación de las muestras tomadas. En el Anexo VIII se describe el protocolo seguido en terreno para la toma de muestras de agua.

Tabla 7.179 Resumen de las actividades realizadas en la cuenca del lago Chungara en las campañas de muestreo. Fuente: elaboración propia.

Campaña	Fecha	Medición parámetros fisicoquímicos *in situ*	Muestras para análisis hidroquímico	Muestras para análisis isotópico
Primera	Noviembre de 2015	0	0	0
Segunda	Marzo de 2016	0	0	0
Tercera	19 y 20 de mayo de 2016	4	4	4
Cuarta	11 y 12 de agosto de 2016	4	4	4

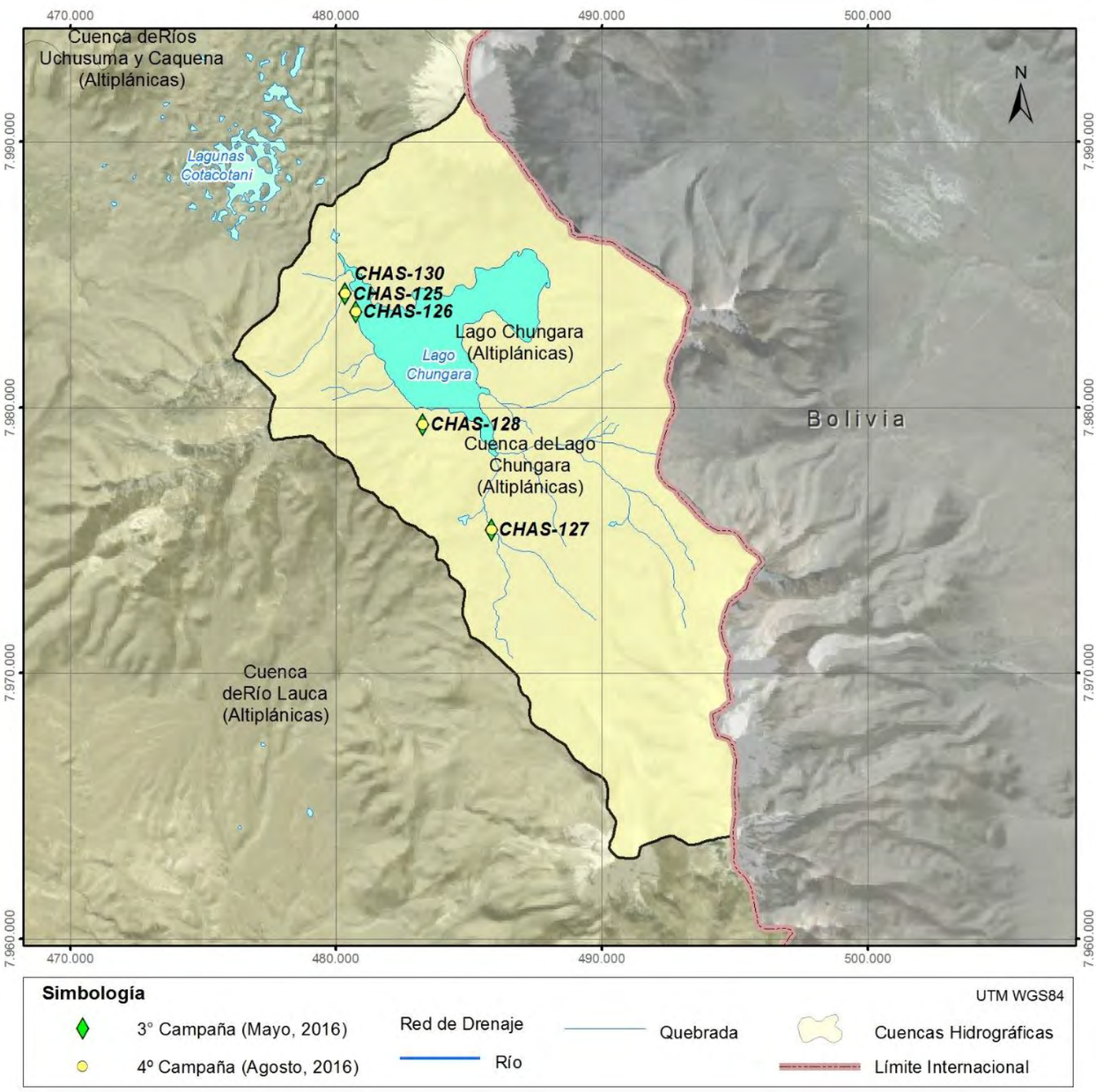


Figura 7.291 Ubicación de las muestras analizadas hidroquímica e isotópicamente en la cuenca del lago Chungara durante las campañas de muestreo efectuadas en el presente estudio. Fuente: elaboración propia. Fuente: elaboración propia.

7.8.4.3 Parámetros fisicoquímicos *in situ*

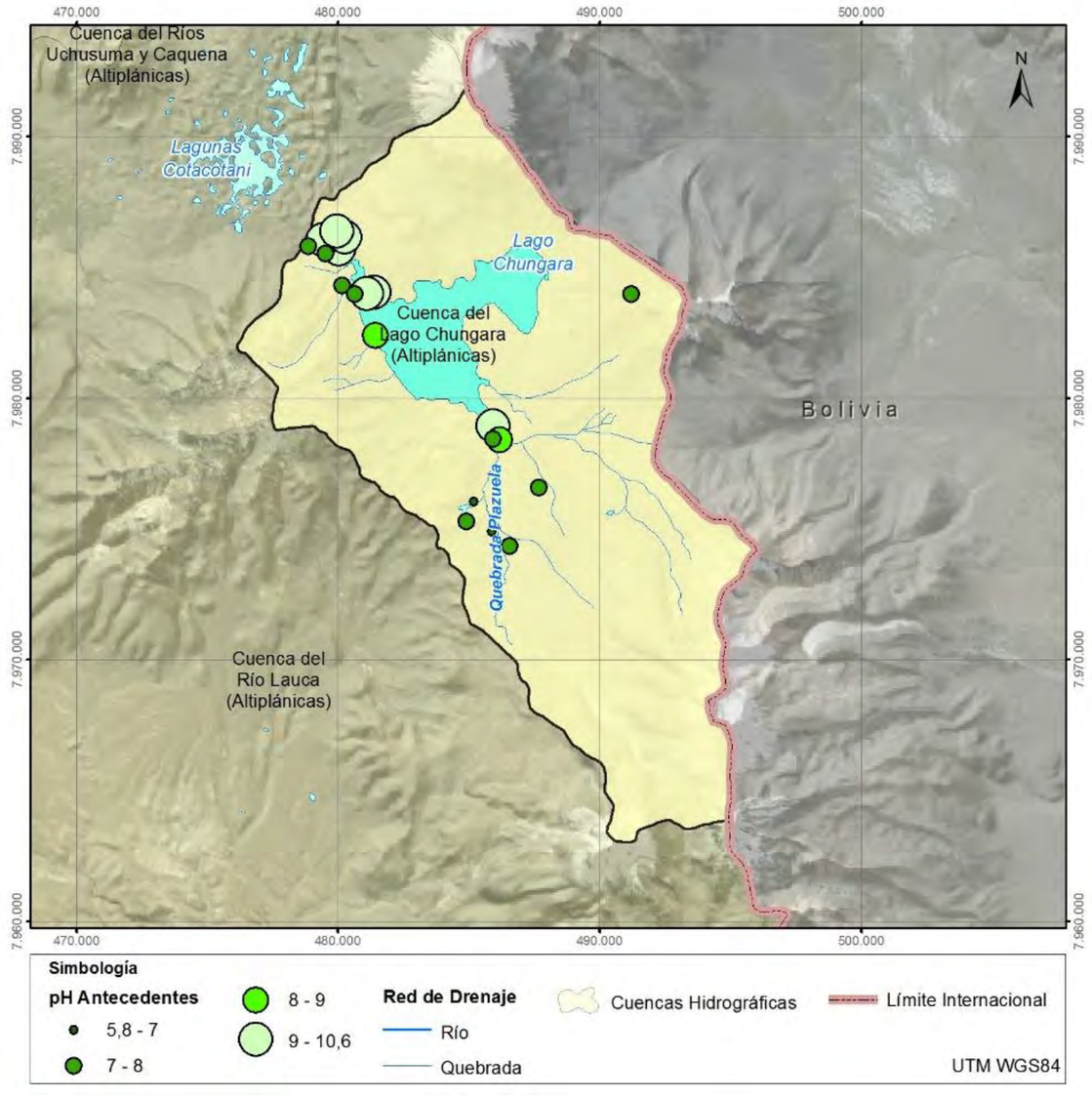
El análisis de los parámetros fisicoquímicos (temperatura, pH y conductividad eléctrica) se desarrolló a partir de los valores registrados en los estudios de Risacher *et al*. (1999), Herrera *et al*. (2006), del monitoreo realizado en las estaciones de la DGA y de las campañas de terreno realizadas en el presente estudio. A continuación se comenta la variación espacial de cada uno de ellos en la cuenca del lago Chungara.

PH

Los valores promedios estimados a partir de la información existente muestran que las vertientes que rodean al lago Chungara y el río Chungara presentan un pH neutro a alcalino, entre 6 a 8 de pH. En la Figura 7.292 (izquierda) se muestra que las aguas del río Chungara en la desembocadura, las lagunas y el lago en el sector noroeste del lago Chungara presentan un pH alcalino, superando el pH 9.

CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

Las conductividad eléctrica promedio de las aguas analizadas en la cuenca del lago Chungara varían entre 29 y 1.950 µS/cm. En la Figura 7.292 (derecha) se observa que las vertientes son aguas frescas con valores de conductividad inferior a 100 µS/cm mientras que el río Chungara presenta un rango entre 220 a 270 µS/cm. En el sector noroeste del lago Chungara se registran los valores más altos de conductividad eléctrica, alcanzando 1.950 µS/cm.



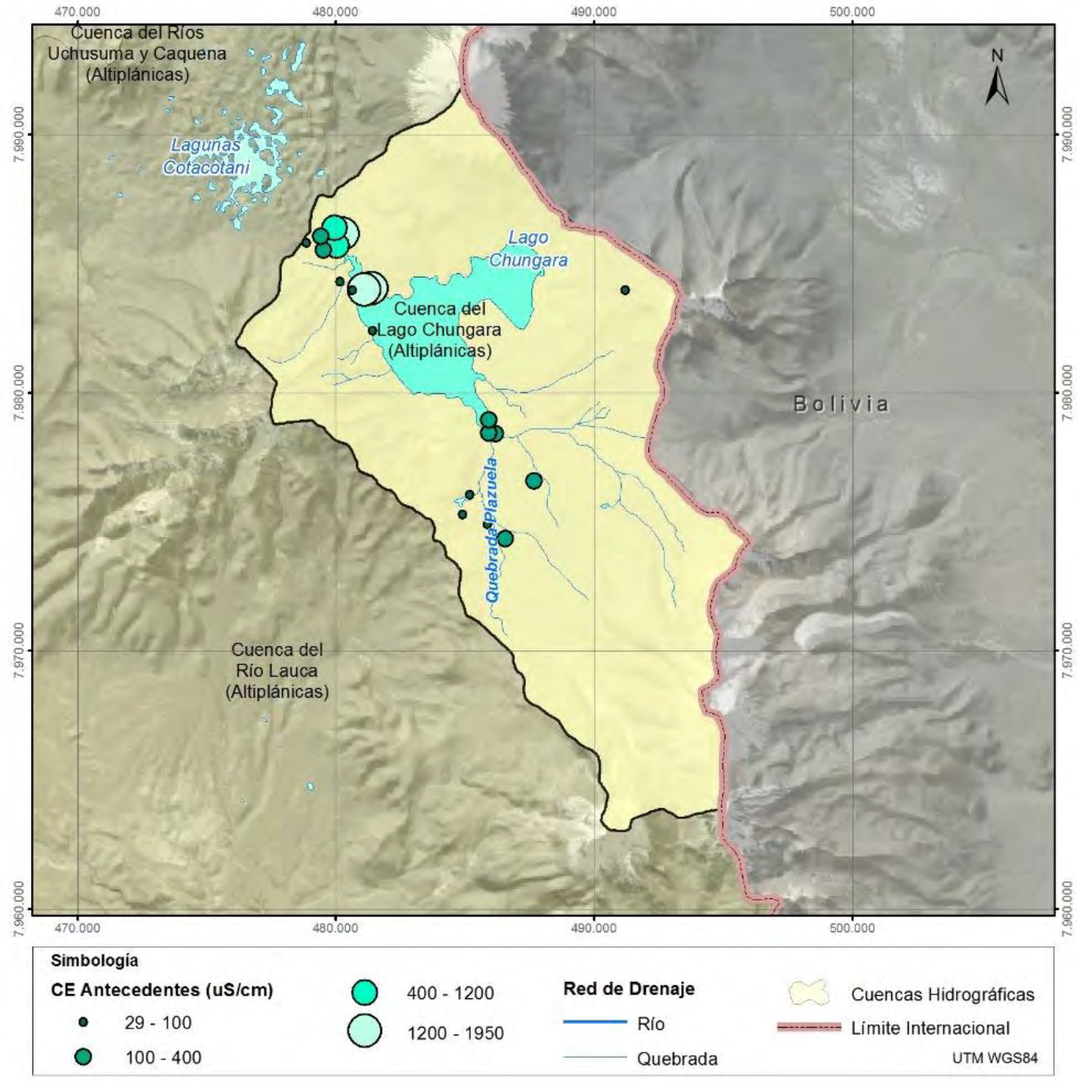


Figura 7.292 Distribución de los valores de pH (izquierda) y de conductividad eléctrica (derecha) de las muestras recogidas en los antecedentes en la cuenca del lago Chungara. Fuente: elaboración propia.

7.8.4.4 Modelo hidroquímico de las aguas

CONTROL DE CALIDAD ANÁLISIS QUÍMICOS

Los resultados obtenidos en laboratorio en las campañas de terrenos realizadas en el presente estudio y en los antecedentes Risacher *et al*. (1999) y en Herrera *et al*. (2006) se sometieron a un control de calidad mediante el cálculo del balance iónico. En la Tabla 7.180 se presentan los resultados del balance iónico en el que la mayoría de las muestras cumplen el error máximo.

Tabla 7.180 Resumen de los valores máximos y mínimos del error del balance iónico de la composición química de las muestras analizadas en los antecedentes y en las dos campañas de muestreo en la cuenca del lago Chungara. Fuente: elaboración propia.

Error del balance iónico	Herrera (2006)	Risacher (1999)	3°Campaña Mayo 2016	4°Campaña Agosto 2016
Máximo	9,82%	7,84%	6,85%	2,55%
Mínimo	-10,51%	-0,14%	3,44%	-8,40%

ANÁLISIS DE FACIES QUÍMICAS

En esta sección se reinterpretaron los resultados de la composición hidroquímica de las aguas superficiales y subterráneas analizadas en los antecedentes existentes en la cuenca del lago Chungara y en las campañas realizadas en el presente estudio. En el Anexo VIII se analizan mediante diagramas de Piper y Schoeller-Berkaloff los datos obtenidos en el estudio de Risacher *et al*. (1999) y de Herrera *et al* (2006).

La composición hidroquímica de las aguas muestreadas en mayo y agosto de 2016 se graficó en los diagramas de Piper y Schoeller-Berkaloff que se presentan en la Figura 7.293. Se observa que las vertientes que alimentan al lago Chungara son aguas muy diluidas y bicarbonatadas cálcico-magnésicas. En cambio, el río Chungara aporta aguas que varían entre sulfatadas y bicarbonatadas magnésico-cálcicas, indicando un grado de evolución en la composición hidroquímica por interacción con la roca, esto implica que el ion predominante sea el sulfatos. Las aguas del lago Chungara son sulfatadas magnésico-cálcicas o sulfatada-bicarbonatada magnésico-sódicas, según la información obtenida en las campañas de muestreo y los antecedentes analizados.

En el diagrama de Schoeller-Berkaloff se aprecia como las aguas de las vertientes son muy diluidas, seguido del río Chungara, y el lago es el que tiene las aguas más mineralizadas.

En el Anexo VIII se presenta el contenido de los diferentes elementos mayoritarios y minoritarios en la cuenca del lago Chungara. Los diferentes gráficos indican que la muestra CHAS-126 tiene el mayor contenido de boro, arsénico, calcio, cloruro, fluoruros, fosfatos, magnesio, potasio, sodio y sulfatos, sobre todo los resultados obtenidos del muestreo efectuado en agosto de 2016. El contenido de cadmio, cianuro, cobre, cromo, manganeso, plomo, selenio y zinc fue inferior al límite detectable en los instrumentos del laboratorio en todas las muestras en ambas campañas.

El mayor contenido de aluminio lo presentó la muestra CHAS-126 en mayo 2016, pero en agosto fue la muestra CHAS-127. Las muestras CHAS-126 y CHAS-128 fueron las muestras con mayor nivel de bromuro. La muestra CHAS-127 presentó el mayor nivel de hierro en mayo 2016, pero en agosto 2016 fue la muestra CHAS-130. La muestra CHAS-130 contenía 0,001 mg/l de mercurio en el muestreo realizado en agosto de 2016.

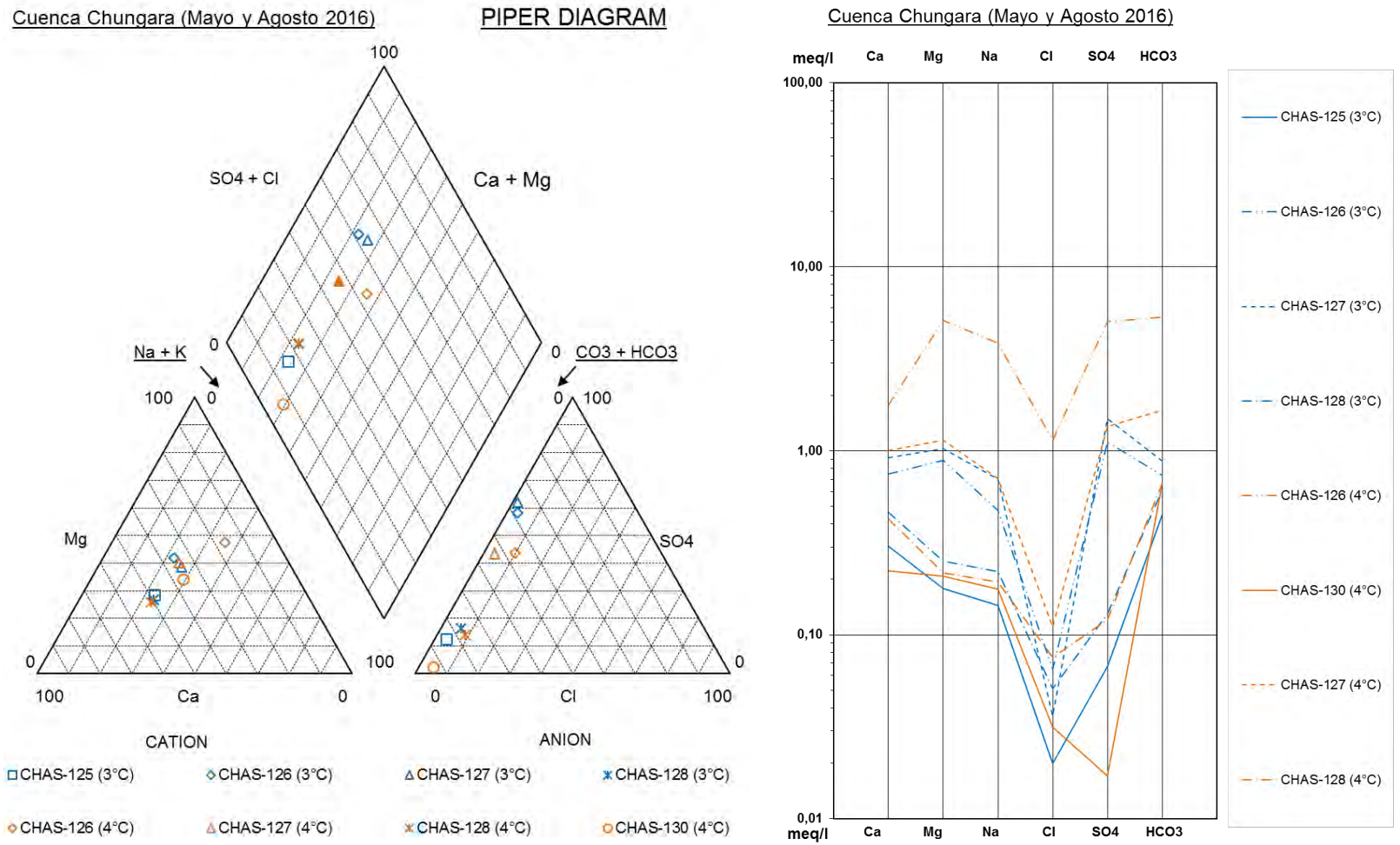


Figura 7.293 Diagramas de Piper y de Schoeller-Berkaloff de las muestras analizadas hidroquímicamente en la cuenca del lago Chungara. Fuente: elaboración propia.

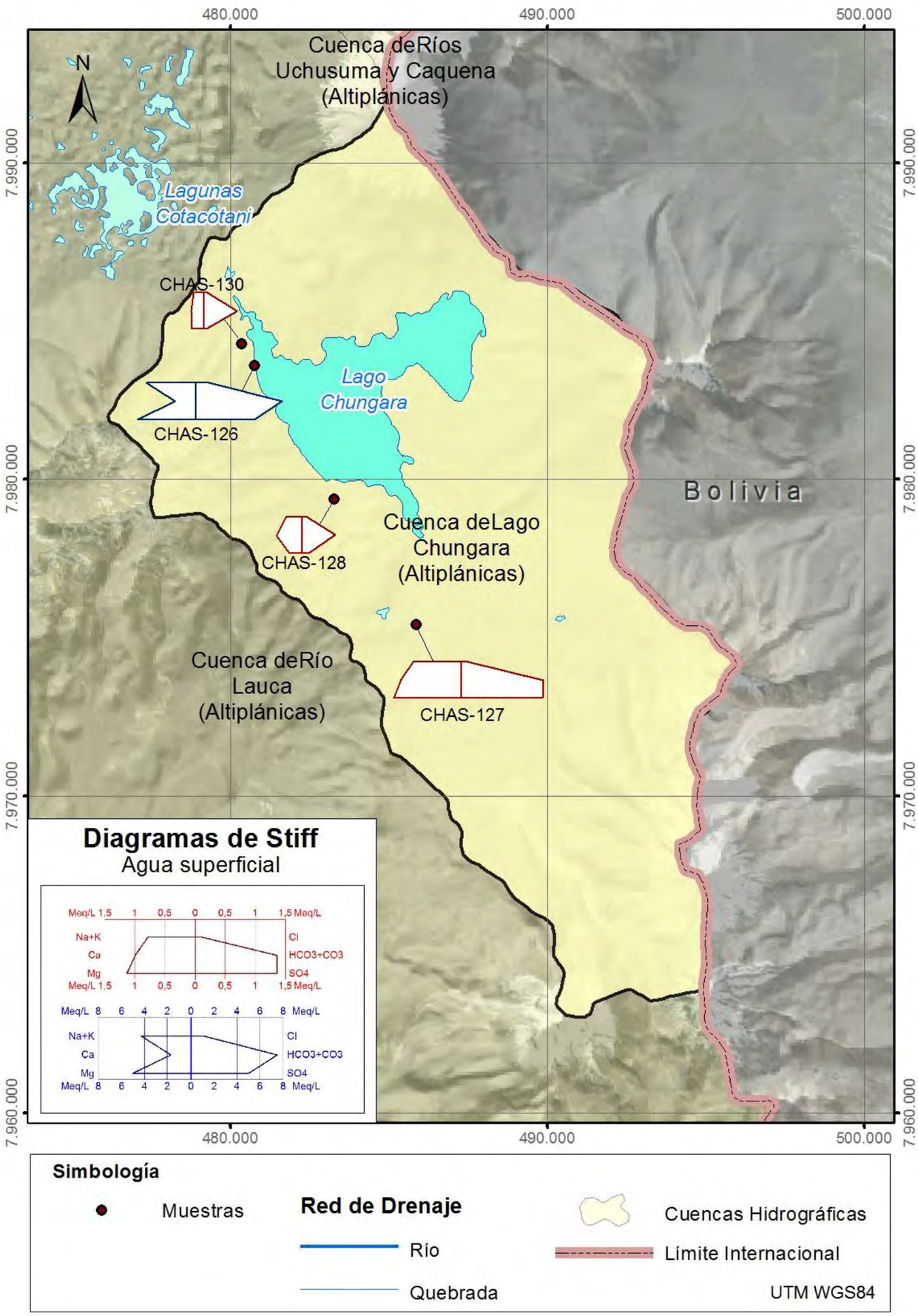


Figura 7.294 Mapa con los diagramas de Stiff de la composición química de las muestras recogidas en la cuenca de lago Chungara en agosto de 2016. Fuente: elaboración propia.

EVOLUCIÓN DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS AGUAS

En general, las aguas de las vertientes que alimentan al lago Chungara son aguas diluidas bicarbonatadas cálcica-sódicas. La composición química tan poco mineralizada de las vertientes indican que los complejo volcánicos que rodean el lago son una zona de recarga, donde las aguas circulan a gran velocidad y/o hay poca interacción con el material volcánico, son muy similares al quimismo de las precipitaciones y han sufrido escasa evolución química, siendo aguas jóvenes.

El río Chungara porta aguas sulfatada-bicarbonatada magnésico-cálcicas, indicando un leve grado de evolución hidroquímica, el que hace que el ion predominante sea el sulfatos, mientras que las aguas del lago Chungara son sulfatada-magnésicas o sulfatada-bicarbonatada magnésico-sódicas. Risacher *et al.* (1999) asocia este aumento de sulfatos en las aguas del lago Chungara con las rocas volcánicas cuaternarias ricas en azufre.

Risacher *et al.* (1999) sugiere que el lago Chungara es alimentado en 25% por el río Chungara (aguas sulfatadas) y el 75% restantes corresponde a las vertientes y/o aguas subterráneas similares (aguas bicarbonatadas).

7.8.4.5 Calidad de las aguas

En el Anexo VIII se presentan los resultados de las mediciones de parámetros *in situ* y análisis de laboratorio, y dentro de cada tabla se remarcaron en rojo aquellos valores que sobrepasan la norma chilena para uso de agua potable NCh 409 y en color verde los valores que superan el límite de aluminio y boro establecido en la norma para riego NCh 1.333.

La composición hidroquímica obtenida en el muestreo realizado en mayo de 2016 indicó que la muestra CHAS-128 es agua apta para consumo humano mientras que en mayo de 2016 el resto de las muestras supera el límite de contenido de hierro total establecido en la norma chilena NCh 409 y en agosto de 2016 las aguas sobrepasan los límites de arsénico, fluoruros, pH, hierro y/o mercurio que indica la norma NCh 409 y de boro definido en la norma para riego NCh 1.333.

Además, la evaluación de la calidad de las aguas de la cuenca del lago Chungara se complementó con la base de datos del monitoreo efectuado y facilitado por la DGA en la desembocadura del río Chungara desde 1983 hasta 2014.

Las aguas de la cuenca del lago Chungara no han superado el límite establecido por la norma chilena para agua potable en los elementos: cobre, cadmio, manganeso, cromo, magnesio, selenio, zinc, cloruros y sulfatos durante el periodo 1983-2014 en los puntos analizados. Sin embargo, el contenido de hierro, arsénico, plomo, mercurio en ocasiones no han respetado el límite establecido en la norma. El pH fue menor o superior al rango fijado en la norma chilena, sobre todo superado en el sector noroeste del lago Chungara. El mercurio superó el nivel establecido en los años 1999, 2013 y 2014 en la desembocadura del río Chungara. Es destacable que en los años 1992, 1994, 1998 y 2003 ningún elemento superó los límites establecidos en la norma, por lo que en esos años el agua en la desembocadura del río Chungara era apta para el consumo humano.

A continuación se presentan el registro del arsénico y del hierro en la desembocadura del río Chungara desde 1983 hasta 2014. Se descartó el dato de arsénico en el año 2000 por no ser fiable, de 0,859 mg/l de As. En la Figura 7.295 se observa como cada año varía el contenido de arsénico y hierro, superando o respetando la norma de agua potable. El contenido de arsénico se ha mantenido por debajo de la norma NCh 409/1 desde 2005.

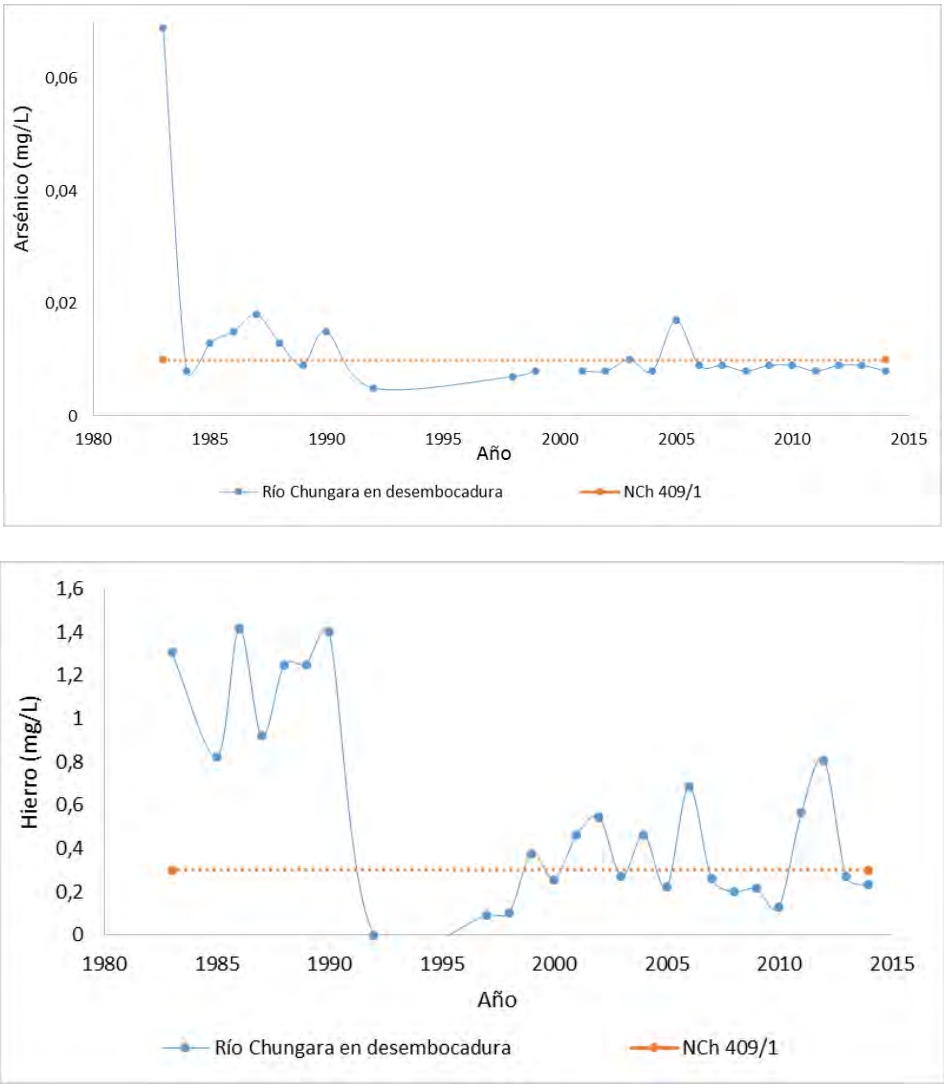


Figura 7.295 Registro del contenido de arsénico y hierro en la desembocadura del río Chungara en el periodo 1983-2014. Fuente: elaboración propia.

7.8.4.6 Isotopía de las aguas

En la cuenca del lago Chungara se analizó isotópicamente la molécula del agua (D y ^{18}O) en vertientes, el río Chungara y el lago en el informe Herrera *et al*. (2006), en Matraz (2015) en 3 puntos de agua y en 2 campañas de terreno en el presente estudio. En la Figura 7.296 se muestra la ubicación de los puntos de aguas superficiales y subterráneos muestreados en la cuenca del lago Chungara.

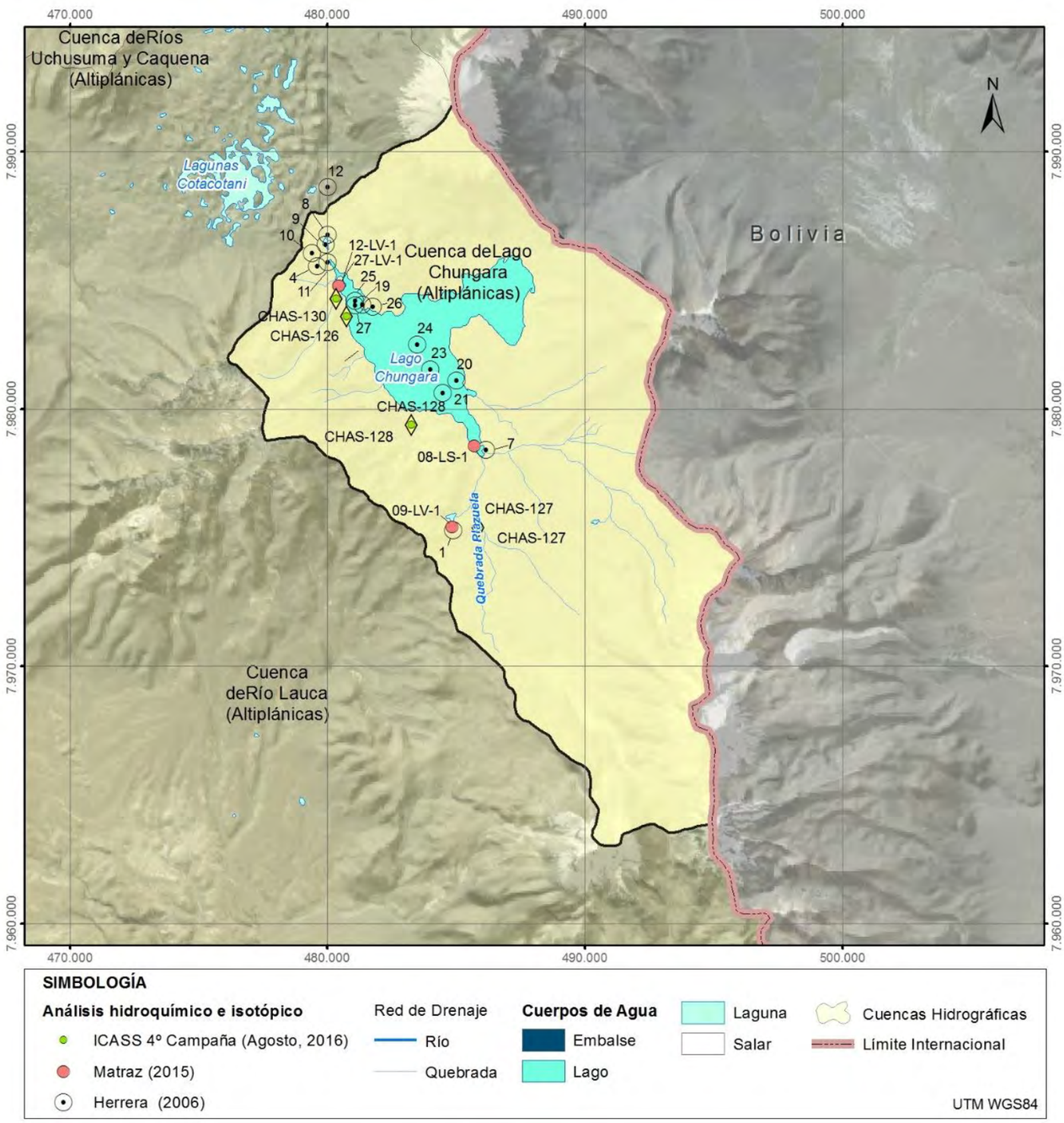


Figura 7.296 Ubicación de las muestras analizadas isotópicamente en la cuenca del lago Chungara en los antecedentes y en las diferentes campañas de terreno. Fuente: elaboración propia.

En la Figura 7.297 se muestra la relación D y ^{18}O de los resultados obtenidos en Herrera *et al*. (2006) y Matraz (2015) y la Recta Meteórica Local ($\delta D = 7{,}9\delta^{18}O + 14$) desarrollada en Herrera *et al*. (2006). En tonos azules se muestran las aguas tomadas en las diferentes vertientes que existen en la cuenca, de color morado las muestras del río Chungara, de color naranja las tomadas en las lagunas Cotacotani y de color rojo las muestras tomadas en el lago Chungara a diferentes profundidades.

Se observa que las aguas de las vertientes (azul) y del río Chungara (morado) se ajustan a las RMM y RML indicando que son aguas meteóricas, mientras que las aguas del lago Chungara (rojo) se agrupan en un punto y en una recta con pendiente 5 respecto a las muestras no evaporadas de las vertientes. Por otro lado, las aguas de las diferentes lagunas Cotacotani se alinean en la recta de pendiente 5, por lo que Herrera *et al*. (2006) justifica que las lagunas de Cotacotani recibe el 58% de los aportes del lago Chungara y el resto procederían de vertientes y aguas subterráneas que no han sufrido evaporación.

Si se analiza la evolución temporal de las muestras analizadas se determina que la composición isotópica de las aguas no es significativa, excepto algunas lagunas de Cotacotani que según Herrera *et al*. (2006) son lagunas aisladas temporalmente de la laguna principal.

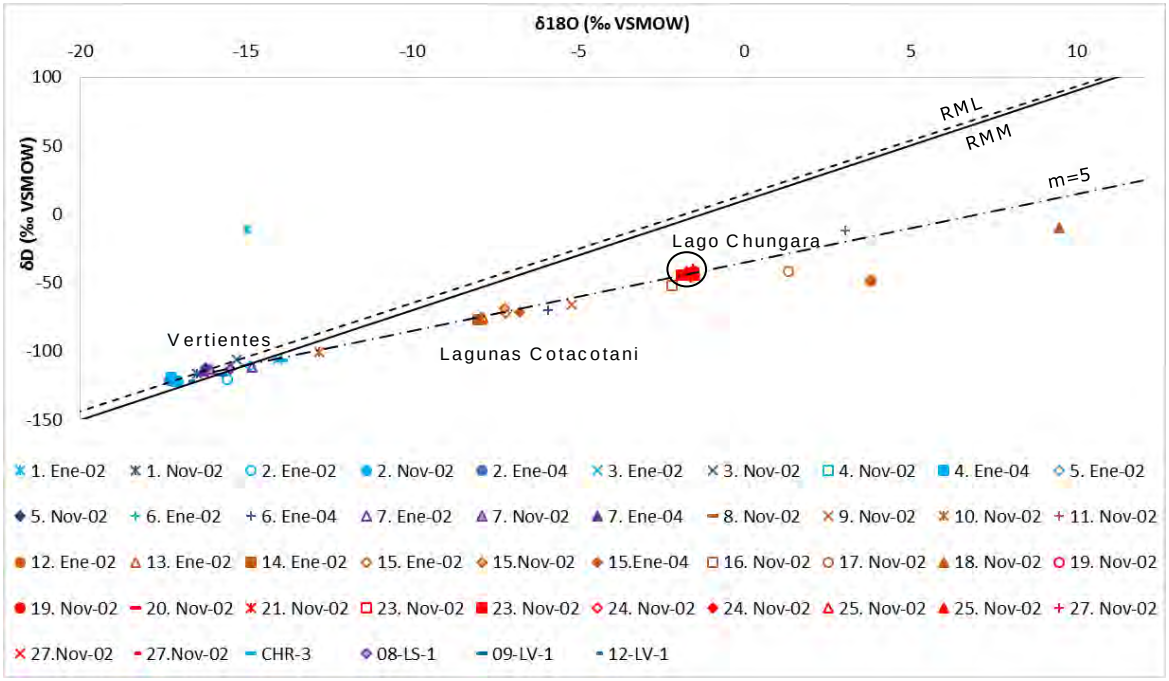


Figura 7.297 **Relación $\delta^{18}O/\delta D$ de las muestras analizadas en estudios** anteriores en la cuenca del lago Chungara. Fuente: elaboración propia.

En el presente estudio se tomaron muestras para el análisis isotópico de la molécula de aguas superficiales en la cuenca del lago Chungara en mayo y agosto de 2016. La composición isotópica de las aguas analizadas en mayo de 2016 varió entre -104,19 y -119,73‰ δD y entre -14,01 y -16,54‰ $\delta^{18}O$ y en agosto de 2016 osciló entre –69,89 y -113,62‰ δD y entre -7,41 y -15,10‰ $\delta^{18}O$. En la Figura 7.298 se presentan de color verde las aguas analizadas en mayo 2016 y de color rojo las aguas muestreadas en agosto de 2016. En la relación entre δD y $\delta^{18}O$ se observa que la mayoría de muestras se ajustan a la RMM y RML, lo que implica que son aguas meteóricas. Si se comparan con los resultados obtenidos en los antecedentes coinciden con las aguas de vertientes y del río Chungara.

Destaca la muestra tomada en el lago Chungara (CHAS-126) en agosto de 2016, la cual se ajusta a la recta con pendiente 5, indicando un alto grado de evaporación desde lámina libre, tal como lo indican los antecdentes analizados.

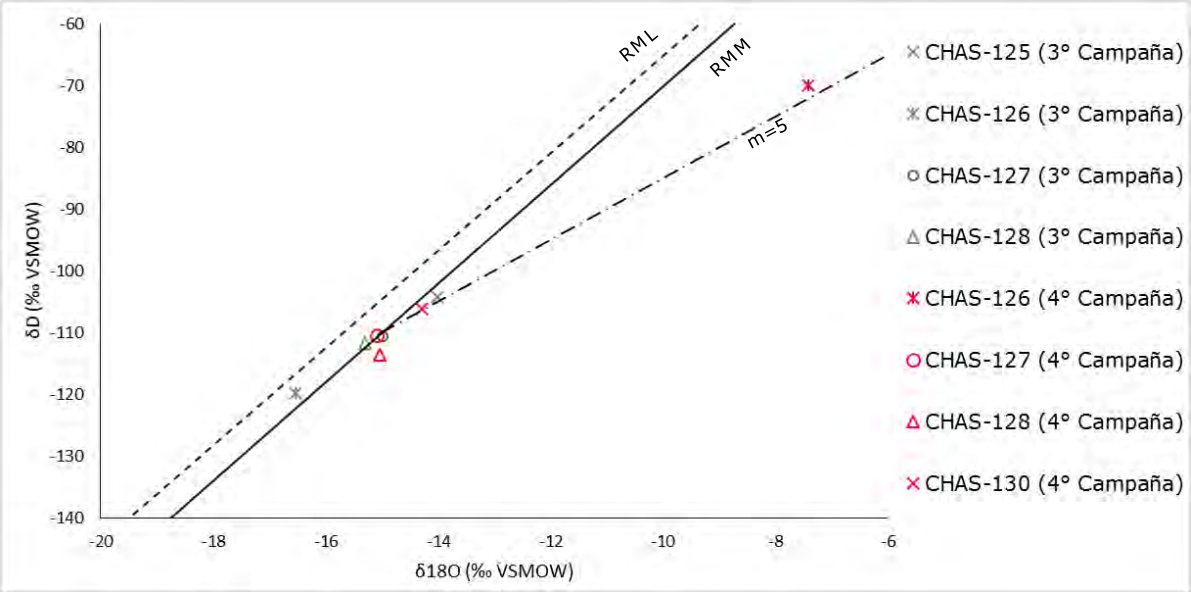


Figura 7.298 **Relación $\delta^{18}O/\delta D$ de las muestras analizadas en la cuenca del** lago Chungara, mayo y agosto de 2016. Fuente: elaboración propia.

7.8.5 Modelo Conceptual

La cuenca del lago Chungara es cerrada, tiene una superficie de 276 km^2 y el espejo del lago ocupa un área de 22,8 km^2. El lago Chungara se destaca por ser uno de los más altos del mundo, situado a una cota de 4.500 msnm. Limita al este con Bolivia y el resto con la cuenca del río Lauca. La cuenca del Lago Chungara es la primera cuenca de norte a sur en el altiplano que se desarrolla completamente en territorio chileno, es una cuenca de características endorreicas (no tiene desagüe superficial). La principal alimentación superficial del lago proviene del río Chungara, el que según Niemeyer (1964) aportaría el 80% del agua al lago y el 20% restante provendría de las vertientes de la orilla occidental. Así mismo, existen alimentaciones subterráneas desde los cerros vecinos, en especial a través de las lavas permeables del faldeo del volcán Parinacota.

Esta cuenca presenta alta variación térmica entre el día y la noche, además se registran precipitaciones considerables, concentradas durante el invierno altiplánico. La precipitación media anual estimada con el método de las isoyetas es de 359,4 mm/año. Las salidas de aguas ocurren principalmente por evaporación desde el espejo de agua del lago, evapotranspiración e infiltraciones hacia el acuífero. En la cuenca no

existen estaciones fluviométricas, sin embargo, en Matraz (2015) se aforó el río Chungara en la desembocadura y entregó un caudal de 221 l/s en septiembre de 2014.

El lago se alimenta superficialmente del río Chungara, que nace en los Nevados de Quimsachata, y de vertientes que manan desde acuíferos colgados existentes en los conos volcánicos. Además, se producen flujos de agua subterránea convergentes hacia el lago Chungara desde las zonas de recarga a través del material volcánico mediante fracturas y de depósitos glaciales, es decir, desde las cotas más altas que bordean la cuenca hasta el acuífero detrítico de conductividad hidráulica de 0,1 a 10 m/día.

En general, las vertientes que alimentan al lago Chungara son aguas meteóricas, frescas, diluidas y bicarbonatadas cálcica-sódicas. El río Chungara porta aguas sulfatada-bicarbonatada magnésico-cálcicas, indicando un leve grado de evolución hidroquímica, hace que el ion predominante sea el sulfato, mientras que las aguas del lago Chungara son sulfatada-magnésicas o sulfatada-bicarbonatada magnésico-sódicas.

La composición hidroquímica obtenida en el muestreo realizado en mayo y agosto de 2016 indicó que el estero Sopocalane presenta aguas aptas para consumo humano mientras que en mayo de 2016 el resto de las muestras superan el límite de algún elemento que indica la norma NCh409 y de boro definido en la norma para riego NCh 1.333.

Según se puede observar el esquema del modelo conceptual de la cuenca del lago Chungara en la Figura 7.299, las entradas principales estarían dadas por las precipitaciones y recargas al acuífero, y las salidas principales estarían dadas por evaporación del lago, por la evapotranspiración de las praderas y por el aporte natural subterráneo a las lagunas de Cotacotani. Según los antecedentes, habría una conexión hidráulica entre los cuerpos de agua a través de los depósitos de avalancha de detritos del Holoceno y Pleistoceno, existiendo líneas de flujo de salida del sistema en el sector norte desde el lago Chungara hacia las lagunas de Cotacotani con un gradiente de 4,5‰ a través de los materiales de avalancha.

Figura 7.299 Esquema del modelo conceptual hidrogeológico de la cuenca del lago Chungara. Fuente: modificado de la capa uso del suelo tomada del portal web del SINIA http://ide.mma.gob.cl/.

7.9 Cuenca del Río Lauca

La cuenca del río Lauca corresponde a una subcuenca de un sistema mayor, el del salar de Coipasa, ubicado en Bolivia. La cuenca tiene una superficie de 2.427 km^2. De acuerdo a lo establecido por el IGM (Niemeyer & Cereceda, 1984), la parte superior de la cuenca pertenecería al altiplano chileno, mientras que su zona media e inferior estaría en territorio boliviano. En la Figura 7.300 se presenta la ubicación de la cuenca del río Lauca y su red de drenaje.

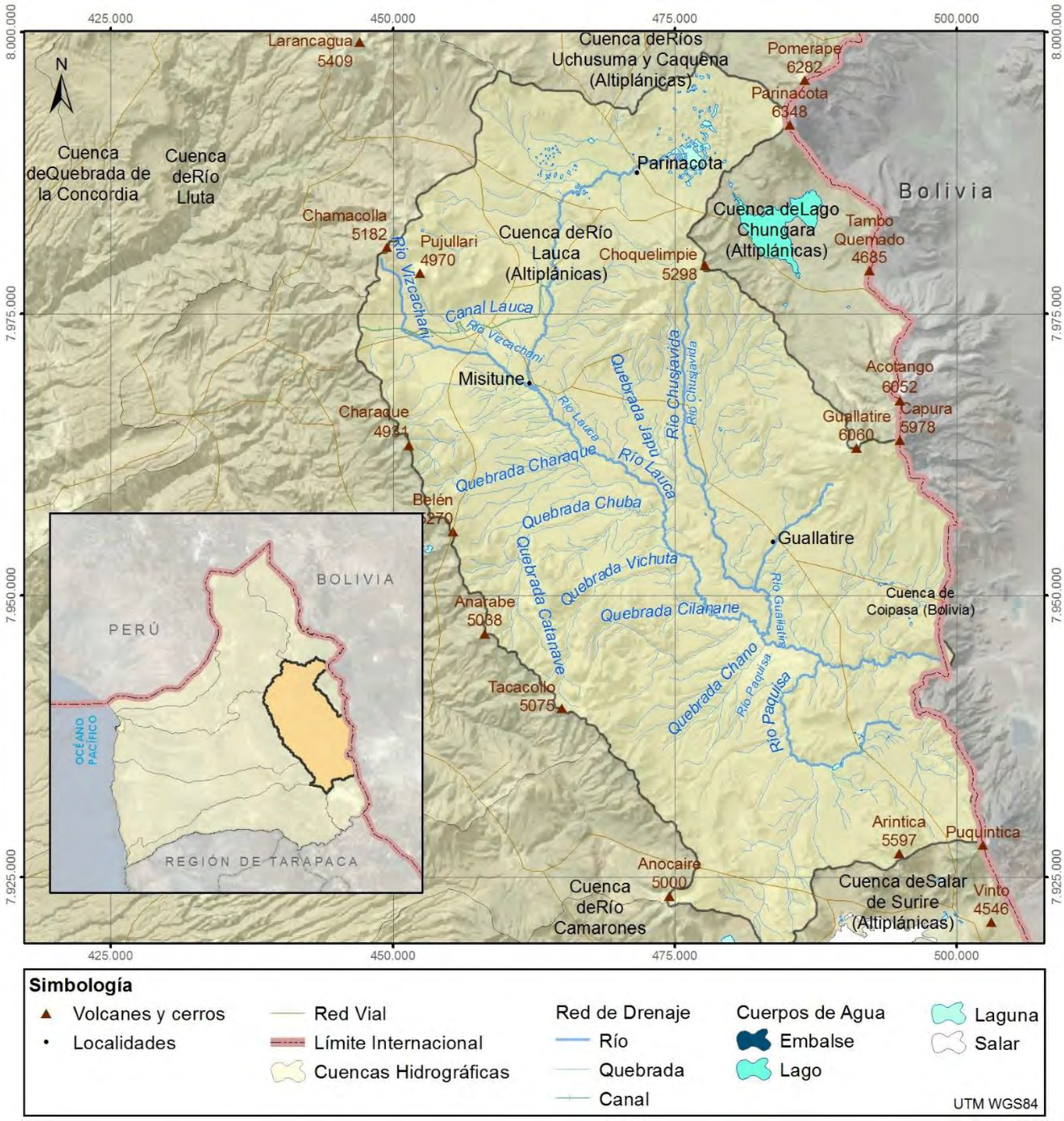


Figura 7.300 Ubicación de la cuenca del río Lauca. Fuente: elaboración propia.

7.9.1 Caracterización Hidrológica

7.9.1.1 Definición y caracterización de la cuenca del río Lauca

La cuenca delimita al Norte con el volcán Parinacota, al Este con el volcán Guallatire, al Sur con el Cerro Arintica, al Oeste destaca el cerro Belén y al Noroeste con el Cerro Chamacolla. El río Lauca nace aguas abajo de las ciénagas de Parinacota, las que previamente reciben afluentes del río Desaguadero. El río Desaguadero nace a partir de los escurrimientos de la laguna Cotacotani, se ubicada aproximadamente a 4 km al norponiente del lago Chungara.

De acuerdo a DICTUC (2009), aguas abajo de las ciénagas de Parinacota, el río Lauca toma dirección sur, con una leve inclinación al oeste, por unos 19 km, donde recibe un importante afluente por su ribera derecha, el río Vizcachani. Dicho afluente proviene de la ladera oriental de la cordillera de Chapiquiña, desviándolo para tomar dirección SE hasta su encuentro con la quebrada Chuba. Allí vuelve a tomar la dirección sur, con una leve inclinación al este que se va incrementando para drenar a Bolivia con una orientación completamente OE.

Los principales tributarios que la cuenca recibe en territorio chileno son: por la ribera derecha los ríos Ancochalloanes, Vizcachani y Quiburcanca; por la ribera izquierda, el Lauca afluentes de mayor importancia que gozan de alimentación desde cumbres englaciada, los ríos Chusjavida y Guallatire.

DELIMITACIÓN DE LA CUENCA

En la Figura 7.300 se muestra la delimitación y red de drenaje de la cuenca del río Lauca. El criterio utilizado para la delimitación se explicó en el apartado "Definición y Caracterización de las Cuencas de la Región" en el capítulo de "Análisis Regional". De manera resumida el criterio es básicamente topográfico.

CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS DE LA CUENCA

La morfología de la cuenca del río Lauca es un referente para establecer la dinámica esperada de la escorrentía superficial y se caracteriza por el análisis de tres parámetros, los relativos a la forma, al relieve y a la red de drenaje. Éstos se

calcularon con el uso de SIG, además de utilizar expresiones matemáticas para este fin. La metodología se muestra en detalle en el Anexo VI.

En relación a la forma, la cuenca tiene un coeficiente de compacidad (K_G) de 1,52, por tanto su forma es oblonga. La densidad del drenaje de la cuenca del río Lauca definida como la longitud total de los cauces sobre el área de la cuenca, en este caso fue de 0,30 km/km^2 que corresponde a una densidad de drenaje pobre.

Es necesario destacar que este parámetro representa la densidad de drenaje promedio en la cuenca, lo cual no excluye que existan cauces o quebradas al interior de la cuenca que dispongan de un drenaje muy desarrollado y por tanto, ocurra una respuesta rápida de transformación lluvia-escorrentía.

Para construir la curva hipsométrica de la cuenca fue necesario reclasificar las bandas del DEM y calcular las áreas acumuladas intermedias. Según la curva hipsométrica (Figura 7.301), la cuenca tiene una topografía variable iniciando desde la cota mínima de 3.884 msnm hasta la máxima de 6.312 msnm. Sin embargo, el 50% de la cuenca tiene una altura superior a 4.484 msnm.

De acuerdo a la metodología presentada en el Anexo VI, esta curva hipsométrica se clasifica de tipo C y corresponde a una cuenca sedimentaria que está en la fase de vejez.

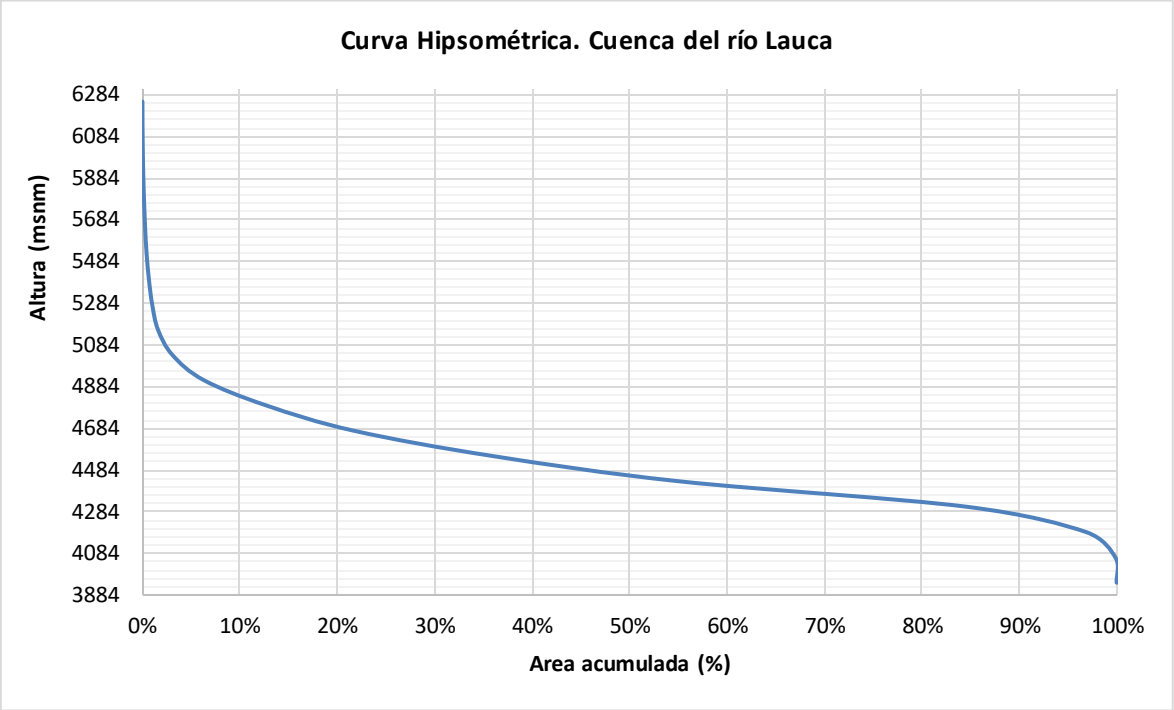


Figura 7.301 Curva hipsométrica de la cuenca del río Lauca. Fuente: elaboración propia.

7.9.1.2 Caracterización de la red de drenaje

Para el presente estudio se adoptó el diagrama unifilar del río Lauca del estudio "Diagnóstico de disponibilidad hídrica en la cuenca del río Lauca, región de Arica y Parinacota" liderado por Matraz Consultores Asociados (2015). Se considera que el estudio en referencia es reciente y no han ocurrido cambios significativos en la cuenca.

El diagrama Unifilar del río Lauca se indica en la Figura 7.302, en este se incluye canales, ríos y quebradas aportantes.

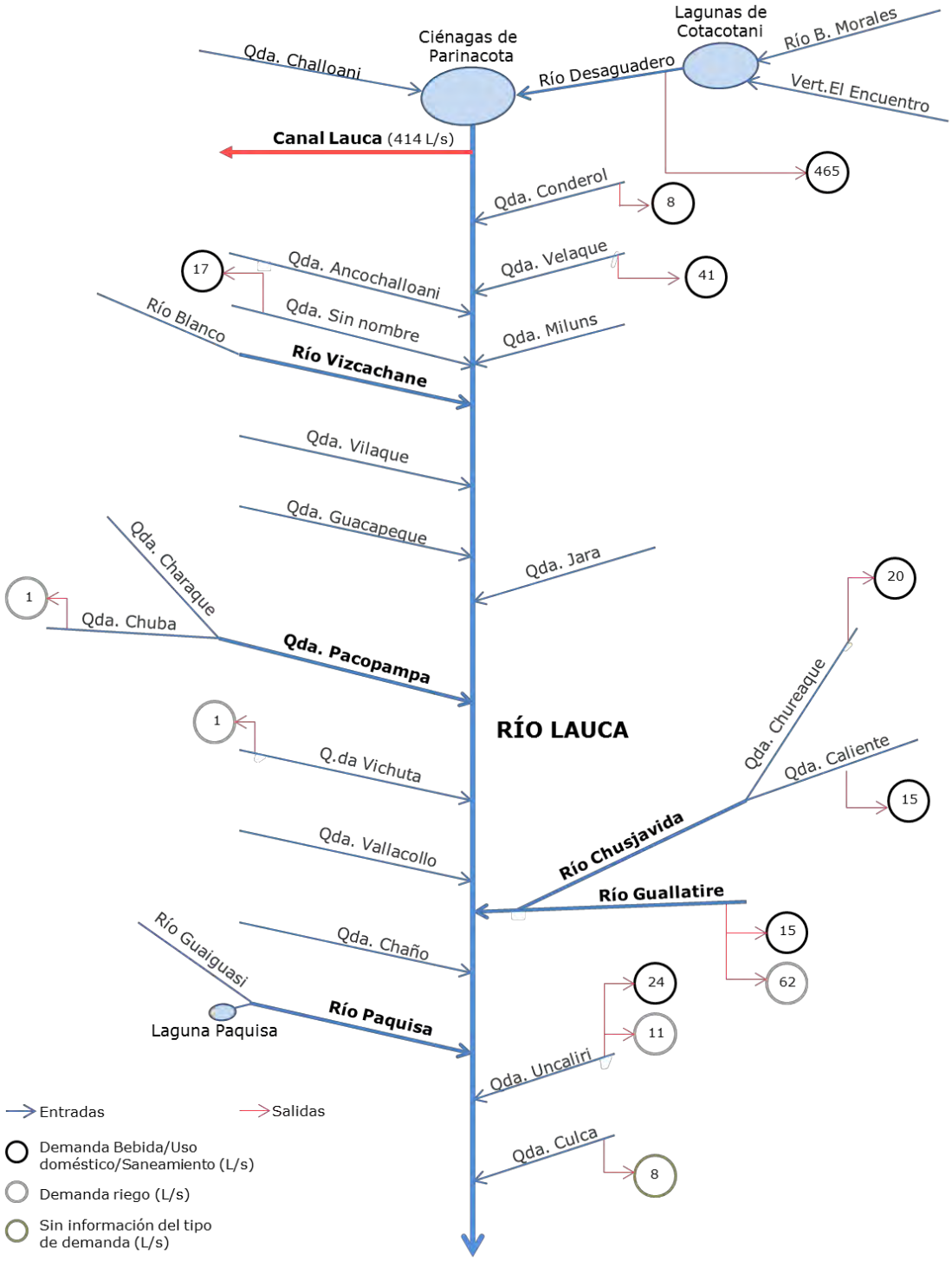


Figura 7.302 Diagrama Unifilar del río Lauca. Fuente: Matraz Consultores Asociados (2015).

7.9.1.3 Hidrometeorología

La cuenca del río Lauca cuenta con registros históricos de seis estaciones meteorológicas administradas por la DGA, cuatro de ellas aún vigentes. Las coordenadas y periodos de información disponible de las estaciones se presentan en la Tabla 7.181. Cabe mencionar que la estación Parinacota Ex Endesa cuenta con instrumentos de medición de las variables: temperatura, humedad relativa y evaporación, y la estación Cotacotani tiene registros hasta el año 1989 del tanque evaporímetro tipo A.

En adelante el análisis de las variables hidrometeorológicas de la cuenca se realiza a nivel regional, con la finalidad de incluir un mayor número de estaciones localizadas en cuencas vecinas con características hidrológicamente similares.

Tabla 7.181 Coordenadas y periodo de información de las estaciones. Fuente: elaboración propia.

Estación Meteorológica DGA	Código BNA	DATUM WGS84 H19S		Altitud	Periodo	Años	Estado
		UTM Este	UTM Norte				
Cotacotani	01020014-8	475.383	7.989.485	4.550	1961-2014	54	V
Parinacota Ex Endesa	01020017-2	471.626	7.987.205	4.420	1983-2014	32	V
Guallatire	01021007-0	483.667	7.954.672	4.240	1969-2014	46	V
Chucuyo Reten	01020016-4	468.750	7.985.849	4.400	1960-2014	55	V
Chucuyo Ex Endesa	01020018-0	466.019	7.985.660	4.400	1984-1990	7	S
Isla Blanca	01020013-K	477.352	7.989.241	4.540	1970-1989	20	S

V: Vigente, S: Suspendida.

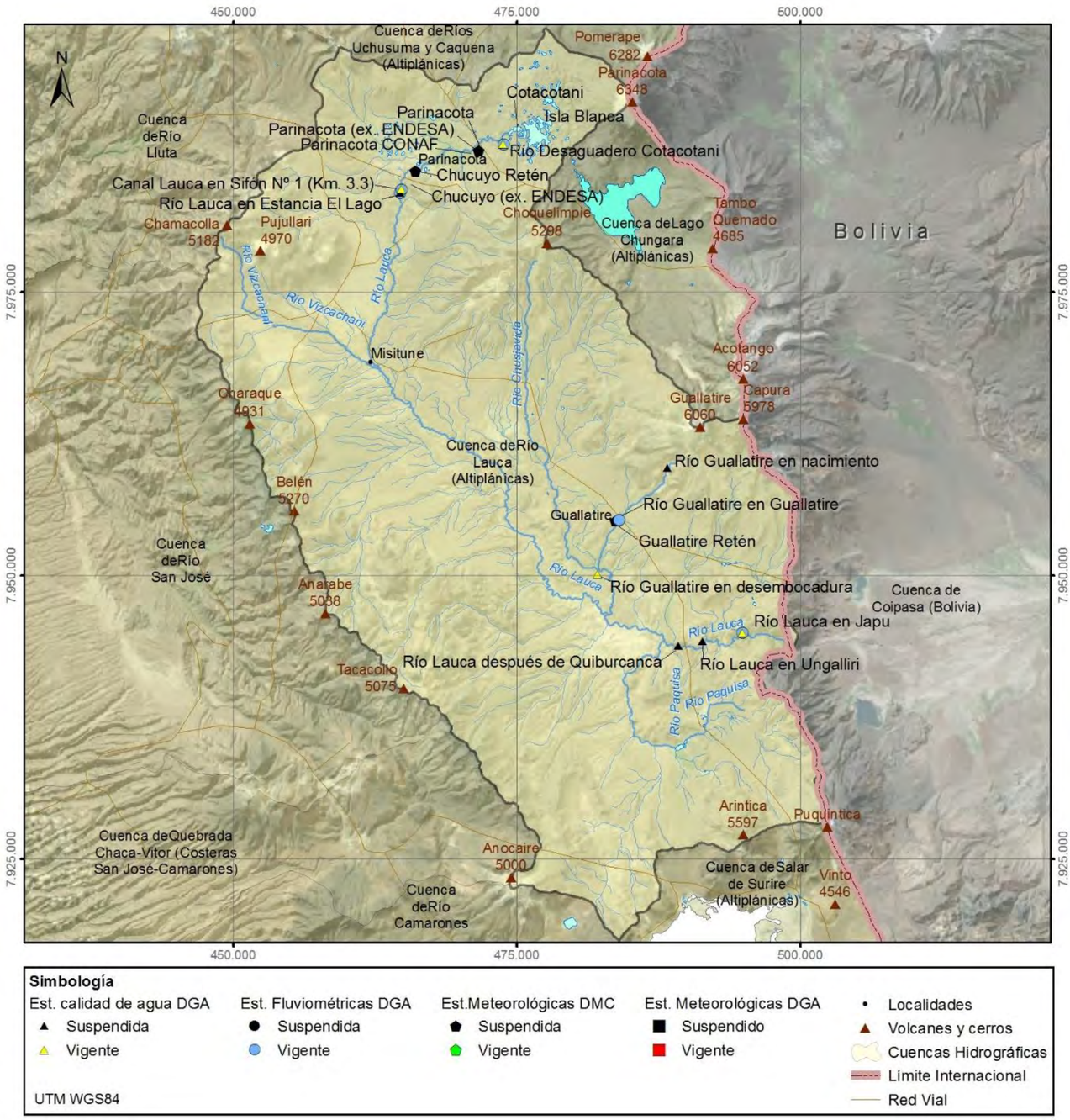


Figura 7.303 Ubicación estaciones de calidad de agua, fluviométricas y meteorológicas en la cuenca del río Lauca. Fuente: elaboración propia.

PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL Y MEDIA MENSUAL

Para el análisis de la precipitación media anual y media mensual se tomaron los registros de 30 años (periodo 1985 al 2014) de las estaciones pluviométricas existentes, que permiten analizar las variaciones de la precipitación. En la Figura 7.304 se presenta el registro de precipitación media anual en la estación Parinacota Ex Endesa (4.420 msnm) localizada cerca al desagüe de la laguna Cotacotani en dirección Oeste y la estación Guallatire (4.240 msnm) ubicada en la parte baja de la cuenca en dirección suroeste.

Se observa los años húmedos, secos y promedio que se han presentado en la cuenca. Los años más húmedos en el periodo analizado, han sido 1985, 1999, 2001, 2002, 2005, 2011 y 2012. Por el contrario los años más secos en los últimos 30 años, fueron 1989, 1995, 2009 y 2010.

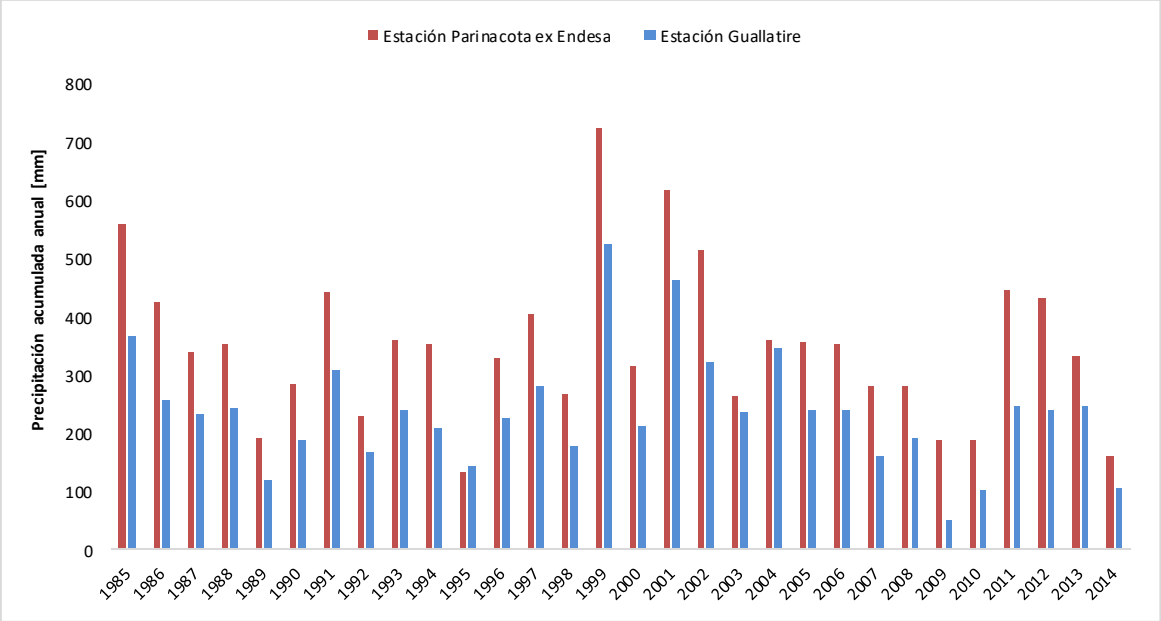


Figura 7.304 Precipitación media anual registrada en las estaciones de la cuenca del río Lauca. Fuente: elaboración propia.

A nivel regional se trazaron las isoyetas de precipitación media anual, construidas a partir de los datos registrados en 28 estaciones meteorológicas, 24 de ellas ubicadas en la XV Región de Arica y Parinacota y las 4 restantes en la I Región de Tarapacá. La información utilizada de las estaciones fue previamente completada y analizada, como

se explicó en el subcapítulo "Análisis de las variables espacial y temporal" del capítulo "Análisis Regional".

De esta manera, haciendo un zoom en la cuenca del río Lauca, las isoyetas de precipitación se presentan en la Figura 7.305. Se observa que la precipitación media anual en la cuenca es del orden de los 250 mm a los 400 mm al año, siendo esta una cuenca con altitudes elevadas (> 4.000 msnm), que registra lluvias intensas. En la Tabla 7.182 se especifica la precipitación ponderada de acuerdo al área de influencia entre isoyetas, obteniendo que la precipitación media anual en la cuenca es del orden de los 286,4 mm.

Tabla 7.182 Ponderación de la precipitación según área de influencia entre isoyetas en la cuenca del río Lauca. Fuente: elaboración propia.

Isoyetas de Precipitación (mm)		Área entre isoyetas (km^2)	Precipitación media multianual 1985-2014 (mm)
<	250	764,0	191.000
250	300	956,3	262.977
300	350	516,6	167.882
350	400	112,6	42.218
>	400	76,5	30.588
			286,4 Precipitación media anual en la cuenca

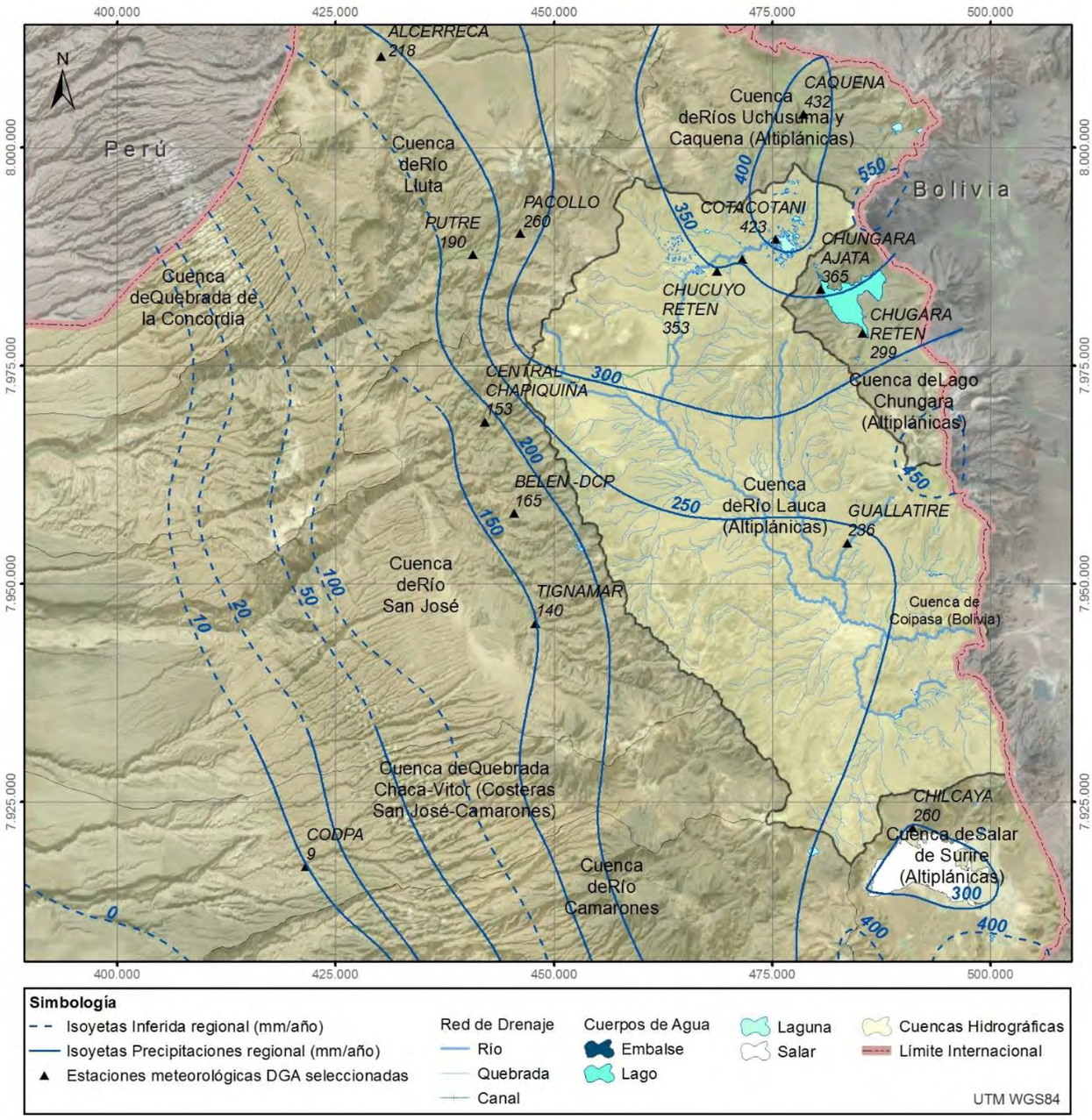


Figura 7.305 Isoyetas de precipitación media anual regional en la cuenca del río Lauca. Fuente: elaboración propia.

Por otro lado, en la Tabla 7.183 se muestra la precipitación media anual de la cuenca del río Lauca en dos periodos, un periodo lluvioso de diciembre a marzo en donde se presenta mayor al 85% de la precipitación anual y un periodo medianamente seco de abril a noviembre donde ocurren precipitaciones esporádicas. En general, en la región de Arica y Parinacota las precipitaciones se concentran en la temporada estival producto del llamado "invierno altiplánico".

Tabla 7.183 Precipitación media anual en la cuenca del río Lauca. Fuente: elaboración propia.

Estación pluviométrica DGA	PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL PERIODO 1985-2014				
	DIC-MAR		ABR-NOV		TOTAL
	Pp [mm]	Pp [%]	Pp [mm]	Pp [%]	Pp [mm]
Cotacotani	363	86%	60	14%	423
Parinacota Ex Endesa	323	92%	27	8%	350
Guallatire	211	89%	25	11%	236
Chucuyo Retén	318	90%	35	10%	353

La magnitud de la precipitación media mensual en la cuenca se presenta en la Tabla 7.184 y de manera gráfica se observa la variación temporal en la Figura 7.306. Las lluvias se concentran en los meses de diciembre, enero, febrero y marzo, del orden de los 42 mm a 134 mm. Los meses más secos son mayo, junio y septiembre, registrándose precipitaciones al mes de 0 mm a 2 mm.

Tabla 7.184 Precipitación media mensual en la cuenca del río Lauca. Fuente: elaboración propia.

Estación pluvio-métrica DGA	Altitud [msnm]	Precipitación media mensual [mm] periodo 1985-2014												
		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Pp ACUM
Cotacotani	4550	134	99	68,8	18,9	2,4	2,4	3,6	5,8	2,2	7,9	16,8	61,8	423
Parinacota Ex Endesa	4420	111	88	75,3	10,6	0,9	1,1	2,4	1,5	0,4	1,7	7,9	48,1	350
Guallatire	4240	72	67	45,8	5,7	1,0	0,6	5,5	3,7	2,1	2,1	4,7	26,6	236
Chucuyo Retén	4400	129	88	58,4	11,6	1,7	0,9	7,2	3,0	1,5	1,8	7,1	42,3	353

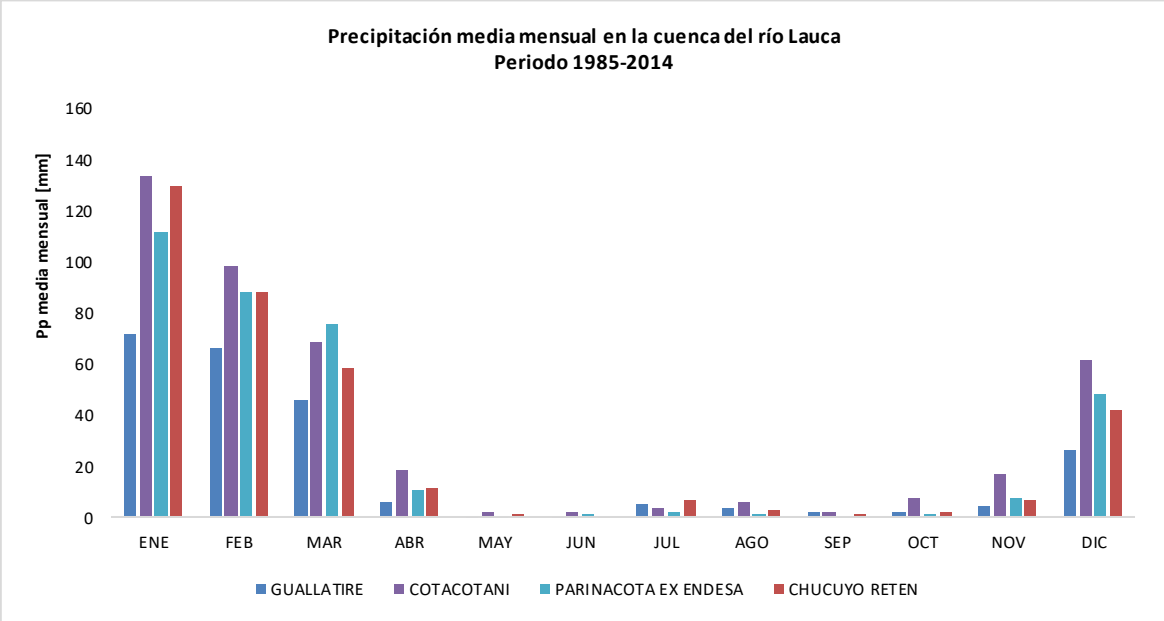


Figura 7.306 Variación mensual de la precipitación media en la cuenca del río Lauca. Fuente: elaboración propia.

EVAPORACIÓN MEDIA ANUAL Y MEDIA MENSUAL

En la cuenca, las estaciones meteorológicas Parinacota Ex Endesa y Cotacotani cuentan con registros históricos de evaporación potencial del tanque tipo A, a partir de la década de 1960 hasta el año 1996 y 1988, respectivamente. Sin embargo, la mayor parte de los registros anuales cuentan con 7 o 9 meses de información. Por consiguiente, para el análisis de la evaporación media se consideraron todas las estaciones ubicadas en las cuencas altiplánicas de la región que contarán con registros anuales superior a 9 meses. En la Tabla 7.185 se referencian las coordenadas y periodos utilizados.

Por otro lado, en el subcapítulo "Evapotranspiración" del componente "Análisis Regional", se presentan todas las estaciones meteorológicas de la XV Región de Arica y Parinacota y I Región de Tarapacá que miden evaporación potencial del tanque tipo A. Se realiza un análisis más detallado a nivel regional.

Tabla 7.185 Coordenadas y periodo de información de las estaciones con medición de evaporación tanque tipo A. Fuente: elaboración propia.

Estación Meteorológica DGA	Código BNA	DATUM WGS84 H19S		Altitud	Periodo	Años	Estado del Tanque
		UTM Este	UTM Norte				
Caquena	01001005-5	478.658	8.003.810	4.400	1981-1990	9	S
Parinacota Ex Endesa	01020017-2	471.626	7.987.205	4.420	1985-1997	12	S
Chungara Ajata	01010010-0	480.618	7.983.774	4.585	1984-2011	27	V
Cotacotani	01020014-8	475.323	7.989.490	4.500	1960-1989	29	S
Coyacagua *	01050007-9	517.429	7.782.949	3.990	1964-2006	42	V
Pampa Lirima Lagunilla *	01730018-0	515.706	7.805.083	3.940	1982-2006	24	V

V: Vigente, S: Suspendida. * Estación ubicada en la I Región de Tarapacá, datos tomados de DICTUC (2008).

En promedio las cuencas altiplánicas, podrían presentar una evaporación potencial anual acumulada entre los 1429 mm y 2216 mm, que se distribuye en distinta proporción durante los meses del año. A escala regional en relación a la cuenca, se estima una tasa de evaporación potencial media anual de 4,8 mm/d, con un rango entre 4,0 y 5,5 mm/d.

Los registros de la evaporación potencial media mensual se presenta en la Tabla 7.186 y en la Figura 7.307 se observa con claridad la variación temporal del parámetro. La mayor evaporación en las cuencas altiplánicas, entre ellas la del río Lauca, ocurre en los meses de septiembre, octubre, noviembre y diciembre. Los valores más bajos de evaporación se registran en los meses de junio y julio.

Tabla 7.186 Evaporación potencial mensual en las cuencas altiplánicas. Fuente: elaboración propia.

Estación pluviométrica DGA	Evaporación del tanque tipo A mensual [mm]												
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
Caquena	127	122	122	116	128	93	102	122	144	155	168	166	1565
Parinacota ex endesa	134	128	132	142	125	121	119	136	147	172	162	154	1672
Chungara ajata	85	86	105	124	120	106	103	115	136	154	156	140	1430
Cotacotani	129	117	129	158	161	147	153	166	183	214	213	184	1954
Coyacagua *	197	175	194	185	153	127	134	155	188	228	241	241	2218
Pampa lirima lagunilla *	182	161	187	159	141	103	105	136	168	218	224	221	2005

* Estación ubicada en la I Región de Tarapacá sobre las cuencas altiplánicas, datos tomados de DICTUC (2008).

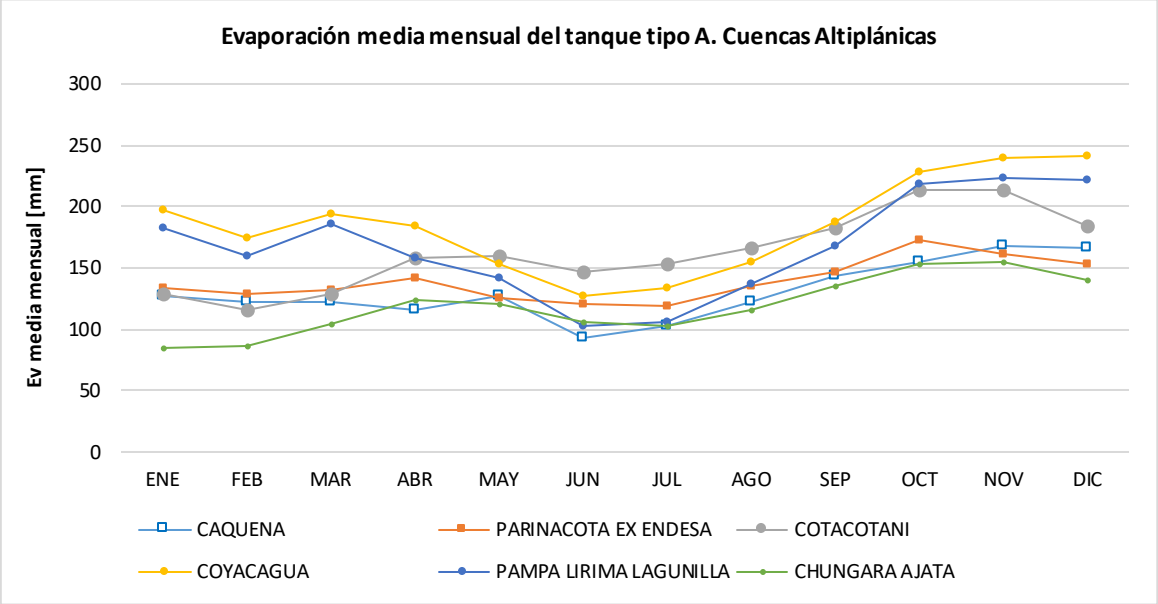


Figura 7.307 Evaporación media mensual potencial en estaciones ubicadas en cuencas altiplánicas. Fuente: elaboración propia.

EVAPOTRANSPIRACIÓN MEDIA ANUAL Y MEDIA MENSUAL

Para el análisis de la evapotranspiración en la cuenca del río Lauca, se utilizó información de cinco estaciones meteorológicas que pertenecen a la DGA ubicadas en cuencas altiplánicas. En la estimación de la evapotranspiración a nivel regional se aplicó el método de Turc, usualmente utilizado con buena aproximación en territorio Chileno. El procedimiento se explicó con mayor detalle en el subcapítulo "Evapotranspiración" del capítulo "Hidrometeorología" de la componente regional.

En la Tabla 7.187 se presentan las estaciones utilizadas en este análisis y su respectiva estimación de evapotranspiración. Como se puede apreciar, el rango de evapotranspiración media anual estimada en la cuenca está entre los 298,9 mm/año y los 371,9 mm/año, valores considerados elevados, pero factibles de ocurrir ya que la cuenca del río Lauca tiene altitudes superiores a los 4.000 msnm y el poder evaporante de la atmósfera está condicionado por factores como la presión atmosférica. Además en la cuenca existen superficies con espejo de agua, que facilitan la evaporación. Mencionar las lagunas de Cotacotani y ciénagas de Parinacota en la parte alta, la laguna Guallatire en la parte baja y los bofedales en distintos lugares de la cuenca.

Tabla 7.187 Estaciones consideradas y valor estimado de la evapotranspiración en la cuenca. Fuente: elaboración propia.

Est. Meteorológica DGA	Altitud [msnm]	Pp	T	Precipitación media anual [mm/año]	Temperatura media anual [°C]	ETP [mm/año] estimación método Turc
PARINACOTA EX ENDESA	4.420	x	x	349,8	2.5	258,8
COTACOTANI	4.550	x		423,0	2.4*	280,7
GUALLATIRE	4.240	x		236,4	4.2*	212,9
CHUCUYO RETEN	4.400	x		298,9	3.3*	267,4
CHUNGARA AJATA	4.585	x	x	364,7	4.0	278,2

* Valor estimado a partir de la relación obtenida de la temperatura y la altitud en la Región.

A nivel mensual, se adoptaron los resultados estimados en el estudio "Diagnóstico de disponibilidad hídrica en la cuenca del río Lauca, región de Arica y Parinacota" liderado por Matraz (2015). En la Tabla 7.188 se muestra la evapotranspiración media mensual estimada para la cuenca. Allí se observa que los meses con mayor evapotranspiración coinciden con los de mayor precipitación

Tabla 7.188 Evapotranspiración media mensual en la cuenca del río Lauca. Fuente: Matraz (2015).

Evapotranspiración media mensual [mm]												
Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total anual
72	68	35	8	3	3	4	5	2	4	7	26	238

Adicionalmente, a partir de la información disponible en el producto satelital MODIS 16, y siguiendo la metodología detallada en el Anexo VI, se estimó la evapotranspiración de la cuenca. MODIS 16 incluye información de evapotranspiración y flujo de calor latente real, estimado a partir de información satelital remota y utilizando como método de cálculo, para el caso de la evapotranspiración, la ecuación de Penman-Monteith. El valor medio anual estimado para la cuenca, considerando datos entre 2000 y 2014 es de 226,5 [mm/año].

7.9.1.4 Fluviometría

La cuenca del río Lauca cuenta con una red de monitoreo de cinco estaciones fluviométricas controladas por la DGA, todas con registros de caudales históricos de importancia desde la década de los 60's y 70's. Las coordenadas y periodos de información disponible se presentan en la Tabla 7.189.

Tabla 7.189 Coordenadas y periodo de información de las estaciones fluviométricas en la cuenca del río Lauca. Fuente: elaboración propia.

Estación Fluviométrica DGA	Código BNA	DATUM WGS84 H19S		Altitud [msnm]	Periodo	Años	Estado
		UTM Este	UTM Norte				
Río Desaguadero Cotacotani	01020002-4	474.004	7.988.376	4.500	1961-2014	54	V
Río Lauca En Estancia El Lago	01020003-2	464.906	7.984.059	4.370	1967-2014	48	V
Canal Lauca En Sifón N" 1 (Km. 3.3)	01020004-0	464.993	7.984.398	4.384	1959-2014	56	V
Río Lauca En Japu (O En El Limite)	01021001-1	495.076	7.945.274	3.907	1969-2014	46	V
Río Guallatire En Guallatire	01021002-K	484.224	7.955.257	4.280	1968-2014	47	V

V: Vigente

CAUDAL MEDIO ANUAL Y MEDIO MENSUAL

La escorrentía superficial media anual registrada en el rio Lauca alcanza valores de 0,15 m^3/s en la estación rio Lauca en estancia el lago, ubicada a 350 m aguas abajo del canal de transvase Lauca. Este canal conduce un caudal medio anual de 0,77 m^3/s registrado en la estación Lauca en sifón N° 1. Situación que ocurre en la zona alta de la cuenca. Una vez sigue su recorrido recibe aportes de otros afluentes. El río Guallatire reporta un caudal medio anual de 0,36 m^3/s. En la parte baja de la cuenca, el escurrimiento del río Lauca asciende a los 2,54 m^3/s.

Los registros muestran una gran estabilidad interanual con valores muy parecidos todos los años. Sin embargo, algunas series muestran la presencia de crecidas puntuales. La desviación típica sobre el promedio varía entre 0,04 y 0,64 al interior de la cuenca. En la Tabla 7.190 se muestran los demás estadísticos.

Tabla 7.190 Caudal medio anual para el año hidrológico en la cuenca del río Lauca. Fuente: elaboración propia.

Estación Fluviométrica	Altitud [msnm]	Periodo		CAUDAL MEDIO ANUAL [m^3/s]			
		1985-2014	otro [años]	Min	Max	Prom	Desv est
Rio Desaguadero Cotacotani	4.500	x		0,22	0,83	0,41	0,16
Rio Lauca En Estancia El Lago	4.370	x		0,01	0,89	0,15	0,18
Canal Lauca En Sifón N.1 (Km 3.3)	4.384	x		0,50	1,20	0,77	0,18
Rio Guallatire En Guallatire	4.280	x		0,29	0,41	0,36	0,04
Rio Lauca En Japu	3.907		26	1,52	4,17	2,54	0,64

En la Figura 7.308 se observa con mayor claridad la variación de los caudales medios mensuales y su respuesta a la precipitación media mensual en la cuenca. La magnitud del escurrimiento registrado en la estación rio Lauca en estancia el lago es menor al 10% del registrado por la estación río Lauca en Japu, sin embargo durante los meses de mayor precipitación en ambas estaciones se observan caudales mayores. Los valores del caudal medio mensual en todas las estaciones se presentan en la Tabla 7.191.

De acuerdo al análisis de la variación temporal a nivel mensual de los escurrimientos en la cuenca, durante los meses de diciembre, enero, febrero y marzo se registran los caudales medios más altos del año hidrológico, estos caudales superan la media anual. Presentándose caudales sobre el río Lauca en el mes de febrero del orden de los 6,32 m^3/s en la estación Lauca en Japu.

Tabla 7.191 Caudal medio mensual en la cuenca del río Lauca. Fuente: elaboración propia.

Estación Fluviométrica	CAUDAL MEDIO MENSUAL [m^3/s]												
	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	PROM
Rio Desaguadero Cotacotani	0,55	0,64	0,58	0,38	0,28	0,26	0,35	0,37	0,32	0,29	0,32	0,45	0,40
Rio Lauca en Estancia El Lago	0,10	0,04	0,08	0,22	0,52	0,45	0,10	0,06	0,06	0,10	0,08	0,10	0,16
Canal Lauca en Sifón N.1 (Km3.3)	0,74	0,78	0,80	0,92	0,86	0,84	0,74	0,71	0,72	0,70	0,68	0,71	0,77
Rio Guallatire en Guallatire	0,35	0,34	0,34	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,37	0,37	0,37	0,36	0,36
Rio Lauca en Japu	1,55	1,53	1,73	3,61	6,32	4,93	2,72	1,94	1,97	2,06	1,92	1,66	2,66

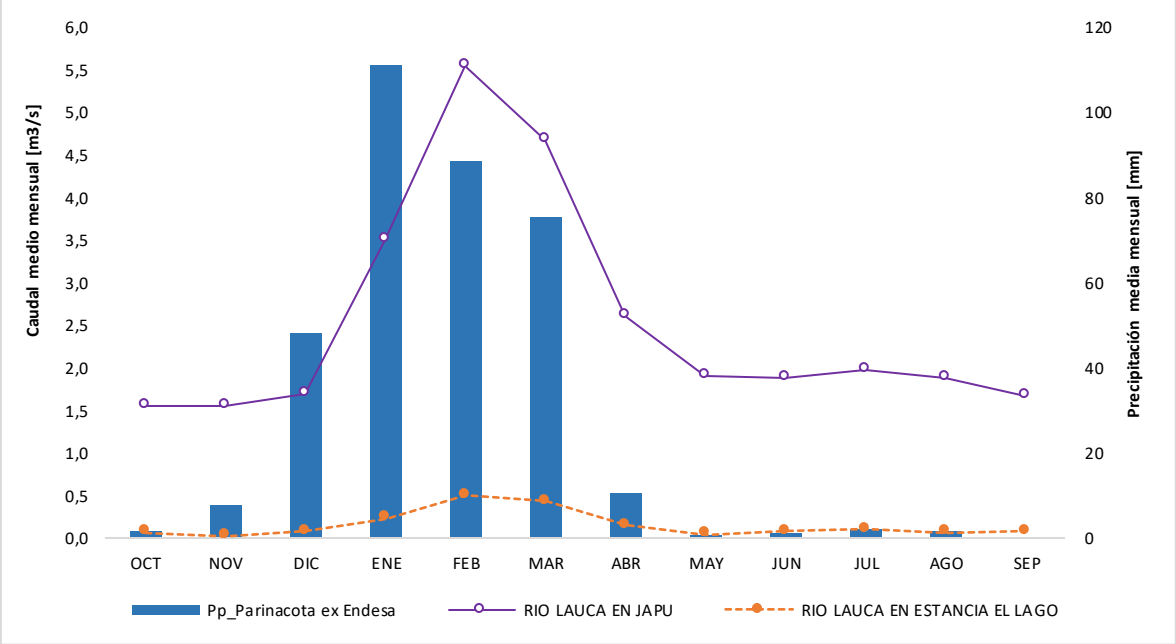


Figura 7.308 Caudal medio mensual en el río Lauca y su relación con la precipitación media. Fuente: elaboración propia.

ANÁLISIS DE FRECUENCIA DE LOS CAUDALES

Mediante el análisis de frecuencia de las series de caudales mensuales, se determinó si los años secos y los años lluviosos mantienen el mismo comportamiento que el año hidrológico medio. En el Anexo VI se detalla la metodología. Para ello se graficaron curvas de variación estacional definidas para distintas probabilidades de excedencia.

En la Tabla 7.192 y Figura 7.309, se presentan los caudales mensuales para las probabilidades de excedencia del 15% (año muy húmedo), 85% (año seco) y caudal medio. Allí se observa la distribución típica de los valores estadísticos representativos de la disponibilidad del recurso en puntos de la cuenca.

Tabla 7.192 Caudales mensuales asociados a probabilidad de excedencia. Fuente: elaboración propia.

Estación: RIO LAUCA EN ESTANCIA EL LAGO													
Pexc (%)	T (años)	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep
15	6,7	0,10	0,10	0,10	0,50	1,20	0,60	0,15	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
85	1,2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Promedio		0,07	0,02	0,07	0,23	0,50	0,43	0,15	0,04	0,07	0,10	0,07	0,08
Estación: RIO LAUCA EN JAPU													
Pexc (%)	T (años)	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep
15	6,7	1,85	1,86	2,22	6,55	11,01	9,09	3,22	2,23	2,20	2,26	2,10	1,99
85	1,2	1,28	1,24	1,31	1,64	1,85	2,02	1,56	1,54	1,63	1,70	1,64	1,38
Promedio		1,57	1,59	1,73	3,62	6,12	4,85	2,74	1,92	1,90	2,00	1,91	1,71
Estación: RIO DESAGUADERO COTACOTANI													
Pexc (%)	T (años)	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep
15	6,7	0,90	0,90	0,90	0,70	0,70	0,70	0,60	0,60	0,50	0,50	0,50	0,80
85	1,2	0,35	0,40	0,30	0,10	0,00	0,00	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,25
Promedio		0,57	0,65	0,59	0,36	0,30	0,27	0,36	0,38	0,33	0,28	0,32	0,47
Estación: RIO GUALLATIRE EN GUALLATIRE													
Pexc (%)	T (años)	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep
15	6,7	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
85	1,2	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
Promedio		0,35	0,35	0,34	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,38	0,39	0,38	0,36

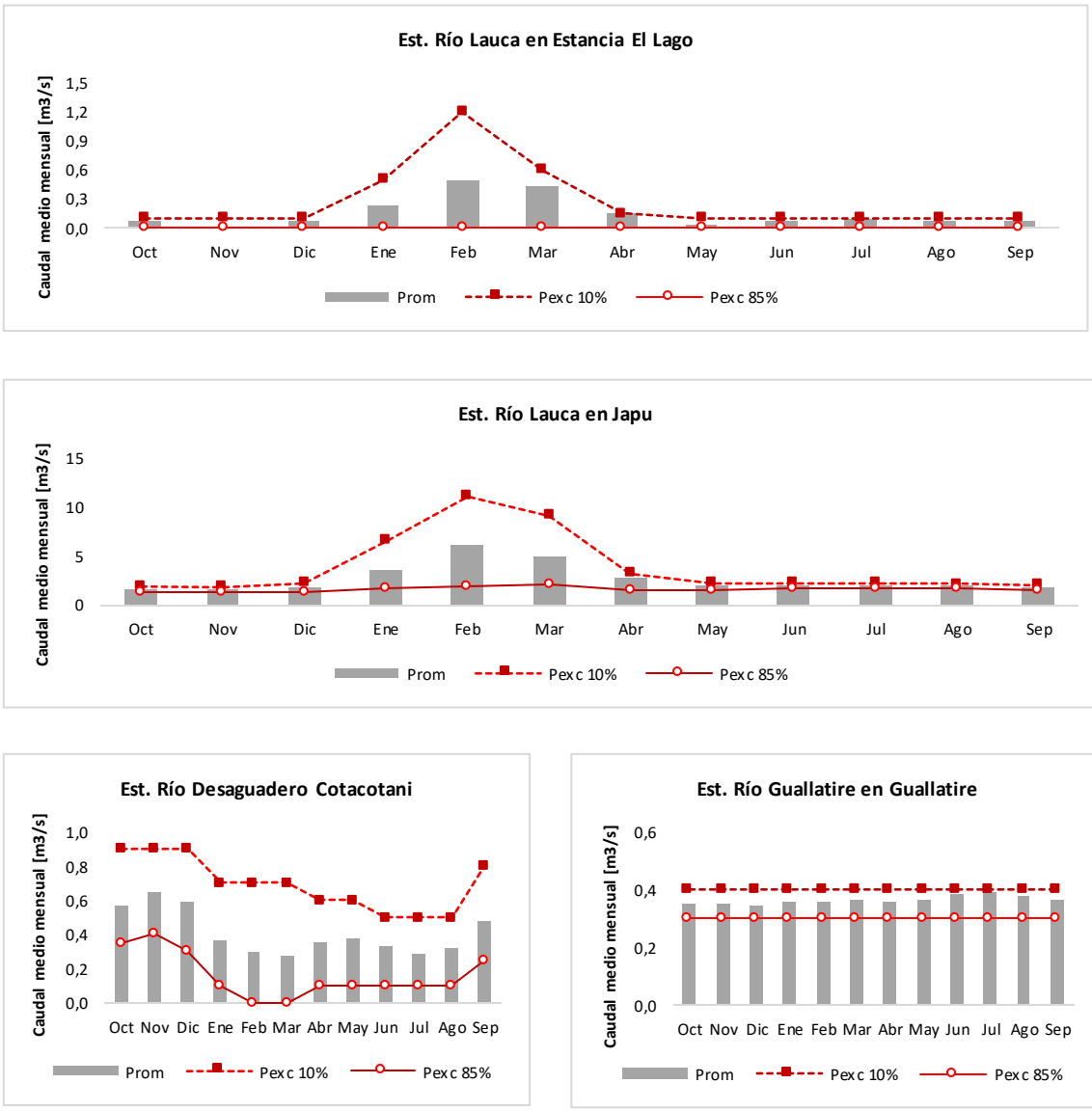


Figura 7.309 Curvas de variación estacional asociadas a probabilidad de excedencia de 15% y 85% y caudal medio mensual en las estaciones fluviométricas de la cuenca del río Lauca. Fuente: elaboración propia.

Analizando la Figura 7.309, se observa en las estaciones sobre el río Lauca que se presenta un régimen pluvial, con sus mayores caudales entre enero y marzo, producto de las lluvias altiplánicas de verano. Tanto en el año húmedo como en el año seco, los mayores caudales se presentan durante estos meses, mientras que en el resto del año se presentan caudales similares sin variaciones significativas.

En la curva de variación de la estación rio Desaguadero Cotacotani, se observa que los mayores caudales se presentan entre octubre y diciembre, producto de los deshielos,

mientras que los caudales de menor magnitud se presentan en julio y agosto durante un año húmedo (Pexc 10%), y entre febrero y marzo en un año seco (Pexc 85%). Este rio presenta un régimen nival.

Por otro lado, observando la curva de la estación río Guallatire en Guallatire, se nota que los caudales se mantienen similares durante el año. Se ve reflejado tanto en un año húmedo como seco. Esta importante regulación del escurrimiento se atribuye al desagüe constante de la Laguna Guallatire al río y a los aportes por bofedales de la zona que pudieran conectar con el río.

7.9.1.5 Levantamiento Hidrológico

En el presente estudio se realizó una campaña de terreno, en donde se seleccionaron 11 puntos de medición tanto en tributarios como en el río Lauca antes y después de recibir algún afluente. Adicionalmente, se adoptan las cuatro campañas de aforos realizadas por Matraz (2015), en la primera campaña se hizo 21 aforos, en la segunda campaña 28 aforos, en la tercera campaña 23 aforos y en la cuarta 19 aforos. Los métodos de aforo utilizados fueron el molinete, canaleta Parshall y de forma manual.

Por otra parte, existen registros históricos de aforos, los cuales se tuvieron en cuenta para caracterizar de mejor forma la hidrología de la cuenca en corrientes sin control fluviométrico por parte de la DGA. En la Tabla 7.193 se especifican las coordenadas de los puntos aforados tanto históricos como recientes y en la Figura 7.310 y Figura 7.311 se muestra su localización en la cuenca. Los resultados de las campañas hidrométricas de los puntos aforados, se presentan en la Tabla 7.194 y Tabla 7.195.

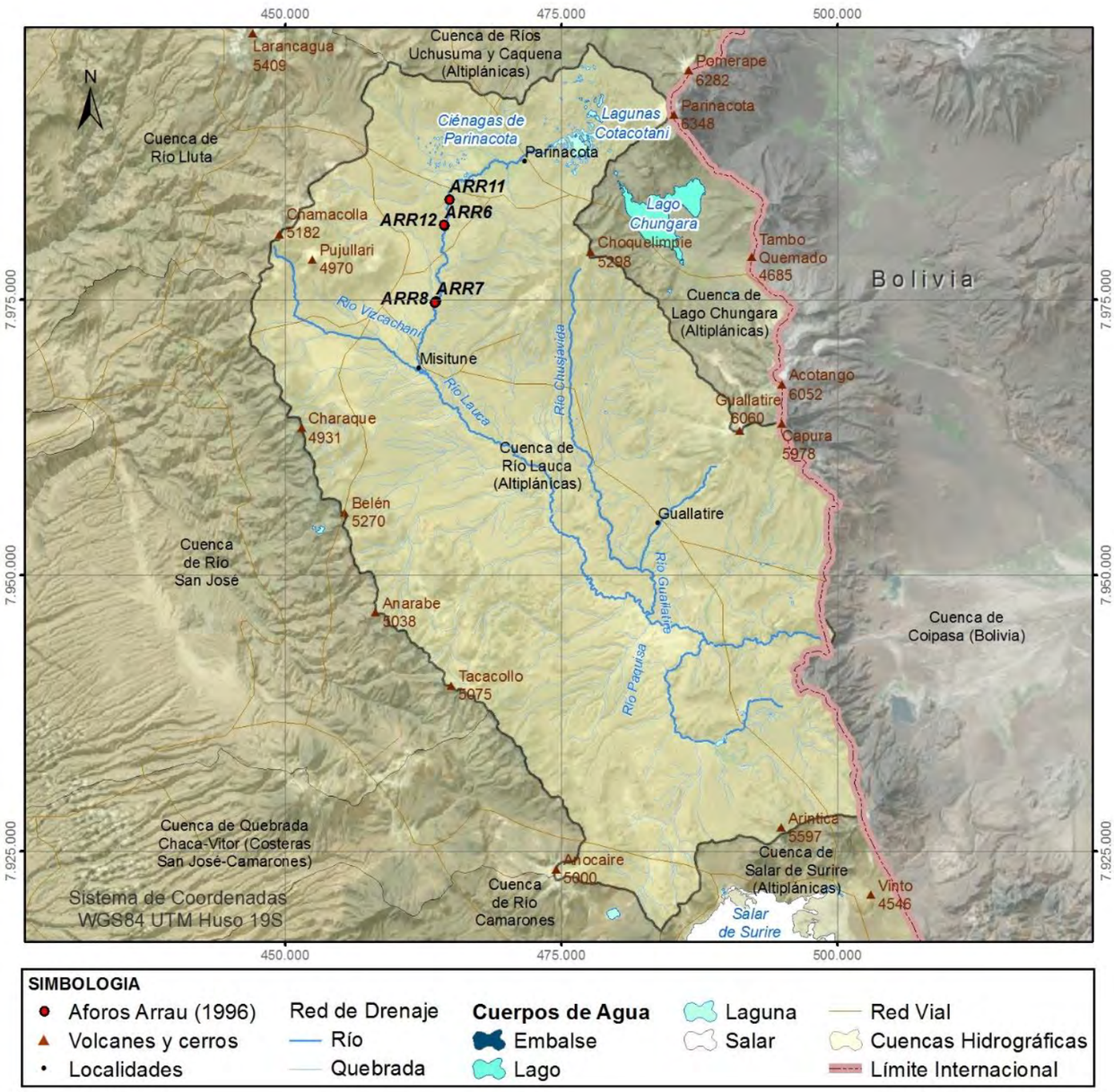


Figura 7.310 Localización de los aforos históricos en la cuenca del río Lauca. Fuente: elaboración propia.

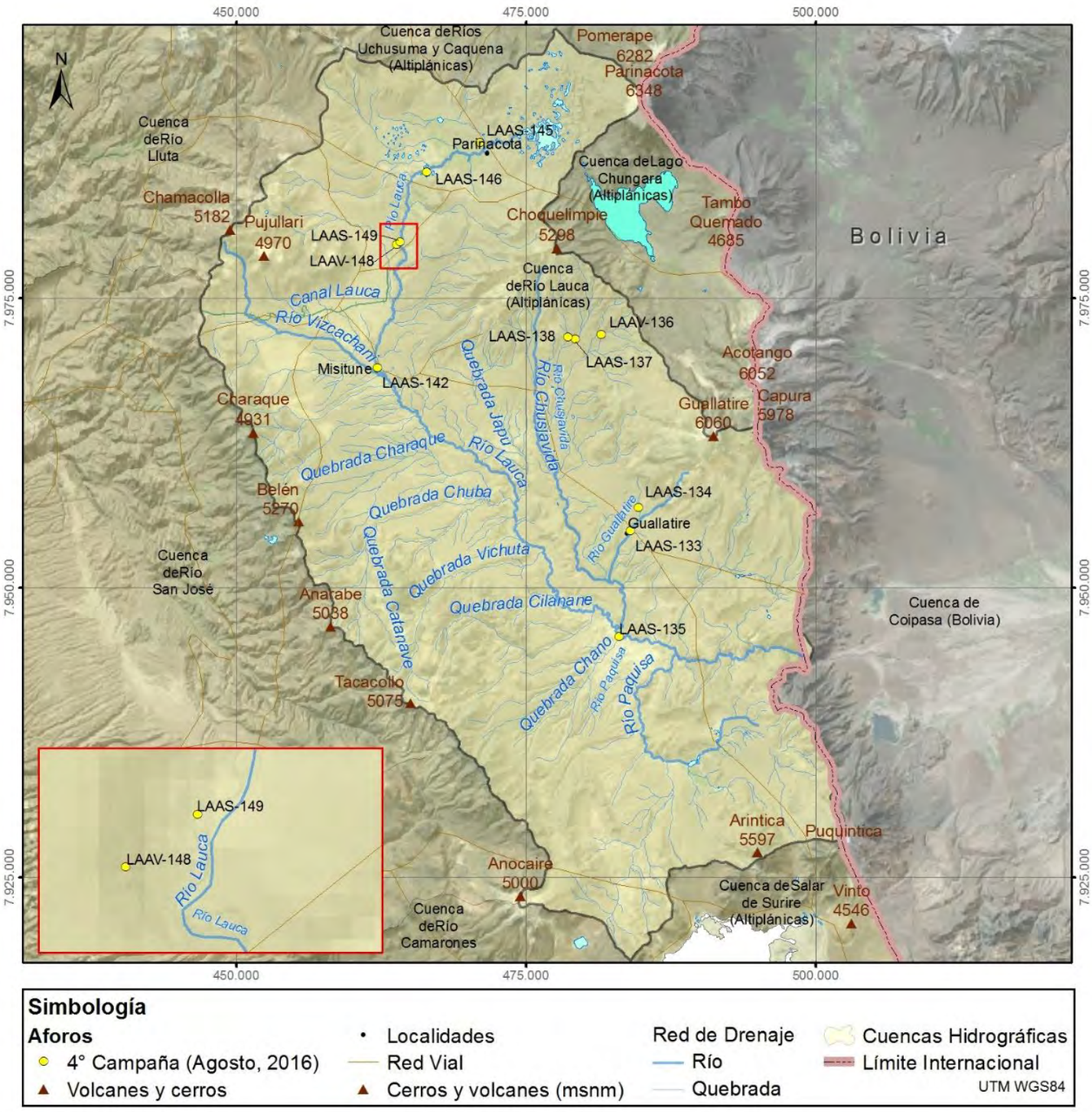


Figura 7.311 Localización de las campañas de aforo en la cuenca del río Lauca. Fuente: elaboración propia.

Tabla 7.193 Coordenadas de los puntos aforados en estudios de referencia y campaña reciente. Fuente: elaboración propia.

Sitio de Aforo	ID	DATUM WGS84 H19S		Año	Estudio de referencia
		UTM Este	UTM Norte		
R. Lauca después junta Q. Ancochalloane	ARR6	464.368	7.981.708	1996	Arrau* (1997)
R. Lauca antes Q. Vizcachani	ARR7	463.625	7.974.834		
R. Lauca después Q. Vizcachani	ARR8	463.535	7.974.693		
Canal Lauca en bocatoma	ARR11	464.809	7.984.083		
Q. Ancochalloane antes R. Lauca	ARR12	464.345	7.981.772		
Bocatoma del canal Lauca	02-AL	466..426	7.985.847	2014 - 2015	Matraz (2015)
Paso a Puertozuelo Chapiquiña (río Lauca)	03-AL	464.719	7.984.419		
Estación DGA río Lauca en estancia El Lago	04-AL	464.702	7.983.684		
río Lauca antes de confluencia con el río Vizcachane	05-AL	462.139	7.968.913		
río Vizcachane antes de confluencia con río Lauca	06-AL	462.915	7.968.159		
río Lauca después de confluencia con río Vizcachane	07-AL	463.106	7.967.758		
río Lauca después de confluencia con quebrada Pacopampa	08-AL	474.064	7.957.101		
río Lauca 4km aguas abajo del pueblo de Cruzani	09-AL	476.743	7.950.567		
Sector Ancuta, tributario del río Chunsjavida	10-AL	478.642	7.960.118		
río Guallatire en Guallatire	11-AL	484..014	7.954.865		
río Guallatire antes de confluencia con el río Chusjavida	12-AL	482.177	7.950.568		
río Chusjavida antes de confluencia con el río Guallatire	13-AL	482.037	7.950.627		
río Guallatire después de confluencia con el río Chusjavida	14-AL	482.444	7.950.590		
río Guallatire antes de confluencia con el río Lauca	15-AL	483.442	7.948.196		
río Lauca antes de confluencia con el río Guallatire	16-AL	481.564	7.948.150		
río Lauca después de confluencia con el río Guallatire	17-AL	482.991	7.945.860		
río Lauca antes de confluencia con la quebrada Culca	18-AL	494.618	7.944.828		
quebrada Culca	19-AL	494.672	7.944.966		
Cierre de la cuenca del río Lauca en sector Japu	20-AL	499.015	7.943.852		
Tributario oeste al río Guallatire	21-AL	484.025	7.954.931		
Incio perfil Baños Morales pozos MOP 6 y 8	22-AL	464.235	7.980.917		
río Lauca a 1,5km aguas abajo del pozo 8 MOP	23-AL	464.603	7.978.461		

Sitio de Aforo	ID	DATUM WGS84 H19S		Año	Estudio de referencia
		UTM Este	UTM Norte		
Pozo 8 MOP	24-AL	463.895	7.979.428		
río Lauca en granja control de Vicuña	25-AL	466.531	7.963.403		
río Lauca aguas arriba del anticlinal	26-AL	468.642	7.962.485		
río Lauca aguas abajo anticlinal	27-AL	472.951	7.959.993		
río Lauca antes de quebradas Chuba y Lliza	28-AL	473.978	7.958.428		
Tributario N-S del río Guallatire	29-AL	484.147	7.954.882		
río Chusjavida en cruce camino sector Ancuta	30-AL	477.499	7.959.984		
río Guallatire después de confluencia con el río Chusjavida	31-AL	482.381	7.950.406		
Aguas abajo del puente en río Lauca	32-AL	483.036	7.945.726		
quebrada Uncaliri en cruce de camino	33-AL	489.279	7.949.018		
quebrada Chuba en cruce de carretera	34-AL	469.630	7.957.070		
río Vizcachane en campamento experimental	35-AL	461.256	7.969.091		
quebrada Chuba después de anticlinal y antes del río Lauca	36-AL	473.874	7.957.261		
Pozo 6 MOP	37-AL	463.999	7.979.751		
río Guallatire en estación DGA	LAAS-133	484.014	7.954.857		
naciente del río Guallatire	LAAS-134	484.704	7.956.839		
río Lauca en puente sobre ruta a Surire	LAAS-135	483.039	7.945.716		
afloramiento de varias vertientes, aguas abajo termas Chiriguaya	LAAV-136	481.478	7.971.792		
estero Travieso camino a Chiriguaya	LAAS-137	479.246	7.971.380		
-	LAAS-138	478.588	7.971.550		
río Lauca en Misitune	LAAS-142	462.152	7.968.906		
-	LAAS-145	471.053	7.988.338		
-	LAAS-146	466.425	7.985.849		
sector pozo MOP	LAAV-148	463.855	7.979.564		
río Lauca	LAAS-149	464.118	7.979.759		
río Guallatire en estación DGA	LAAS-133	484.014	7.954.857		

* Las coordenadas son estimadas de acuerdo a la descripción del sitio de aforo, dado que el informe de ARRAU (1997) no indica la localización de estos puntos.

Tabla 7.194 Caudales obtenidos de las campañas de aforos en la cuenca del río Lauca. Fuente: Valores de aforos tomados de Matraz Consultores asociados (2015).

No	Sitio de Aforo	Matraz (2015)								ICASS (2016)	
		Campaña I 29 Sep -06 Oct 2014		Campaña II 18-25 Nov 2014		Campaña III 9-14 Abr 2015		Campaña IV 16-20 Jun 2015		Campaña V 12-22 Ago 2016	
		Método	Q [l/s]	Método	Q [l/s]	Método	Q [l/s]	Método	Q [l/s]	Método	Q [l/s]
1	02-AL	Canaleta	755,2	Canaleta	1176	Canaleta	817,7	Canaleta	641,3		
2	03-AL	Molinete	44,81	Molinete	27,3	Molinete	46,8				
3	04-AL	Canaleta Parshall	114,4	Canaleta Parshall	20,3			Canaleta Parshall	44,7		
4	05-AL	Molinete	507,4	Molinete	395,4	Molinete	901,8	Molinete	527,0		
5	06-AL	Molinete	45	Molinete	18,9	Molinete	119,7	Molinete	53,1		
6	07-AL	Molinete	514,4	Molinete	211,6	Molinete	837,6	Molinete	417,6		
7	08-AL	Molinete	776,1	Molinete	516,5	Molinete	1.412	Molinete	934,1		
8	09-AL	Molinete	910,7	Molinete	447,2	Molinete	1.855	Molinete	780,5		
9	10-AL	Molinete	24,62	Molinete	9,7						
10	11-AL	Canaleta Parshall	475	Canaleta Parshall	300,2	Canaleta Parshall	350	Canaleta Parshall	350		
11	12-AL	Molinete	563,3	Molinete	574						
12	13-AL	Molinete	223	Molinete	180						
13	14-AL	Molinete	814,3	Molinete	738,5						
14	15 (1)-AL	Molinete	766	Molinete	934,7	Molinete	1.565	Molinete	1.230		
15	15 (2)-AL	Molinete	195,5								
16	16-AL	Molinete	716,6	Molinete	546	Molinete	1.955	Molinete	854,1		
17	17-AL	Molinete	1.834	Molinete	1.459	Molinete	3.482	Molinete	1847		
18	18-AL	Molinete	2.592			Molinete	3.315				
19	19-AL	Molinete	126			Molinete	206,2	Molinete	139		
20	20-AL	Molinete	2.554			Molinete	3791	Molinete	2.407		
21	21-AL	Manual	117	Manual	119						
22	22-AL			Molinete	166,4						
23	23-AL			Molinete	258,3	Molinete	481,5	Molinete	361,6		
24	24-AL			Manual	29,5	Manual	23				

No	Sitio de Aforo	Matraz (2015)								ICASS (2016)	
		Campaña I 29 Sep -06 Oct 2014		Campaña II 18-25 Nov 2014		Campaña III 9-14 Abr 2015		Campaña IV 16-20 Jun 2015		Campaña V 12-22 Ago 2016	
25	25-AL			Molinete	566,5	Molinete	1.091	Molinete	714,7		
26	26-AL			Molinete	482,2						
27	27-AL			Molinete	489,3						
28	28-AL			Molinete	449,3	Molinete	1.085	Molinete	610,4		
29	29-AL			Molinete	603,1						
30	30-AL			Molinete	16,9						
31	31-AL			Molinete	705,7						
32	32-AL			Molinete	1.446						
33	33-AL					Molinete	256,2	Molinete	162,5		
34	34-AL					Molinete	106				
35	35-AL					Molinete	140,5				
36	36-AL					Molinete	140,9	Molinete	56,6		
37	37-AL					Manual	13	Manual	13,2		
38	LAAS-133									Molinete	313
39	LAAS-134									Manual	36,7
40	LAAS-135									Molinete	1.551,7
41	LAAV-136									Manual	10
42	LAAS-137									Manual	30,9
43	LAAS-138									Manual	32,4
44	LAAS-142									Molinete	650,9
45	LAAS-145									Manual	646,5
46	LAAS-146									Manual	117,3
47	LAAV-148									Manual	14,4
48	LAAS-149									Molinete	127,8

Tabla 7.195 Caudales de aforos históricos en la cuenca del río Lauca. Fuente: ARRAU (1997).

ID Sitio Aforado	Año	CAUDAL AFORADO [l/s]											
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
ARR6	1996			289		266	327						
ARR7				378		380	517						
ARR8				446		421	665						
ARR11						570	549						
ARR12						15	19						

Como se observa en las Figura 7.310 y Figura 7.311, existe similitud en la localización de algunos aforos históricos con aforos recientes realizados en la cuenca. Sin embargo, cabe mencionar que los aforos realizados sólo representan un instante específico del río. A continuación se comenta en detalle.

El punto 04-AL se ubica en el río Lauca en estancia El Lago y está aproximadamente 400 m aguas abajo del aforo histórico ARR11 (Arrau, 1997), sin embargo el aforo histórico fue en el canal Lauca en bocatoma. A nivel mensual es consecuente el mes de junio, para el año 1996 se aforó un caudal de 549 l/s y en el año 2015 el caudal fue de 44,7 l/s. A pesar de que estas mediciones representan un instante específico del río y canal, la proporción de los valores de los escurrimientos coinciden con el caudal medio mensual en junio reportado por las estaciones fluviométricas (en el subcapítulo "Fluviometría" de la cuenca del río Lauca se presentan los registros).

De acuerdo a la mayoría de los sitios aforados (Tabla 7.194), se logra observar que los aforos más altos son en la III campaña (Abr/2015), lo que permite inferir que estos escurrimientos estuvieron influenciados por las precipitaciones registradas en los meses de enero, febrero y marzo.

El caudal medio mensual más bajo de la cuenca se reporta en los meses de junio y septiembre, según las estaciones fluviométricas de la DGA. Sin embargo, en la II campaña (Nov/2014) se aforaron caudales menores a los obtenidos en la campaña I (Oct/2014) y campaña IV (Jun/2015). Situación que podría explicarse como una medición que representa un instante específico del río o quebrada y que está sujeta a varios factores que se desconocen, por lo tanto mediciones frecuentes por un periodo largo son más representativas de los escurrimientos en la cuenca.

Por otro lado, se compararon los aforos de la campaña IV, de los reportados por Matraz (Junio/2015) y los de ICASS (Ago/2016), considerado estos meses como un periodo de caudales de transición en la cuenca. Los sitios de aforos que coinciden son 37-AL y LASS-149, 05-AL y LAAS-142, 32-AL y LAAS-135, 11-AL y LAAS-133. Encontrando pequeñas diferencias en los aforos de los últimos tres sitios y una diferencia mayor en el primero, ubicado sobre el río Lauca a aproximadamente 3 km aguas arriba del Canal de transvase. Dicha derivación regula los caudales manejados en ese tramo del río.

7.9.1.6 Modelación hidrológica

Las generalidades del modelo hidrológico HEC-HMS utilizado para la modelación hidrológica de la cuenca se describen en el Anexo VI. A continuación se detalla el planteamiento concebido, información base, parámetros calibrados y resultados obtenidos del modelo.

PLANTEAMIENTO DEL MODELO

MODELO DE CUENCA

La cuenca del río Lauca se dividió en dos subcuencas sobre el mismo cauce, una de la parte alta (río Lauca en Estancia El Lago) y otra de la parta baja (río Lauca en Japu). Para relacionarlas se utilizó el ícono "junction" para cerrar la primera subcuenca y un conector "Reach" que sirve para calcular el tránsito del hidrograma a medida que circula por el cauce. En representación de las extracciones de agua superficial, incluyendo el caudal de salida del canal de transvase Lauca se utilizó el ícono "diversion" y a la salida de la cuenca se utilizó un sumidero o "Sink". Ver esquema de la cuenca en la Figura 7.312.

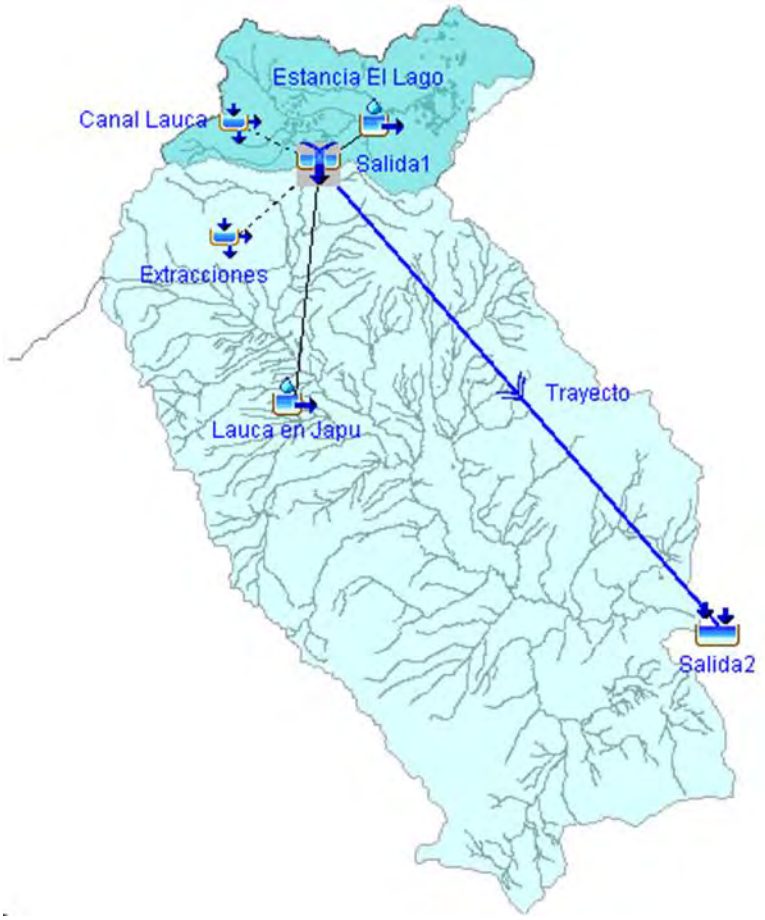


Figura 7.312 Esquema en el modelo hidrológico HEC-HMS de la cuenca del río Lauca. Fuente: elaboración propia.

MODELO METEOROLÓGICO

Las series meteorológicas utilizadas en cada subcuenca se describen a continuación:

- Precipitación diaria: los registros corresponden a las estaciones meteorológicas Cotacotani (zona alta) y Chucuyo reten (zona media-baja).
- Evaporación media mensual: los registros corresponden a la estación meteorológica Parinacota ex Endesa.

ESPECIFICACIONES DE CONTROL

El intervalo del tiempo modelado es diario, la fecha de inicio fue 01-ene-1985 y la fecha de finalización fue 31-dic-2014.

INFORMACIÓN BASE

Se requiere ingresar parámetros físicos de la cuenca definidos por el modelo continuo seleccionado, así como información antrópica que eventualmente modifica las condiciones naturales del agua en la cuenca y registros fluviométricos para la posterior calibración. Las series de tiempo utilizadas se describen a continuación:

- El tiempo de retardo se determinó para cada subcuenca como el 60% del tiempo de concentración, aplicando la ecuación de *California Highways* en base a la longitud del cauce y al delta altitudinal.
- *Caudal de extracción:* se utilizó el registro de concesiones de agua superficial de la DGA otorgadas en la cuenca, considerando que éste caudal es constante y de uso consuntivo, además de que no fuera mayor al disponible en el río.
- *Caudal diario observado*: para la calibración del modelo se utilizaron series de caudales diarios para el mismo periodo de la simulación de las estaciones Río Lauca en Estancia El Lago (zona alta) y Río Lauca en Japu (salida de la cuenca).

Dado que no se cuenta con mediciones directas de todos los parámetros físicos requeridos para representar adecuadamente el comportamiento hidrológico de la cuenca, estos fueron objeto de calibración y los escogidos finalmente fueron los que mejor representaron los caudales simulados al comparar con los observados. En la Tabla 7.220 se presentan los parámetros físicos definidos para el modelo SMA.

El análisis estadístico de dicha comparación fue basado en los resultados del coeficiente Nash-Sutcliffe, ampliamente utilizado en la calibración de modelos hidrológicos para el chequeo de la bondad de ajuste. En la subcuenca río Lauca en Estancia El Lago (zona alta) este valor fue 0,46 y a la salida de la cuenca fue de 0,4, siendo un ajuste bueno ≥0,4.

Tabla 7.196 Parámetros utilizados para el modelo SMA en la cuenca del río Lauca. Fuente: elaboración propia.

Zonas definidas en el modelo hidrológico	Parámetro	Unidad	Subcuenca río Lauca en Estancia El Lago	Subcuenca río Lauca en Japu
Intercepción vegetación	Almacenamiento inicial en vegetación	[%]	5	5
	Capacidad almacenada por intercepción de vegetación	[mm]	10	10
Acumulación en depresiones del terreno	Almacenamiento inicial en depresiones	[%]	5	5
	Capacidad almacenada en depresiones	[mm]	10	10
	Infiltración máxima	[mm/h]	6	14
Zona no saturada (Matriz de Suelo)	Almacenamiento inicial en matriz de suelo	[%]	5	5
	Capacidad almacenada en el suelo	[mm]	20	10
	Capacidad almacenada en la zona de tensión del suelo	[mm]	8	4
	Percolación máxima del suelo hacia acuífero libre	[mm/h]	4	8
Zona saturada (acuífero superficial)	Almacenamiento inicial en acuífero superficial	[%]	5	5
	Capacidad almacenada en acuífero superficial	[mm]	5	95
	Percolación máxima del acuífero superficial hacia el acuífero profundo	[mm/h]	2	3
	Coeficiente de almacenamiento del acuífero superficial	[h]	250	850
Zona saturada (acuífero profundo)	Almacenamiento inicial en acuífero profundo	[%]	5	5
	Capacidad almacenada en acuífero profundo	[mm]	10	120
	Percolación máxima del acuífero profundo	[mm/h]	2	3
	Coeficiente de almacenamiento del acuífero profundo	[h]	300	900

RESULTADOS MODELO HIDROLÓGICO

Se compararon a nivel diario los caudales observados con los caudales simulados, existiendo similitud en algunos y diferencias en otros para todo el periodo analizado. Sintetizando dicha información, se calculó el caudal medio anual en los años con más de 9 meses de información en el caso de los datos observados. Los registros incompletos presentaron en la estación Río Lauca en Japu, en el año 2001 y el periodo 2012-2014.

Los resultados del caudal observado y caudal simulado a nivel medio anual se muestran en las Figura 7.313 y Figura 7.314 para cada subcuenca respectivamente. Se observa en la subcuenca de la parte alta, que en general los caudales simulados sobreestiman en menor medida a los observados, a excepción de los años 1999, 2001, 2012-2014 que fueron subestimados. En el gráfico de la salida de la cuenca, los caudales simulados en general están subestimados en relación a los observados, existiendo fluctuaciones similares. Cabe mencionar que las diferencias obtenidas en el modelo son aceptables, considerando que la cuenca del río Lauca tiene una hidrología compleja, intervienen cuerpos de aguas importantes (bofedales, lagunas), entre ellos las Lagunas de Cotacotani, y su posible conexión subterránea con cuencas vecinas, además en el estudio de AMBAR (2000) se menciona de la existencia de afloramientos de agua subterránea en el lecho del río.

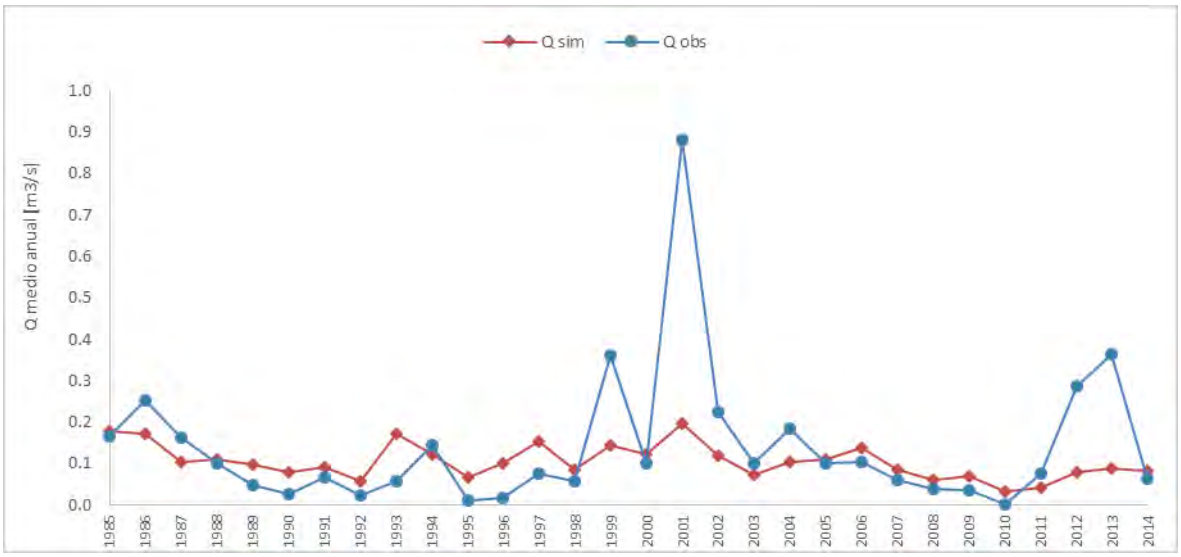


Figura 7.313 Comparación caudales medios anuales observados y simulados en la subcuenca río Lauca en Estancia el Lago. Fuente: elaboración propia.

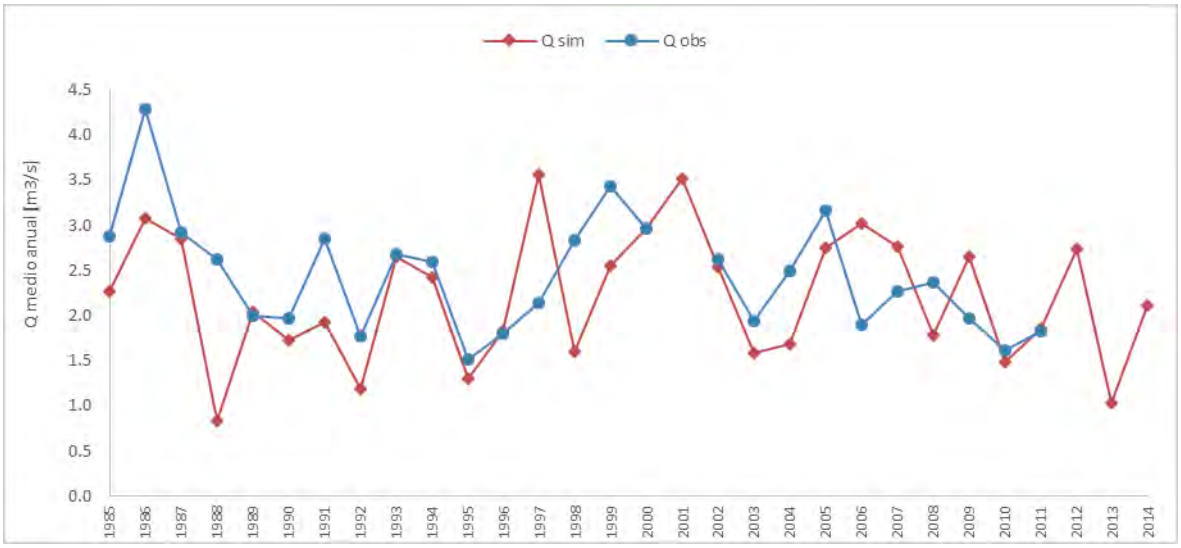


Figura 7.314 Comparación caudales medios anuales observados y simulados en la subcuenca río Lauca en Japu. Fuente: elaboración propia.

7.9.1.7 Estimación de la recarga de aguas subterráneas

Las principales recargas del acuífero en la cuenca del río Lauca, provienen de las crecidas producto de las precipitaciones durante el invierno altiplánico y de la conexión subterránea entre las Lagunas de Cotacotani y el Lago Chungara.

ANTECEDENTES

Risacher *et al.* (1999), realizó un balance hídrico en las Lagunas de Cotacotani mediante cloruros en el que a partir de la evaporación potencial, las precipitaciones, superficie del lago, concentración de cloruros en los aportes y en la laguna, estimó las pérdidas por infiltración desde la laguna. Este estudio argumenta que las pérdidas por infiltración desde las Lagunas de Cotacotani no son importantes, en relación a otras variables en la cuenca.

En relación a los aportes que recibe las Lagunas de Cotacotani, Herrera et al (2006) realizó un estudio isotópico en el que defiende una conexión entre las cuencas del río Lauca y del Lago Chungara. Según el balance de masas con $\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$, el 58% del volumen de agua que alimenta las Lagunas de Cotacotani proviene del Lago Chungara. A partir de la proporción de mezcla calculada se realizó un balance en la laguna y estimó que el caudal aportante por el lago era de 250 l/s.

Para validar los resultados antes descritos, Matraz (2015) realizó un análisis isotópico con muestras tomadas en los años 2014 y 2015, encontrando similitud entre ellas, y confirmando que se distinguen tres grupos de muestras, las de vertientes al lago, las de las Lagunas de Cotacotani y las del Lago Chungara.

En el estudio SDT N° 306 (DEP-DGA, 2010), para el caso de la cuenca del río Lauca, se menciona que los caudales de recarga del sistema acuífero superior e inferior alcanzarían un total de 425 l/s. Este valor fue estimado a partir de un balance preliminar sobre el sistema hidrogeológico que fue modelado matemáticamente.

AMBAR (2000), en el documento "ADDENDUM EIA Explotación de pozos en Parque Nacional Lauca" menciona que durante el recorrido del río Lauca en territorio chileno (60 km aprox.), éste recibe aportes tanto superficiales como subterráneos. Además, enfatiza que los afloramientos subterráneos han quedado de manifiesto en el primer tramo, mediante los aforos diferenciales en el río en las inmediaciones del sector de los pozos ubicados entre el km 4 al 12, aguas debajo de la bocatoma Canal Lauca. Los caudales medidos en el río Lauca frente a Chucullo han sido de 10 a 70 l/s, y posteriormente en aumento hacia aguas abajo.

En el mismo estudio antes citado, se analizó a grandes rasgos la relación hidrológica entre bofedales y estratos subterráneos del acuífero, a partir de la interpretación de la resistividad eléctrica de los materiales existentes bajo el humedal. En todos los casos, se detectó una delgada capa superficial de baja resistividad, asociada a tierras húmedas y vegetales, seguida por una capa de aproximadamente 30 m de espesor de resistividad alta, asociada a una capa de ignimbrita y posteriormente, se detectó un horizonte de resistividades media a bajas, asociadas a material de gravas, bolones y arenas. Esta última es característica del contenido de aguas subterráneas. Sin embargo, se concluyó que al detectar primero la capa ignimbritas, ésta agua subterránea no tendría conexión directa con el agua superficial en los bofedales.

ANÁLISIS DE LA RECARGA: RELACIÓN PRECIPITACIÓN - ESCORRENTÍA

Para la estimación de la recarga media anual, se implementó una metodología regional ampliamente desarrollada para las cuencas altiplánicas y precordilleranas de vertiente pacífica, como referencia principal se contó con el estudio SDT n° 317 liderado por DEP-DGA (2011). Adicionalmente, para distribuir la recarga a nivel mensual, en este

proyecto se plantea una metodología simplificada basada en los procesos hidrológicos que predominan en la región. Los detalles del procedimiento realizado en las cuencas de la región de Arica y Parinacota se presenta en el anexo VI.

Con relación a la cuenca del río Lauca, en la Tabla 7.166 se presenta la información base utilizada. Cabe mencionar que el cálculo de la precipitación media anual se realizó utilizando el método de las isoyetas, descrito en el capítulo "Hidrometeorología" del Análisis Regional y para el caudal medio anual se contó con la información de la estación fluviométrica río Lauca en Japu.

Tabla 7.197 Información base utilizada de cada subcuenca del río Lauca. Fuente: elaboración propia.

Subcuencas	Coord UTM N del Centroide	Altitud media [msnm]	Área [km^2]	Pp media anual [mm/año]	Pp media anual [l/s]	Q medio anual [l/s]
Río Lauca	7.959.061	5.098	2.413	286	21.914	2.540

Para la estimación de la recarga neta, se estableció una relación entre el promedio de los caudales mínimos decadales (meses de junio, julio y agosto) y los caudales medios observados, y lo mismo pero con los caudales calculados. Lo anterior se adoptó siguiendo las hipótesis y conceptos hidrológicos del estudio SIT N° 317, a continuación se describen:

- Los flujos subterráneos son despreciables y los caudales superficiales controlados a la salida de la cuenca representan la escorrentía total.
- Se entenderá como "recarga neta de la cuenca", aquella parte de la escorrentía total de salida de una cuenca, compuesta por el agua que ha infiltrado al menos una vez y que ha transitado subterráneamente en algún momento, tal que su permanencia dentro de la cuenca es superior a la de un año hidrológico.
- Esta recarga neta o caudal base interanual de salida de la cuenca puede ser estimada, como el promedio de los mínimos decadales observados entre los meses de junio, julio y agosto. Existe consenso en interpretar las series hidrológicas del norte de Chile, bajo la perspectiva de ciclos hidrológicos decadales, a partir de los cual es razonable estimar el flujo base como el promedio de los 4 mínimos decadales observados históricamente.

De acuerdo a las correlaciones obtenidas, es factible asumir que la recarga neta en las cuencas altiplánicas de la XV Región, corresponde entre el 43% y el 46% de la

escorrentía total. En la Tabla 7.198 se muestran los valores de la estimación de la recarga neta.

Tabla 7.198 Caudales considerados en la correlación y estimación de la recarga neta. Fuente: elaboración propia.

Subcuencas	Q obs [l/s]	Q cal [l/s]	Q min decadal prom [l/s]	Recarga neta [l/s] (40% - Estudio SDT 137)	Recarga neta [l/s] (43% - Propuesto Actual)
Río Lauca	2.540	3.283	1.433	1.016	1.092

SÍNTESIS DE LA ESTIMACIÓN DE LAS PRINCIPALES RECARGAS

Una vez revisados los antecedentes de la subcuenca del río Caquena, relacionados con la estimación de la recarga y de analizar conceptualmente las componentes que condicionan el tránsito del agua hasta llegar al acuífero, fue adoptada la metodología regional propuesta por el estudio SIT N° 317.

Cabe mencionar que el valor obtenido de la recarga media anual en la subcuenca, es un referente que consideró varias hipótesis y simplificaciones. Sin duda la principal limitante en el análisis es la cantidad de información disponible, alguna de esta desconocida y/o no controlada. En la Tabla 7.199 se presenta de manera resumida las principales fuentes de recarga, el método utilizado y los valores estimados a nivel anual. Seguidamente en la Tabla 7.200 se presenta la distribución de la recarga estimada a nivel mensual, concentrándose esta en los meses con mayor registro precipitación, de enero a marzo.

Tabla 7.199 Síntesis de las principales estimaciones de recarga al acuífero en la cuenca del río Lauca. Fuente: elaboración propia.

Principales fuentes de recarga al acuífero	Método	Valor estimado anual [l/s] Río Caquena en Vertedero
Percolación de la PRECIPITACIÓN que a su vez contribuye a la escorrentía	Relación precipitación-escorrentía. Metodología adoptada del estudio SIT N° 317- DEP-DGA (2011)	1.029
Recarga neta anual del FLUJO BASE en el río Lauca		

Tabla 7.200 Valores de la recarga media mensual estimada en la cuenca del río Lauca. Fuente: elaboración propia.

Subcuencas	Distribución mensual de la recarga estimada [l/s]											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Río Caquena	495	374	224	0	0	0	0	0	0	0	0	0

7.9.2 Marco geológico

La cuenca del río Lauca es una depresión intramontana en la Cordillera Occidental, que constituye parte del altiplano.

GEOLOGÍA

Las rocas presentes en esta cuenca son del periodo Oligoceno-Holoceno y pertenecen a la Formación Lupica (OMl), que aflora principalmente en el borde oeste de la cuenca, en el anticlinal de Belén. La Formación Chucal (Mimc) y la Formación Macusa (Mmsm) afloran en el sector sur de la cuenca, cerca del cerro Chucal. La Formación Lauca (PlPl) se encuentra rellenando toda la cuenca y tiene una gran extensión areal, mientras que la Ignimbrita Lauca (Pll) se ubica discontinuamente en el sector. Un pequeño intrusivo del Mioceno Medio (Mmi) aflora al sur de la quebrada Culca, en el sector sur de la cuenca. Las rocas volcánicas cenozoicas (Miv, Mmv, Msv, Plv, Pv y Hv) afloran a lo largo de toda la cuenca conformando el relieve de la misma, y cuyos flancos son cubiertos por depósitos glaciares (Qg). La localidad de Parinacota está emplazada sobre depósitos de avalancha de detritos del Holoceno (Hv(c)).

En la quebrada de río Lauca, al este de Guallatire se emplazan depósitos de remoción en masa (PlQr). Los depósitos coluviales (Qc) se hacen presentes con un pequeño depósito en lo alto de la quebrada Charaque, en el extremo oeste de la cuenca, a la altura de Guallatire. Los depósitos aluviales (Pa, Ha) se disponen en las quebradas de la cuenca, junto con los depósitos fluviales (Plf, Pf, Hf) y los depósitos palustres (Hp), y como mantos en las laderas del volcán Guallatire.

TECTÓNICA Y ESTRUCTURA

La tercera etapa tectónica (Oligoceno-Holoceno) que conforma el relieve actual se evidencia en la cuenca del río Lauca con las estructuras presentes, principalmente de edad miocena-holocena. En el área de Churiguaya, las rocas de la Formación Lupica

forman un pliegue amplio, el anticlinal Churiguaya, el cual es de crecimiento y de edad miocena. Presenta un rumbo norte-sur y es ligeramente vergente al este. Al norte de Churiguaya, en el cordón del cerro Guane-Guane, la parte media de la Formación Lupica forma un monoclinal regional de manteo 25°W. Al sur de Churiguaya, en el área de Paquisa, la parte inferior de la Formación Lupica forma otro monoclinal, manteando 30°E, de edad miocena inferior.

Al este, el Anticlinal Chucal presenta un rumbo N5- 30W y longitud de onda media de 5 km. Es un pliegue asimétrico de crecimiento, cuyo plegamiento fue progresivo y continuo durante el Mioceno. Al este del Anticlinal Chucal se exponen un par anticlinal-sinclinal, buzante al norte y de vergencia al oeste. Al oeste, el Anticlinal Chucal está cortado por la Falla Jaropilla, cuya actividad es principalmente miocena inferior media. Aflora restringidamente por 3 km, con un rumbo noroeste y manteo de 40 a 50°W y pone en contacto las capas de la Formación Lupica inferior sobre las capas de la Formación Chucal, lo que implica un desplazamiento relativamente importante.

VOLCÁN PARINACOTA

El volcán Parinacota corresponde a un estratovolcán cónico emplazado en la frontera con Bolivia. El edificio ancestral del volcán Parinacota, formado en el Pleistoceno Superior (Parinacota II) colapsó y generó un notable depósito de avalancha hacia el oeste. Este depósito se emplazó en la parte nororiental de la cuenca del río Lauca, cubrió un área de más de 140 km^2, y se extendió por más de 23 km desde su origen. El depósito de avalancha embalsó el río Coillacota, generó el lago Chungara y habría formado las lagunas de Cotacotani, las que han sido interpretadas como estructuras de 'kettle-hole' dejadas por el hielo involucrado en el colapso e incorporado al depósito de avalancha.

Poco después de la Avalancha Volcánica Parinacota, comenzó a construirse el nuevo edificio del volcán Parinacota, con forma de cono casi perfecto (unidad Parinacota III), el cual está formado por una alternancia de lavas, de composición predominantemente andesítica, depósitos de flujo piroclástico y, subordinados, depósitos de caída, ambos de composición bimodal, andesítica y dacítica.

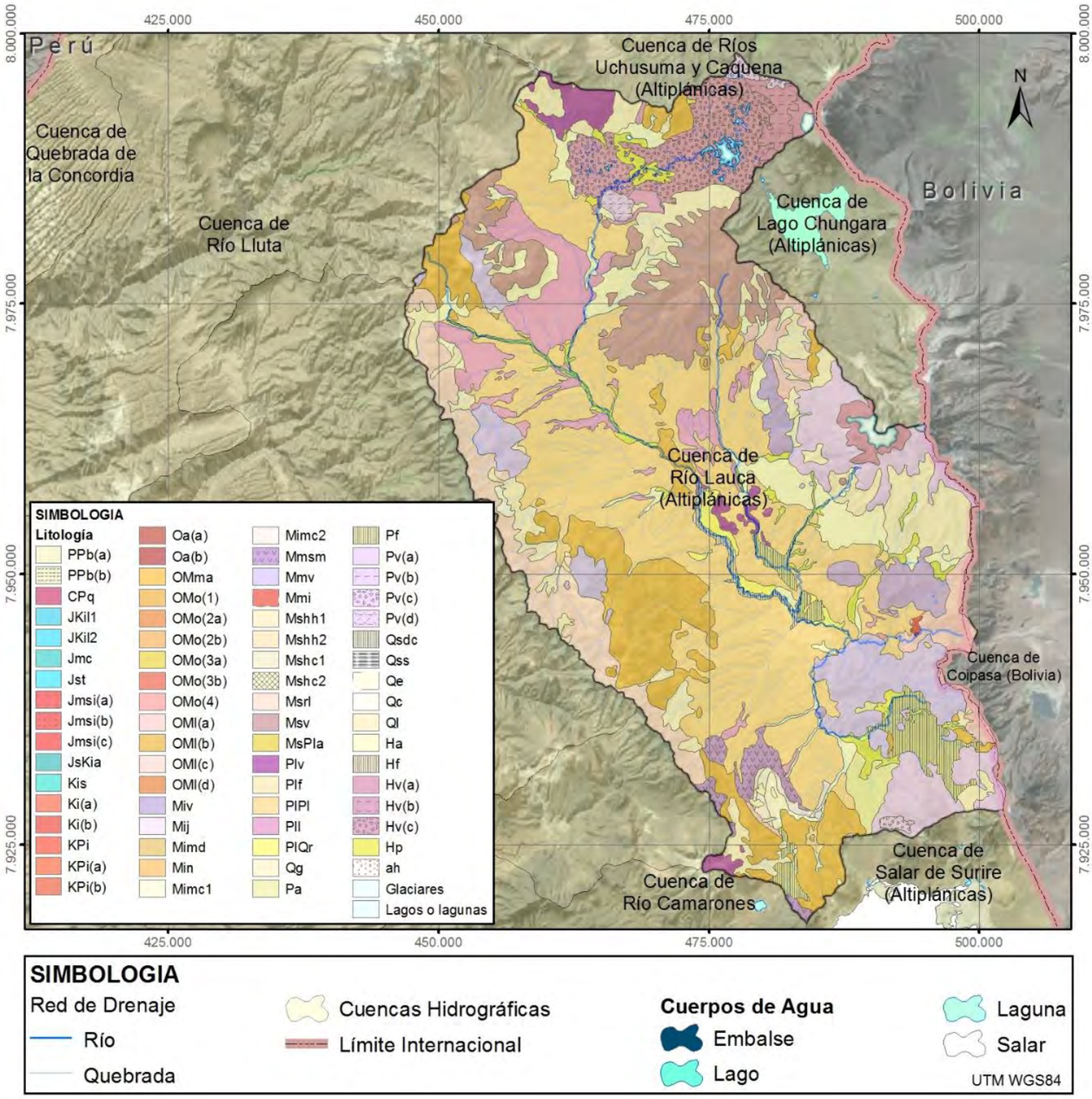


Figura 7.315 Mapa geológico de la cuenca del río Lauca. Fuente: modificado de García *et al.* (2004).

7.9.3 Caracterización Hidrogeológica

7.9.3.1 Estudios existentes

Desde un punto de vista hidrogeológico la cuenca del río Lauca ha sido estudiada desde la década de los años 60 por la posibilidad de desviar agua desde las lagunas de Cotacotani o del río Lauca hacia la cuenca del río San José (Azapa). Numerosos estudios analizaron la hidrogeología del sector norte de la cuenca, pero sólo el informe de Matraz (2015) ha elaborado un modelo hidrogeológico de la cuenca completa.

En los informes Niemeyer (1964) y Karzulovic (1981) se proponen alternativas de captaciones en el lago Chungara, en las lagunas de Cotacotani y en el río Lauca con el objetivo de transferir aguas a la cuenca del río San José. En ambos informes consideran que existe una conexión hidráulica entre el lago Chungara y las lagunas de Cotacotani. Por otro lado, Karzulovic (1981) consideró que las unidades hidrogeológicas de mayor importancia son los depósitos lacustres y las lavas andesíticas de bloques o con fracturas abiertas, las unidades con importancia hidrogeológica moderada son los domos andesíticos y las arenas y gravas ubicadas en las vegas y bofedales, y las unidades de baja importancia son la ignimbrita y las lavas andesíticas y dacíticas del volcán Ajoya, y determina que las lagunas Cotacotani reciben un importante aporte de flujos subterráneos desde el volcán Parinacota.

Posteriormente, AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (1994b) propusieron los caudales de explotación de recursos subterráneos en 10 pozos de propiedad de la Dirección de Riego que la empresa Captagua Ingeniería terminó de construir en el año 1993, cuyo objetivo fue extraer agua para alimentar el Canal Lauca-Azapa. En la Tabla 7.201 se describen las características de los pozos y las pruebas de bombeo efectuadas en la campaña de 1994. De los 10 pozos construidos 7 de ellos dieron resultados positivos y ofrecieron en conjunto un caudal de explotación de 341,6 l/s. AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (1994b) estimó una transmisividad que varía entre 335 a 70 m^2/día a partir de las pruebas de gasto constante realizadas durante los años 1992 y 1993. No consideró las pruebas de gasto variable, justificando que este tipo de pruebas subestiman los valores de transmisividad, ya que depende de la eficiencia del pozo. Por otro lado, estableció un valor de coeficiente de almacenamiento de 3%, teniendo en cuenta sólo la estratigrafía de cada sondaje.

Tabla 7.201 Características de los pozos y de las pruebas realizadas en la campaña 1992-93. Fuente: Ayala y Cabrera (1994).

Pozo	Prueba bombeo	Fecha prueba	Caudal máximo (l/s)	NE (m)	ND (m)	Profundidad perforación (m)	Profundidad habilitación (m)
4	Gasto Variable	04-11-1992	40	0,79	35,43	125	118
	Gasto Constante	05-11-1992	35	0,86	35,56		
	Gasto Variable	07-11-1992	45	0,83	51,31		
5	Gasto Variable	17-12-1992	46	surgente	62,13	121	120
	Gasto Constante	18-12-1992	45	surgente	62,2		
	Gasto Variable	28-12-1992	50	surgente	83,1		
6	Gasto Variable	25-02-1993	50	surgente	67,68	117	117
	Gasto Constante	28-02-1993	40	surgente	39,11		
7	Gasto Variable	10-11-1992	60	2,67	20,26	125	86
	Gasto Constante	11-11-1992	55	4,42	22,58		
	Gasto Variable	11-12-1993	70	5,36	30,21		
	Gasto Variable	16-02-1993	60	3,5	50,27		
	Gasto Constante	18-02-1993	60	4,24	51,48		
	Gasto Constante	19-02-1993	55	4,37	52,18		
8	Gasto Variable	14-01-1993	50 (55)	surgente	12,48 (15,6)	120	120
	Gasto Variable	15-01-1993	55	surgente	15,44		
	Gasto Variable	19-01-1993	70 (80)	surgente	37,2 (51,1)		
	Gasto Constante	21-01-1993	70	surgente	40,28		
9	Gasto Variable	07-02-1993	70	surgente	72,24	121	118
	Gasto Constante	09-02-1993	60	surgente	60,24		
10	Gasto Variable	03-03-1993	15	1,8	59,69	120	83
	Gasto Constante	04-03-1993	7	2,3	39,45		

En el año 1996 se publicaron varios estudios de la cuenca del río Lauca, entre los que se encuentra AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (1996). En este informe se citaron las conclusiones obtenidas de la prospección geofísica desarrollada en el sector Ancochalloani y en río Blanco por la empresa Geoexploraciones S.A. en agosto de 1992. Además, se presentó la columna estratigráfica y el perfil de habilitación de cada pozo. En el mismo año 1996, la Dirección de Riego realizó pruebas de bombeo de gasto variable, gasto constante y de recuperación en los pozos n°4, 5, 6, 7, 8, 9 y 10. También es este año, en el estudio de ARA y AMBAR (1996) se interpretaron los datos obtenidos en ambas campañas de bombeo ejecutadas en los pozos n° 5, 6, 7, 8 y 9, resultando valores de caudales específicos que oscilan entre 0,7 y 2,1 l/s/m y una transmisividad que varía entre 65 y 800 m^2/día. Además, en este estudio se calculó el coeficiente de almacenamiento mediante la fórmula de Jacob con los datos de la prueba de bombeo efectuada en el pozo n° 7 y como pozo de observación los datos registrados en el pozo n° 10, obteniendo un coeficiente de almacenamiento de 0,0012, pero que finalmente consideró un valor de 0,01.

Posteriormente, en el estudio de AMBAR y Álamos y Peralta (2000) se describieron 3 unidades hidrogeológicas a partir de la estratigrafía de los sondajes y de la prospección geofísica: un acuífero libre que tiene una potencia de 15-30 m, el nivel freático se encuentra a 1-7 m de profundidad y las aguas fluyen hacia el centro de la cuenca alimentando al río Lauca y los bofedales; una unidad hidrogeológica confinante de 20-30 m de espesor y en la cual los flujos de agua subterránea fluyen hacia el centro de la cuenca y verticalmente, alimentando a la unidad hidrogeológica superior; y un acuífero inferior semiconfinado que presenta una potencia comprendida entre 40 y 120 m y cuyo flujo subterráneo se da principalmente en dirección norte-sur y secundariamente alimenta a las unidades superiores. En la Tabla 7.202 se describen las características de las pruebas de bombeo e interpretación de las diferentes pruebas de bombeo realizadas en los sondajes del año 1996.

Tabla 7.202 Características de las pruebas realizadas en la campaña 1992-93. Fuente: AMBAR y Álamo y Peralta (2000). P.G.V.: prueba de bombeo de gasto variable. P. G. Cte: prueba de bombeo de gasto constante.

Pozo	Fechas		Caudales (l/s)		Duración (min)	Nivel inicial (m)	Depresión Final (m)	Ejecutó
	P.G.V.	P.G.Cte	P.G.V.	P.G.Cte				
5	09-01-1996		10,20,30,35		90-90-90-90	Surg. (0,42 l/s)	6,38-19,49-35,89-46,62	Dirección de Riego
		10-01-1996		28	660		34,89	
		12-01-1996		28	1800		36,45	
	21-02-1996		20,30,40,50,55		360-360-360-360-15	Surg. (0,43 l/s)	24,89-41,72-60,54-80,49-84,33	CPA
		22-02-1996		45	2020		73,3	
		03-03-1996		40	4320		64,87	
6	29-01-1996		10-20-30-40		60-60-90-90	Surg. (8,14 l/s)	0,64-7,48,16,27-32,5	Dirección de Riego
		30-01-1996		35	1740		25,28	
	09-04-1996		20-30-40-50		360-360-360-360		10,47-19,22-33,93-57,08	CPA
		11-04-1996		40	4440	Surg. (8,14 l/s)	35,46	
7	27-03-1996		40-50		360-60	4,03	No registradas	CPA
	28-03-1996		40-50-60-70		360-360-300-300	4,03	19,85-30,77-42,45-56,08	
		21-04-1996		56	28-11-1911	4,3	52,33	
8	18-04-1996		40-50-60-70		360-360-360-360	Surgente (21 l/s)	11,17.17,67-25,29-33,35	CPA
		21-04-1996		60	29-10-1911		25,14	
9	11-03-1996		40-50-60-65		360-360-360-360	Surg. (5,2 l/s)	36,43-42,81-54,36-63,13	CPA
		12-03-1996		60	08-11-1909		57,41	

Por último, Matraz (2015) realizó una caracterización hidrogeológica de la cuenca completa en el que evaluaron mediante prospección geofísica la posible conexión hidráulica de ésta con la cuenca del lago Chungara y la cuenca del Salar de Surire. En la Figura 7.316 se muestra la ubicación de los perfiles hidrogeológicos desarrollados dentro de la cuenca y en la Figura 7.317 se presentan los perfiles hidrogeológicos paralelos al río Lauca elaborados por Matraz (2015). En estos perfiles hidrogeológicos se identifica un acuífero superior libre y un acuífero confinado o semiconfinado por la ignimbrita Lauca en el sector de Parinacota-Cotacotani. El acuífero superior sólo existe en el sector norte de la cuenca, aflorando la unidad confinante hasta el sector central de la cuenca donde se encuentra el anticlinal de Queñuacollo, el cual se comporta como una barrera impermeable. Aguas abajo del anticlinal las aguas del acuífero libre fluyen hacia tierras bolivianas. La unidad con mayor importancia hidrogeológica está constituida por la Formación Lauca y la Formación Lupica (d).

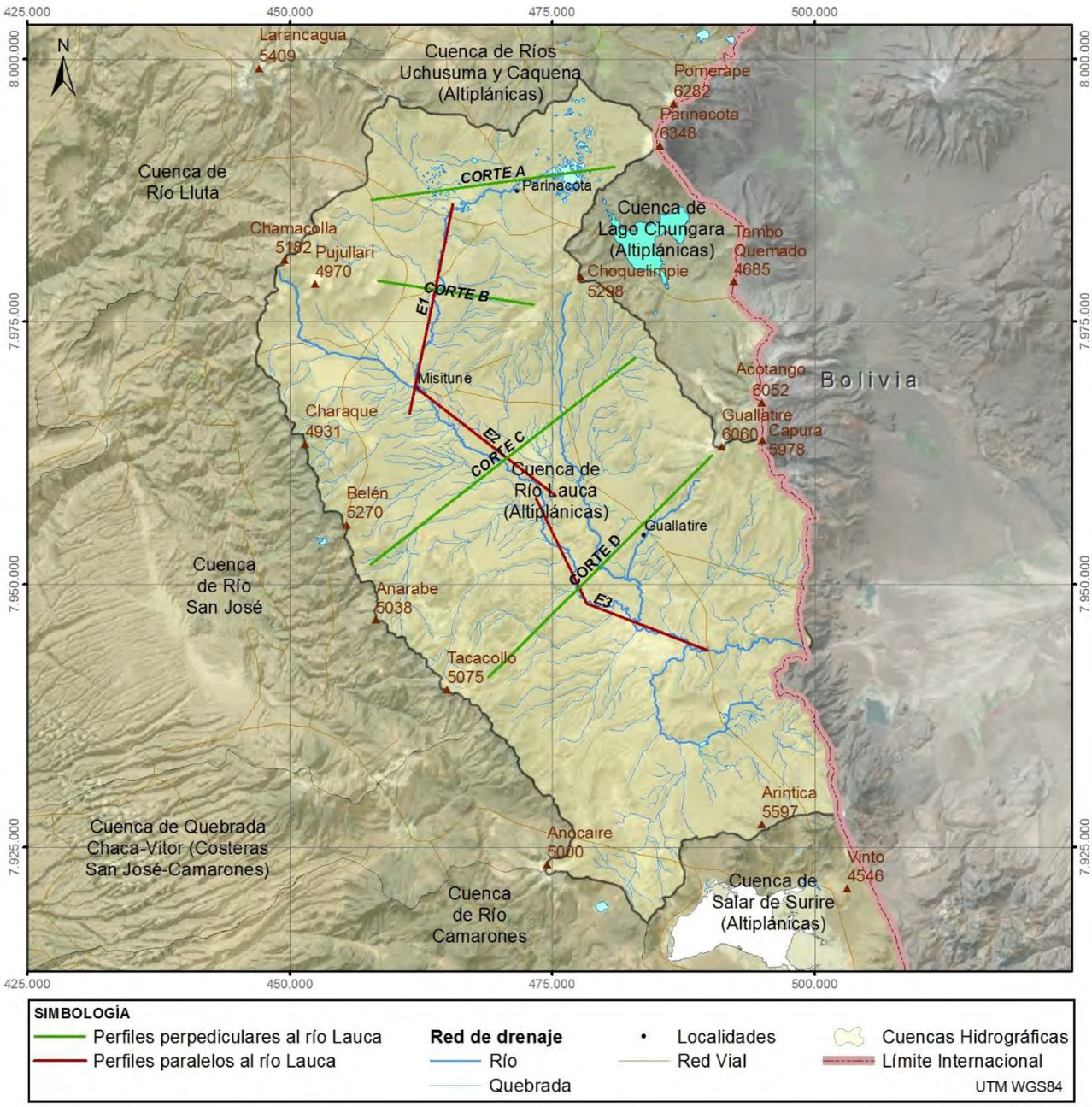


Figura 7.316 Ubicación de los perfiles hidrogeológicos realizados en la cuenca del río Lauca. Fuente: modificado de Matraz (2015).

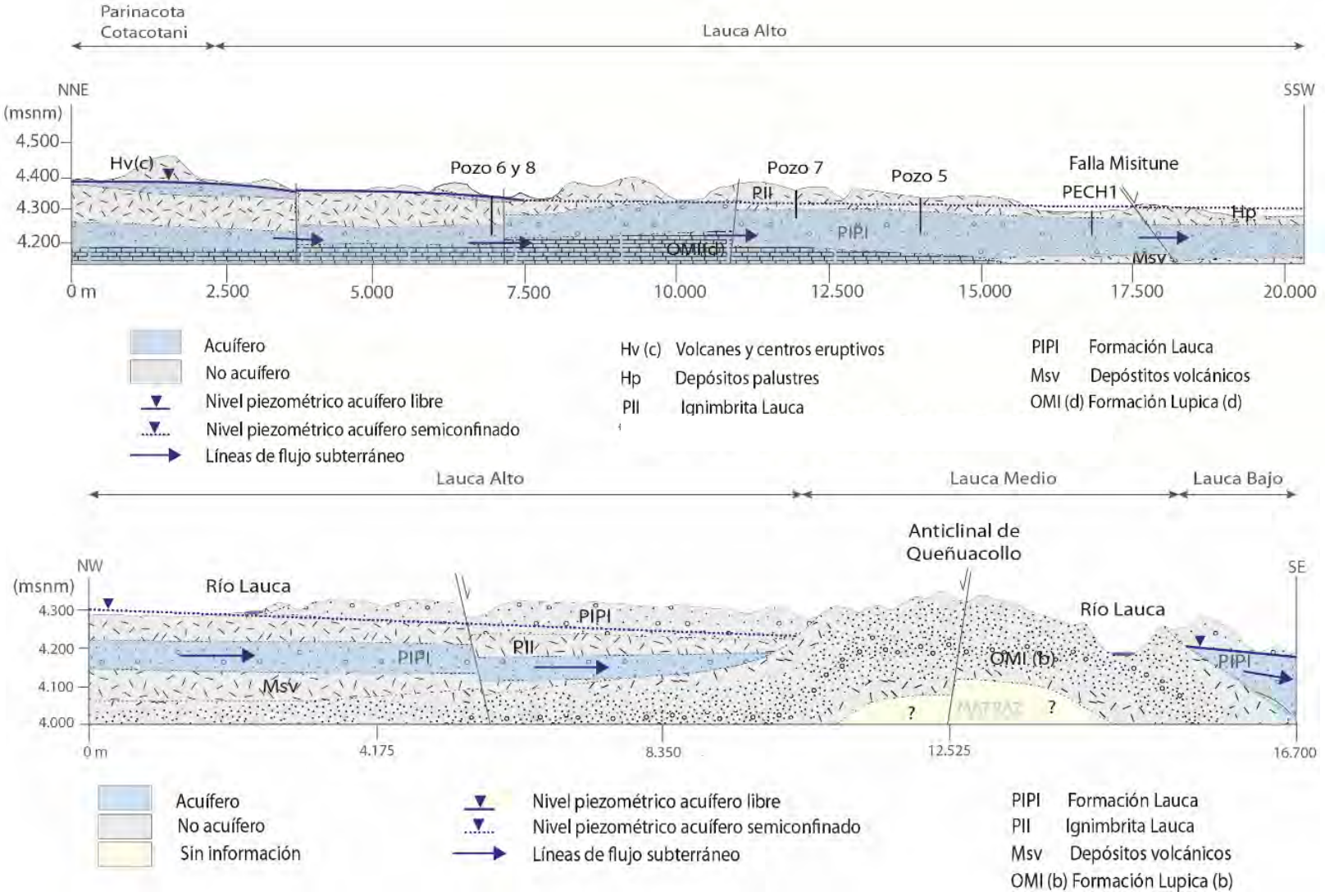
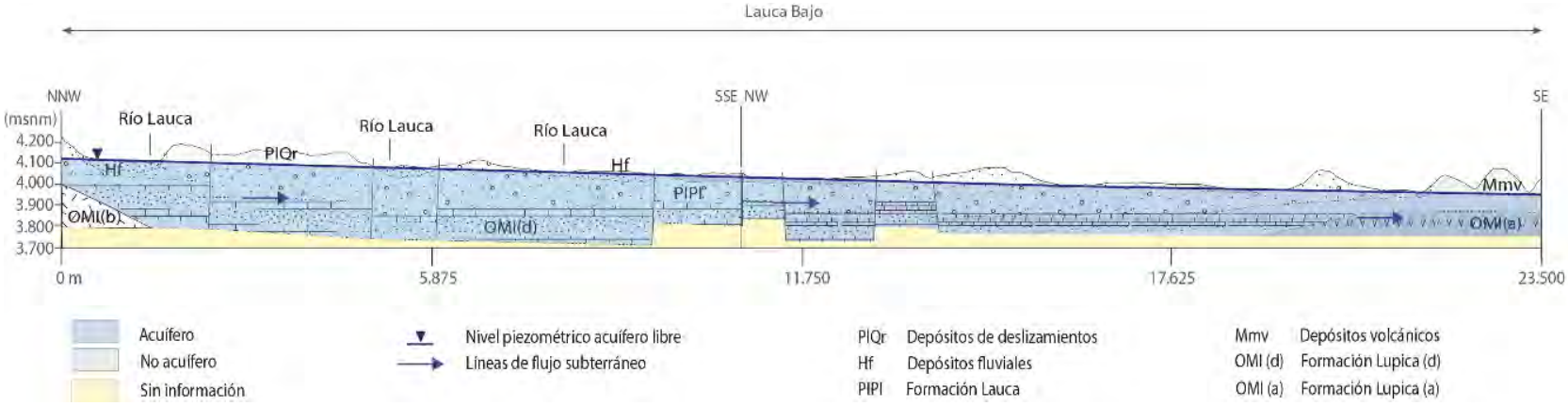


Figura 7.317 Perfiles hidrogeológicos E1-E2-E3 de los sectores Lauca Alto, Medio y Bajo paralelos al río Lauca.

Fuente: modificado de Matraz (2015). Continúa en página siguiente



Perfiles hidrogeológicos E1-E2-E3 de los sectores Lauca Alto, Medio y Bajo paralelos al río Lauca. Fuente: modificado de Matraz (2015). Viene de página anterior.

7.9.3.2 Definición y características de las unidades hidrogeológicas

En esta sección se identificaron las unidades hidrogeológicas existentes en la cuenca del río Lauca. A continuación se describen las unidades hidrogeológicas descritas en Matraz (2015) y respaldadas por el mapa geológico de García *et al.* (2004):

- Unidad Hidrogeológica I (importancia alta): representa la unidad que constituye los principales acuíferos en la zona de estudio. Estos son acuíferos en depósitos sedimentarios y se encuentran asociados a diferentes tipos de unidades geológicas. Por un lado, esta categoría incluye depósitos aluviales, fluviales y coluviales cuaternarios. Por otro lado, incluye los depósitos detríticos aluviales de la Formación Lauca que en el sector del Lauca Alto, junto con las formaciones sedimentarias de la Formación Lupica (d) también UH1, representan el acuífero principal en este sector de la cuenca.
- Unidad Hidrogeológica II (importancia alta): La unidad UH2 se corresponde con los acuíferos en roca fracturada. Estos son los acuíferos secundarios en la cuenca, ya que tienen una menor extensión y capacidad de almacenamiento en comparación con los acuíferos que tienen lugar en la UH1. Este tipo de acuíferos están relacionados con coladas volcánicas o volcano-sedimentarias fracturadas, como el volcán Guallatire y el complejo volcánico de Choquelimpie-Ajoya.
- Unidad Hidrogeológica III (importancia media-baja): tiene lugar en formaciones de porosidad primaria de menor conductividad hidráulica que la UH1. Por este motivo, la UH3 se ha considerado como un acuitardo, no obstante sería capaz de comportarse como acuífero en ciertos niveles y en función de la demanda a la que sea sometida. Estas formaciones incluyen los depósitos palustres cuaternarios típicamente asociados a los bofedales, los depósitos lacustres característicos de las unidades de la Formación Lauca del sector Lauca Bajo y los depósitos glaciares cuaternarios.
- Unidad Hidrogeológica IV (importancia baja): está asociada a formaciones rocosas de porosidad secundaria que presentan bajo número de fracturas abiertas y conectadas. El grado de fracturación de esta unidad no permite el suficiente flujo de las aguas subterráneas para fines productivos, su almacenamiento también es significativamente menor y, por este motivo, se clasifica como acuitardo en roca fracturada. La formación geológica más importante

que constituye la UH4 es la ignimbrita Lauca, que en el sector Lauca Alto de la cuenca actúa como unidad semiconfinante.

- Unidad Hidrogeológica V (importancia muy baja): hace referencia a todas aquellas unidades geológicas que prácticamente no almacenan aguas subterráneas ni la transmiten, es decir, serían de baja permeabilidad, como la Formación Lupica (b). Esta unidad hidrogeológica se conoce como acuicludo o basamento impermeable hidrogeológico cuando coincide con la unidad hidrogeológica basal. En la zona de estudio, este basamento está representado por unidades geológicas formadas por roca competente del tipo sedimentario y/o volcánico. Las características litológicas que determinan la impermeabilidad de estas rocas corresponden tanto a una escala micro-estructural como macro-estructural.

Por otro lado, en el sector bajo de la cuenca existe un acuífero multicapa, compuesto por la Formación Lauca y la Formación Lupica (d). La Formación Lauca se compone de 30 m de materiales de grano fino que constituyen la unidad hidrogeológica más superficial tipo acuitardo (UH3) en contacto directo con el río Lauca. Esta unidad se sitúa por encima de un acuífero más profundo tipo UH1 de 40 m de espesor. Sobre ésta subyace 230 m de la Formación Lupica (d) que también representan una unidad tipo UH1. El basamento en este sector no fue identificado en la geofísica. Aguas abajo, el acuífero multicapa se acuña hacia una unidad acuífera de porosidad dual (primaria UH1 y secundaria UH2) constituida por 300 m de espesor en la Formación Lupica (a). En la sección de salida, el basamento se encuentra a una profundidad de 300 m aproximadamente.

A continuación, se presenta el resumen de las unidades hidrogeológicas en la Tabla 7.203 descritas por Matraz (2015).

Tabla 7.203 Resumen de las unidades hidrogeológicas de la cuenca del río Lauca. Fuente: Matraz (2015).

Unidad	Tipo	Porosidad	Descripción	Ejemplo
UH I	Acuífero	Primaria	Depósitos sedimentarios de granulometría media a gruesa poco o no consolidados	- Depósitos cuaternarios aluviales - Facies aluviales de la Fm. Lauca
UH II	Acuífero	Secundaria	Rocas cristalinas con alto grado de fracturación	- Formaciones volcánicas miocénicas
UH III	Acuitardo	Primaria	Depósitos sedimentarios de granulometría fina	- Suelos actuales - Facies lacustres de la Fm. Lauca
UH IV	Acuitardo	Secundaria	Roca de matriz impermeables y leve fracturación	- Ignimbrita Lauca
UH V	Acuícludo	-	Rocas competentes sin fracturación o fracturas cerradas	- Fm. Lupica (b)

7.9.3.3 Parámetros hidráulicos

Los parámetros hidráulicos de cada una de las unidades hidrogeológicas se estimaron a partir de los antecedentes y de los resultados de las pruebas de bombeo recopiladas. En las unidades hidrogeológicas que no presentan antecedentes se consideraron los valores de los parámetros hidráulicos de materiales geológicos similares en la bibliografía.

En el sector norte de la cuenca del río Lauca se perforaron 10 sondajes y en los pozos n° 4, 5, 6, 7, 8, 9 y 10 se realizaron 2 campañas de pruebas de bombeo, una durante el periodo 1992-93 y otra durante el año 1996. En la Figura 7.318 se muestra la ubicación de los sondajes construidos.

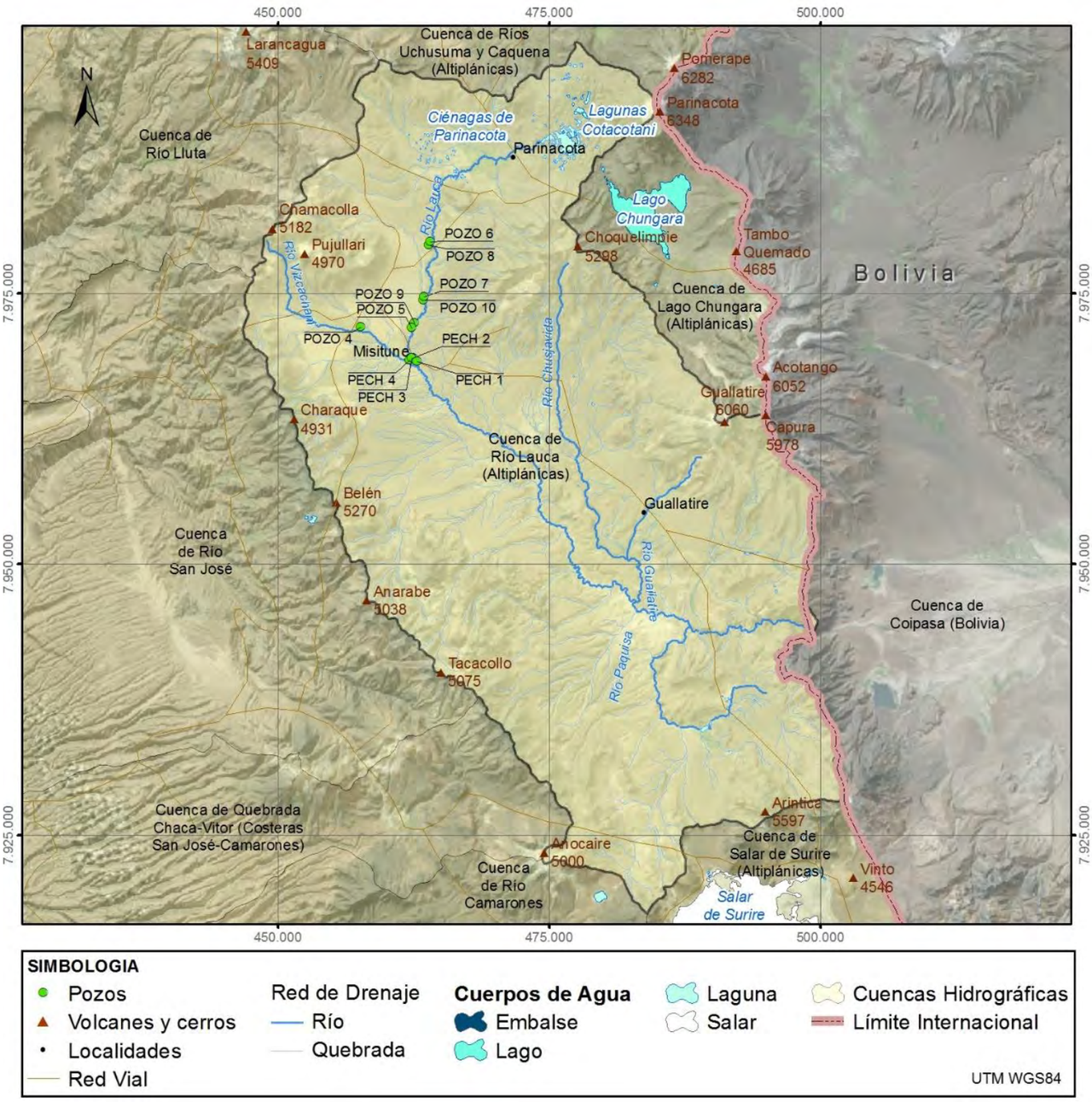


Figura 7.318 Ubicación de los sondajes existentes en la cuenca del río Lauca. Fuente: elaboración propia.

En el presente estudio se han reinterpretado las pruebas de bombeo realizadas en el año 1996 recalculando los valores de transmisividad y de coeficiente de almacenamiento, mediante la fórmula de Theis y con el espesor del acuífero indicado en la prospección geofísica efectuada en el sector norte. Dentro de esta reinterpretación se ha obtenido una transmisividad que varía entre 740 y 70 m^2/día y un coeficiente de almacenamiento medio de 0,001, siendo valores coherentes para un tipo de acuífero confinado. En la Tabla 7.204 se muestran los valores de transmisividad obtenidos por AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (1994b), AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (1996), ARA y Ambar (1996) e ICASS (2016) de la Unidad Hidrogeológica II. Es importante destacar que estos parámetros no son extrapolables al resto de la cuenca, debido a la heterogeneidad de las unidades geológicas y el carácter local que tienen estos análisis.

Tabla 7.204 Transmisividades estimadas por cada autor con los datos obtenidos en las diferentes campañas de bombeo. Fuente: elaboración propia.

Pozo	Ayala, Cabrera y Asoc. (1994)[1]	Ayala, Cabrera y Asoc. (1996)[2]	ARA y Ambar (1996)[3]	ICASS (2016)[4]
4	184	16		92
5	264	65	90	150
6	234	114	180	414
7	185	69	65	511
8	335	402	800	724
9	132	128	150	263
10	70	74	--	73

[1] Datos de las pruebas de bombeo de la campaña de bombeo 1992-93
[2] Datos de las pruebas de recuperación de la campaña de bombeo 1996
[3] Datos de las pruebas de bombeo de las campañas de bombeo 1992-93 y 1996
[4] Datos de las pruebas de bombeo de la campaña de bombeo 1996

Estos valores de transmisividad calculados corresponden a la Unidad Hidrogeológica II, sin embargo en el resto de unidades no existen antecedentes sobre el valor de los parámetros hidráulicos. Por lo tanto, en la Tabla 7.205 se han estimado los parámetros hidráulicos según los valores definidos para unidades hidrogeológicas similares en otras cuencas. Y en los casos en que no exista información se han considerado valores de la bibliografía existente.

Tabla 7.205 Resumen de los parámetros hidráulicos de cada unidad hidrogeológica de la cuenca del río Lauca. Fuente: elaboración propia.

Cuenca	Unidad Hidrogeológica	Régimen	T (m^2/día)	K (m/día)	Ss (m^{-1})	Sy (%)	Comentario
Río Lauca	I	Libre	70-700	0,1-10		5-30	T base al estimado con pruebas de bombeo, ICASS (2016)
		Confinado					
	II	Libre		$1E^{-2}$-$1E^{2}$	--		K estimado por Aquaconsult (2010) depósitos volcánicos en Lluta
	III	Libre		$1E^{-3}$ – $5E^{-1}$		--	K estimado por Domenico y Schwatz (1990) para rocas sedimentarias
	IV	Libre		$1E^{-3}$- 1	--		K estimado por Aquaconsult (2010) de la Fm. Lupica en Lluta. y S por Dominico y Mifflin (1965)
		Confinado			$3E^{-6}$-$1E^{-5}$	--	
	V	Libre		$1E^{-5}$-$7E^{-3}$			K estimado por Domenico y Schwatz (1990) y S por Dominico y Mifflin (1965)
		Confinado			$3E^{-6}$-E^{-5}		

7.9.3.4 Piezometría

La piezometría de la cuenca del río Lauca se ha referenciado completamente a la realizada por Matraz (2015). Para la elaboración del mapa piezométrico, Matraz (2015) consideró la medición del nivel freático en 10 pozos que se ubican en el sector alto de la cuenca, las cotas y coordenadas de las vertientes, de las nacientes de ríos, bofedales y a partir de la cota en diferentes tramos del río y sus principales afluentes.

En la Figura 7.319 se observa un nivel freático (verde) para el acuífero libre del sector de las lagunas Cotacotani y de las ciénagas de Parinacota, donde las líneas de flujo convergen hacia los cuerpos de agua. Las lagunas de Cotacotani reciben aportes de agua subterránea desde la cuenca del lago Chungara y desde los volcanes Parinacota y Ajoya. Aguas abajo, las isopiezas de color rojo corresponden al acuífero que está semiconfinado bajo la ignimbrita Lauca, por lo que la dirección del componente principal del flujo subterráneo es de norte-sureste, aunque localmente existen tramos donde el acuífero aporta agua al río a través de las fracturas. A partir del anticlinal de Queñuacollo (isopiezas rosas) la dirección del flujo del agua subterránea en el acuífero libre presenta direcciones desde las cotas más altas de los cerros que bordean este sector, especialmente desde el Complejo Volcánico Choquelimpie-Ajoya y el volcán Guallatire, hacia los sectores más bajos. Destaca el alto gradiente hidráulico del nivel de agua subterránea que aporta el volcán Guallatire.

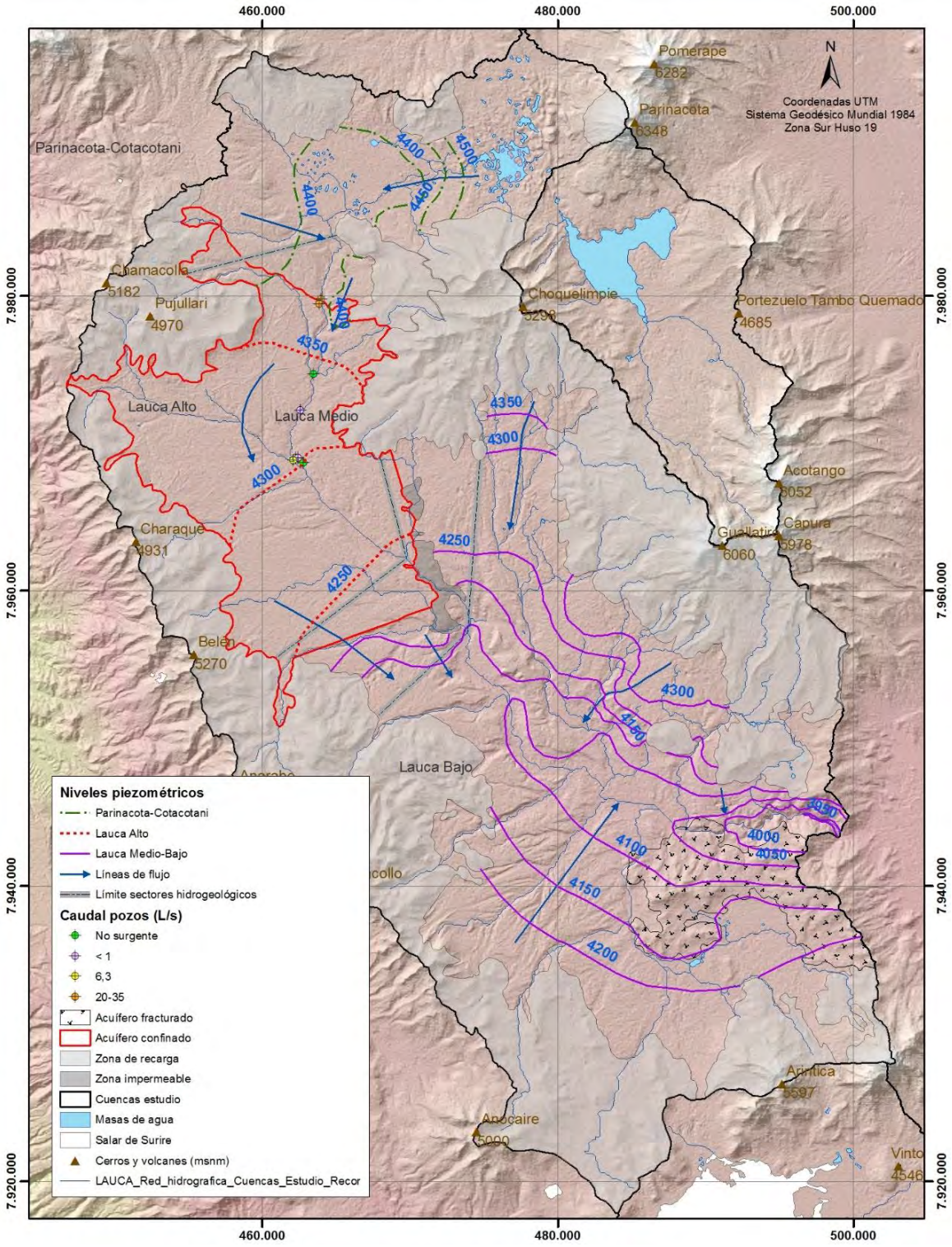


Figura 7.319 Mapa piezométrico de la cuenca del río Lauca. Fuente: Matraz (2015).

7.9.4 Caracterización Hidroquímica

7.9.4.1 Estudios hidroquímicos existentes

Desde finales de la década de los años 90 se han desarrollado diversos estudios hidroquímicos e isotópicos en el sector norte de la cuenca, sin embargo, los únicos que analizaron la cuenca completa son Risacher et al. (1999) y Matraz (2015).

En ARA y AMBAR (1996) se analizaron las aguas subterráneas en los pozos del Ministerio de Obras Públicas y en Arrau (1997) se evalúan los datos obtenidos en el estudio Ayala, Cabrera y Asociados y AC Ing. (1995) durante los meses de marzo y mayo de 1996 en la cuenca del río Lauca y del río San José.

Risacher et al. (1999) analizó la composición hidroquímica en 14 puntos y en dos la composición isotópica a lo largo de toda la cuenca. Herrera, C. *et al*. (2006) recogió 17 muestras de agua en las vertientes y lagunas Cotacotani para el análisis hidroquímico e isotópico con el fin de corroborar la conexión hidráulica entre la cuenca del lago Chungara y las lagunas Cotacotani. En Matraz (2015) se tomaron un total de 39 muestras para análisis hidroquímico, y en 18 de ellas se realizó un análisis isotópico de la molécula del agua (^{18}O y D) en septiembre de 2014 y 28 muestras para análisis hidroquímico y en 17 de ellas se realizó un análisis isotópico en abril de 2015.

En la Figura 7.320 se muestra la ubicación de los puntos muestreados por cada autor, excepto de Arrau (1997) que no presenta coordenadas por lo que sólo se indican los pozos muestreados y no las aguas superficiales analizadas.

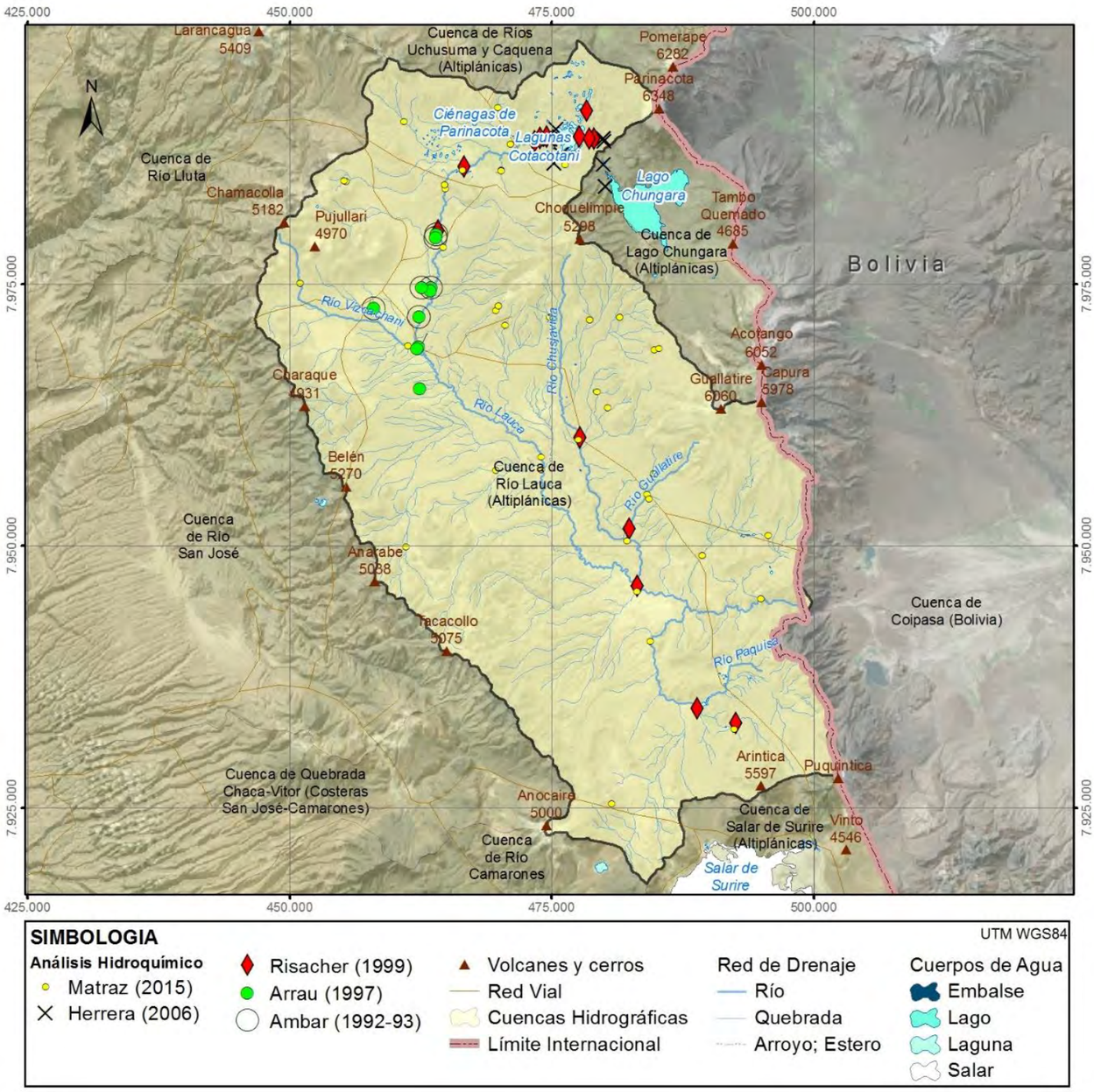


Figura 7.320 Ubicación de los puntos de aguas superficiales y subterráneas muestreados en los antecedentes de la cuenca del río Lauca. Fuente: elaboración propia.

7.9.4.2 Campaña de muestreo

La cuenca del río Lauca fue muestreada en la última campaña de terreno con fin de verificar los estudios existentes. A partir de esta información se caracteriza hidroquímicamente e isotópicamente y se determina la calidad de agua de algunos elementos y parámetros según la norma chilena para agua potable NCh 409/1. El programa de muestreo de este estudio se diseñó para complementar de manera efectiva la información disponible. En la Figura 7.291 se muestra la ubicación de las 15 muestras tomadas los días 12 y 22 de agosto de 2015 para el análisis hidroquímico e isotópico. En el Anexo VIII se describe el protocolo seguido en terreno para la toma de muestras de agua.

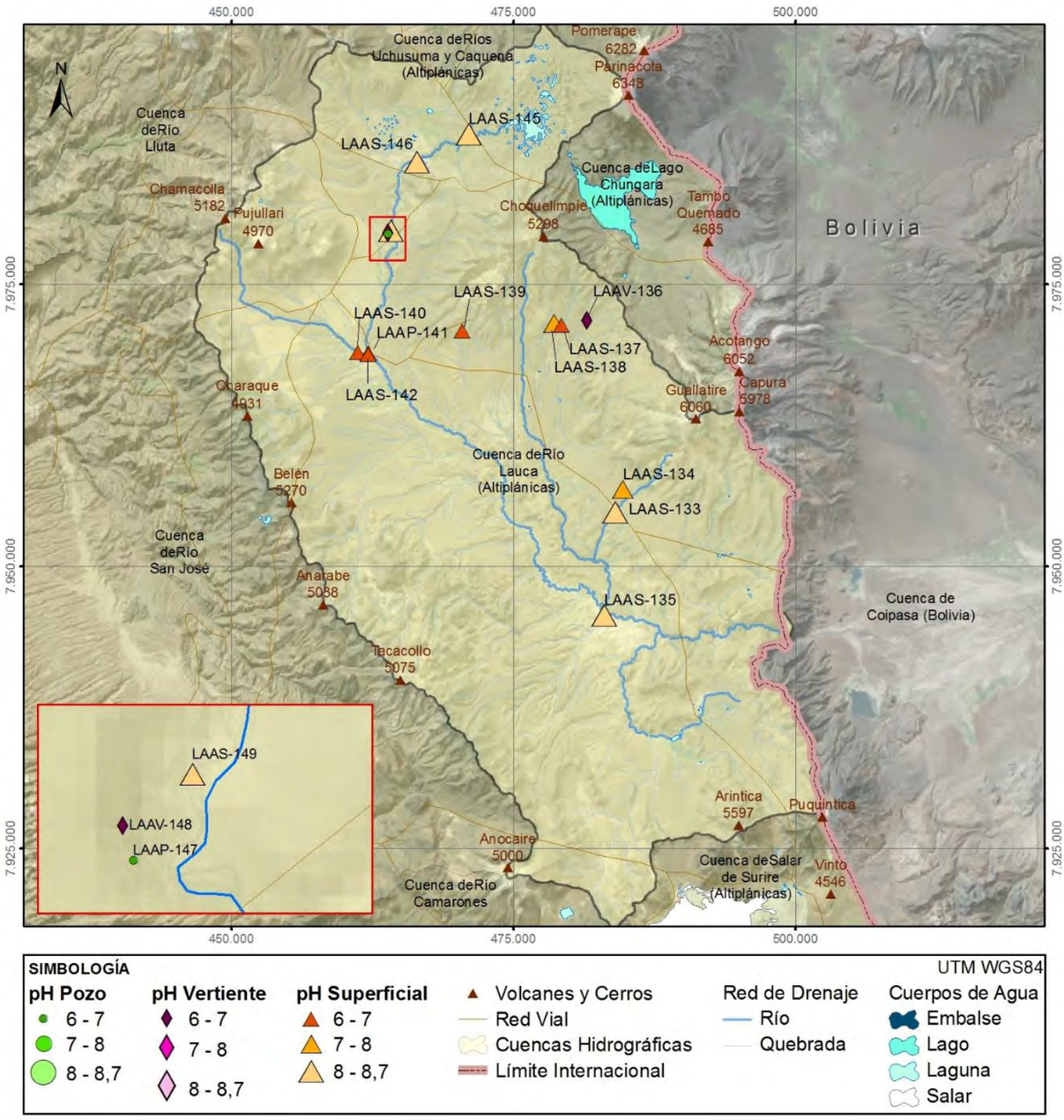


Figura 7.321 Ubicación de las muestras analizadas hidroquímica e isotópicamente en la cuenca del río Lauca en la campaña de agosto 2016. Fuente: elaboración propia.

7.9.4.3 Parámetros fisicoquímicos *in situ*

En la campaña de terreno se midieron los parámetros fisicoquímicos de las muestras que se tomaron para el análisis hidroquímico e isotópico. En esta sección se evalúan los valores de temperatura, pH, conductividad eléctrica y Sólidos Disueltos Totales (TDS) para caracterizar estos parámetros fisicoquímicos e identificar si existe una variación espacial de estos en la cuenca del río Lauca.

TEMPERATURA

En agosto de 2016 se registró una temperatura que varía entre 45,2 y 8,3°C. La máxima temperatura corresponde a la muestra tomada en la fuente hidrotermal Chiriguaya (LAAV-136). Las aguas del pozo surgente del MOP N°6 y de la vertiente cercana a éste presentan aproximadamente 25°C mientras que el resto de las aguas analizadas tienen valores inferiores a 15°C. Esta situación refleja que las aguas del pozo y de la vertiente tienen el mismo origen.

PH

El pH registrado en agosto de 2016 osciló entre 6 y 8,7. En la Figura 7.322 se determina que las aguas subterráneas son neutras, variando el pH entre 6 y 6,7, tanto en los pozos como en las vertientes muestreadas. En las aguas superficiales del río Lauca hay una evolución desde aguas alcalinas (pH 8,5) en la bocatoma del canal Lauca hasta aguas neutras antes de la confluencia del río Lauca con el río Vizcachani. El río Guallatire se caracteriza por tener aguas alcalinas, de pH 8,15, del mismo modo que las aguas del río Lauca después de la confluencia del río Guallatire, pH 8,3.

CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

La conductividad eléctrica registrada en agosto de 2016 varió entre 90 y 6.110 µS/cm, siendo la muestra con mayor conductividad la vertiente hidrotermal de Chiriguaya (LAAV-136), el resto de aguas son frescas, igual o inferior a 1.000 µS/cm. En la Figura 7.323 se observa que las aguas subterráneas son aguas muy frescas, excepto la vertiente Chiriguaya, presentando una conductividad inferior o igual a 160 µS/cm. Por otro lado, el río Lauca en la bocatoma y los primeros kilómetros de río son aguas con una conductividad que oscila entre 450-500 µS/cm pero en el sector del pozo N°6 del

MOP desciende a 130 µS/cm hasta después de la confluencia con el río Guallatire, el cual aporta aguas de 850-1.000 µS/cm.

SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES

Los valores máximos, de 3.910 mg/L, y mínimos, de 54 mg/l, corresponden a las mismas muestras que tienen alto valor de conductividad eléctrica.

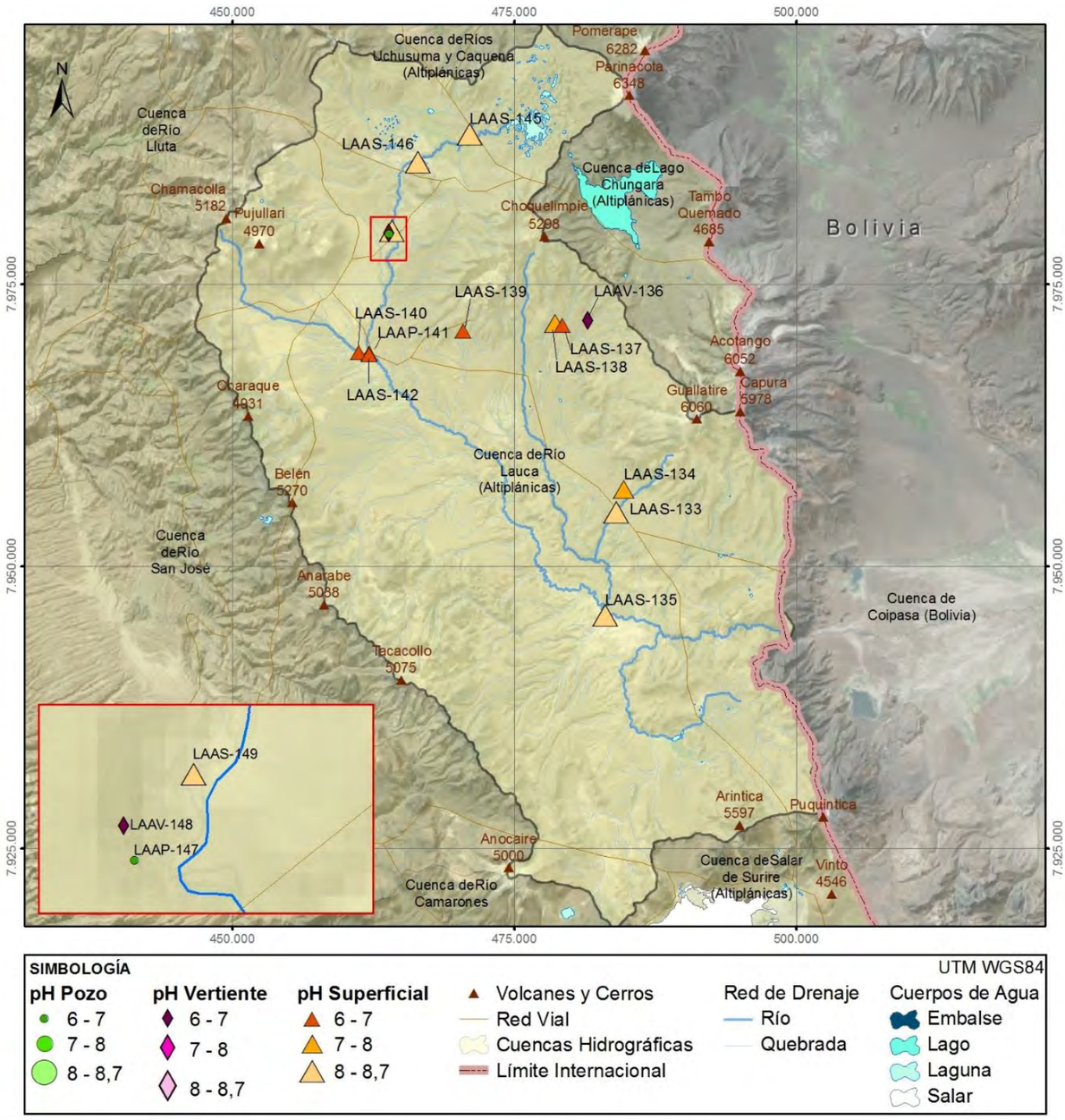


Figura 7.322 Distribución de los valores de pH de las muestras recogidas en la cuarta campaña de terreno, agosto 2016, en la cuenca del río Lauca. Fuente: elaboración propia.

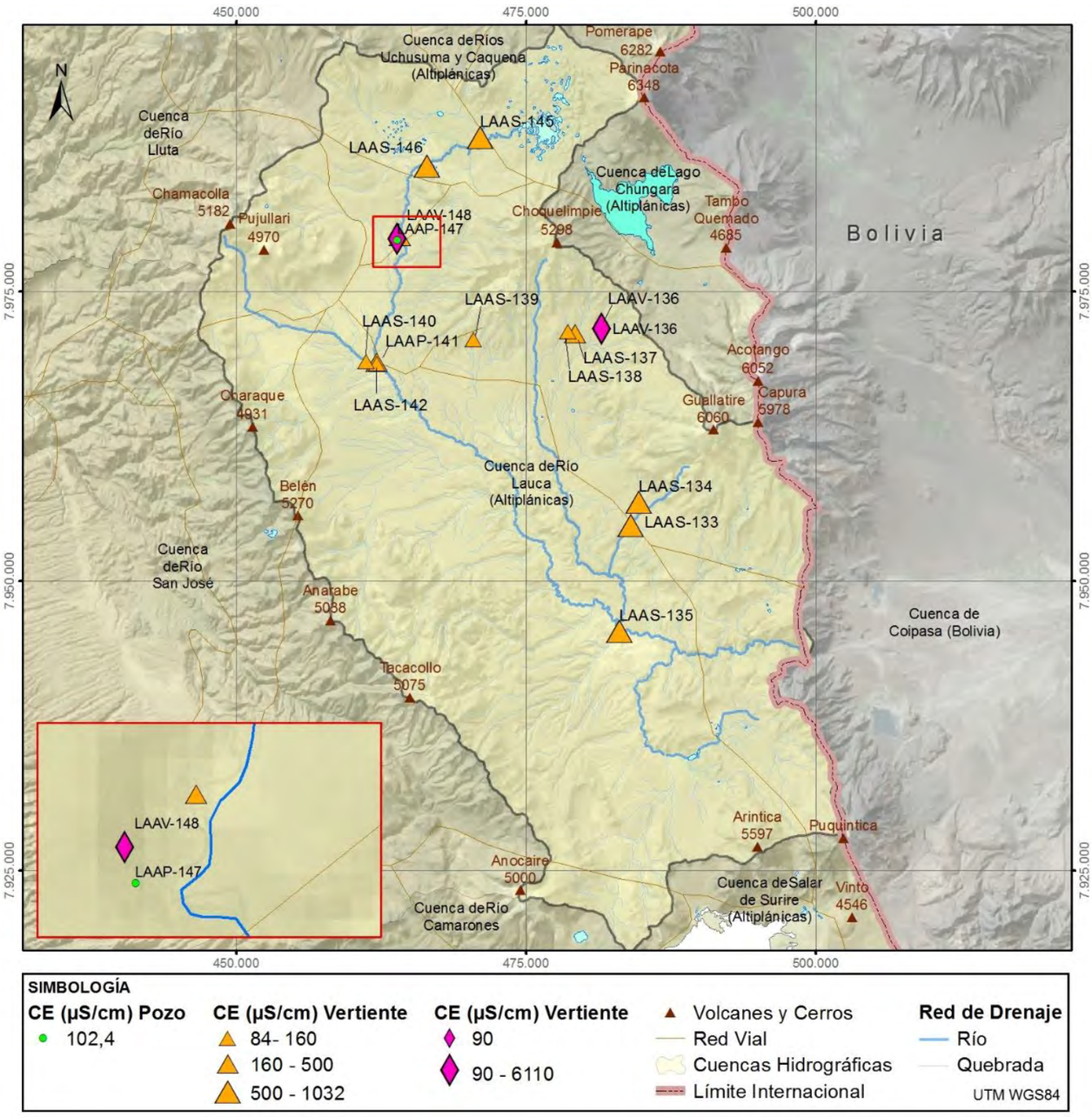


Figura 7.323 Distribución de los valores de conductividad eléctrica de las muestras recogidas en la cuarta campaña de terreno, agosto 2016, en la cuenca del río Lauca. Fuente: elaboración propia.

7.9.4.4 Modelo hidroquímico de las aguas

Los valores máximos y mínimos del error del balance iónico de la composición química entregada por el laboratorio varían entre -4,45% y 8,92%, los cuales son aceptables.

ANÁLISIS DE FACIES QUÍMICAS

En la Figura 7.324 se muestran los diagramas de Piper y Schoeller-Berkaloff de la composición hidroquímica de las 15 muestras de aguas superficiales, vertientes y pozos, tomadas en agosto de 2016 en la cuenca del río Lauca.

Las aguas superficiales del río Lauca en la bocatoma son bicarbonatadas magnésico-sódicas, hasta la altura del pozo del MOP N°6 donde son sulfatadas sódicas. Las aguas subterráneas del pozo surgente N°6 y de la vertiente cercana son bicarbonatadas cálcicas, aguas abajo de este punto, el río Lauca antes de la confluencia con el río Vizcachani pasa a aguas bicarbonatadas sódicas. El río Vizcachani se caracteriza por presentar aguas bicarbonatadas sódicas, del mismo modo que el pozo surgente ubicado en Misitune. Las aguas del río Lauca después de la confluencia del río Guallatire son sulfatadas sódico-cálcicas, reflejo del aporte de aguas sulfatadas cálcico-magnésicas del río Guallatire.

Por otro lado, las muestras tomadas en las quebradas del complejo volcánico Choquelimpie-Ajoya son aguas bicarbonatadas sódico-cálcicas muy poco mineralizadas mientras que la vertiente hidrotermal Chiriguaya es bicarbonatada-clorurada sódica y más mineralizada que el resto de la cuenca.

En el diagrama de Schoeller-Berkaloff se observa como las aguas en la cabecera del río Lauca, en el río Guallatire y en el río Lauca después de la confluencia del río Guallatire son aguas más mineralizadas que las aguas subterráneas muestreadas en las vertientes y en los pozos, en el río Vizcachani, en las quebradas del complejo volcánico Choquelimpie-Ajoya y en los tramos del río Lauca alimentados por el acuífero inferior.

Los resultados hidroquímicos obtenidos en la cuenca del río Lauca coindicen con los análisis realizados en Matraz (2015), por lo que no se observa evolución o variación temporal en la composición de las aguas superficiales y subterráneas en la cuenca del río Lauca.

En el Anexo VIII se presenta el contenido de los diferentes elementos mayoritarios y minoritarios en la cuenca del río Lauca. Los diferentes gráficos indican que las muestras analizadas presentan niveles inferiores de amonio, cianuro, cobre, cromo, mercurio, plomo y zinc inferiores a los detectables por los instrumentos del laboratorio. Sin embargo, la muestra tomada en la fuente hidrotermal Chiriguaya (LAAV-136) contiene el mayor nivel de sólidos disueltos totales, sulfatos, sodio, silicio, potasio, magnesio, fluoruros, fosfatos, bromuros, cloruros, arsénico y boro. Por otro lado, las aguas de la cabecera del río Lauca exhiben un alto contenido en fluoruros, magnesio, calcio y manganeso. Por último, destacan las aguas subterráneas muestreadas en ambos pozos por presentar los mayores valores de nitratos registrados en la cuenca.

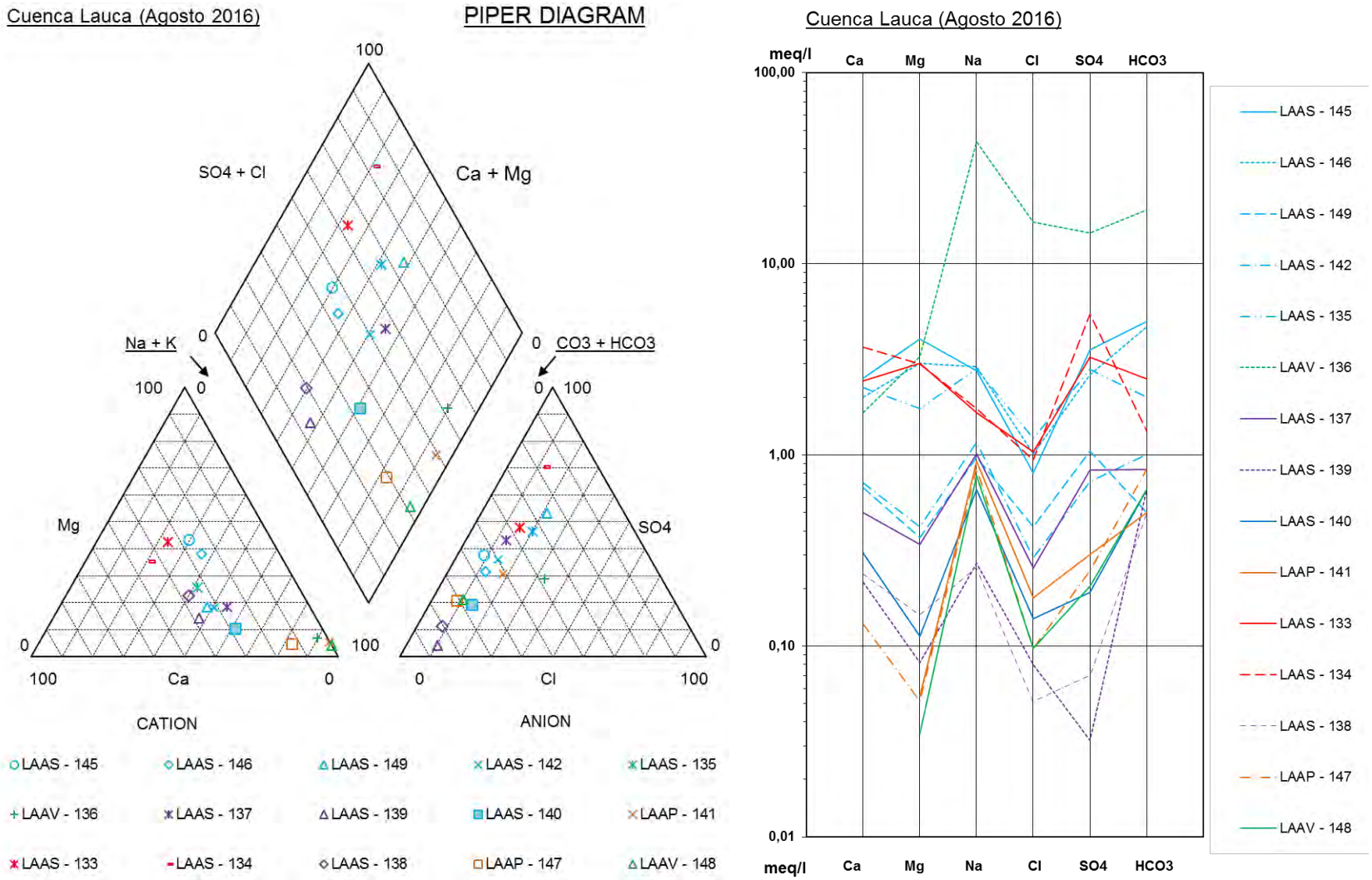


Figura 7.324 Diagramas de Piper y de Schoeller-Berkaloff de las muestras analizadas hidroquímica en agosto de 2016 en la cuenca del río Lauca. Fuente: elaboración propia.

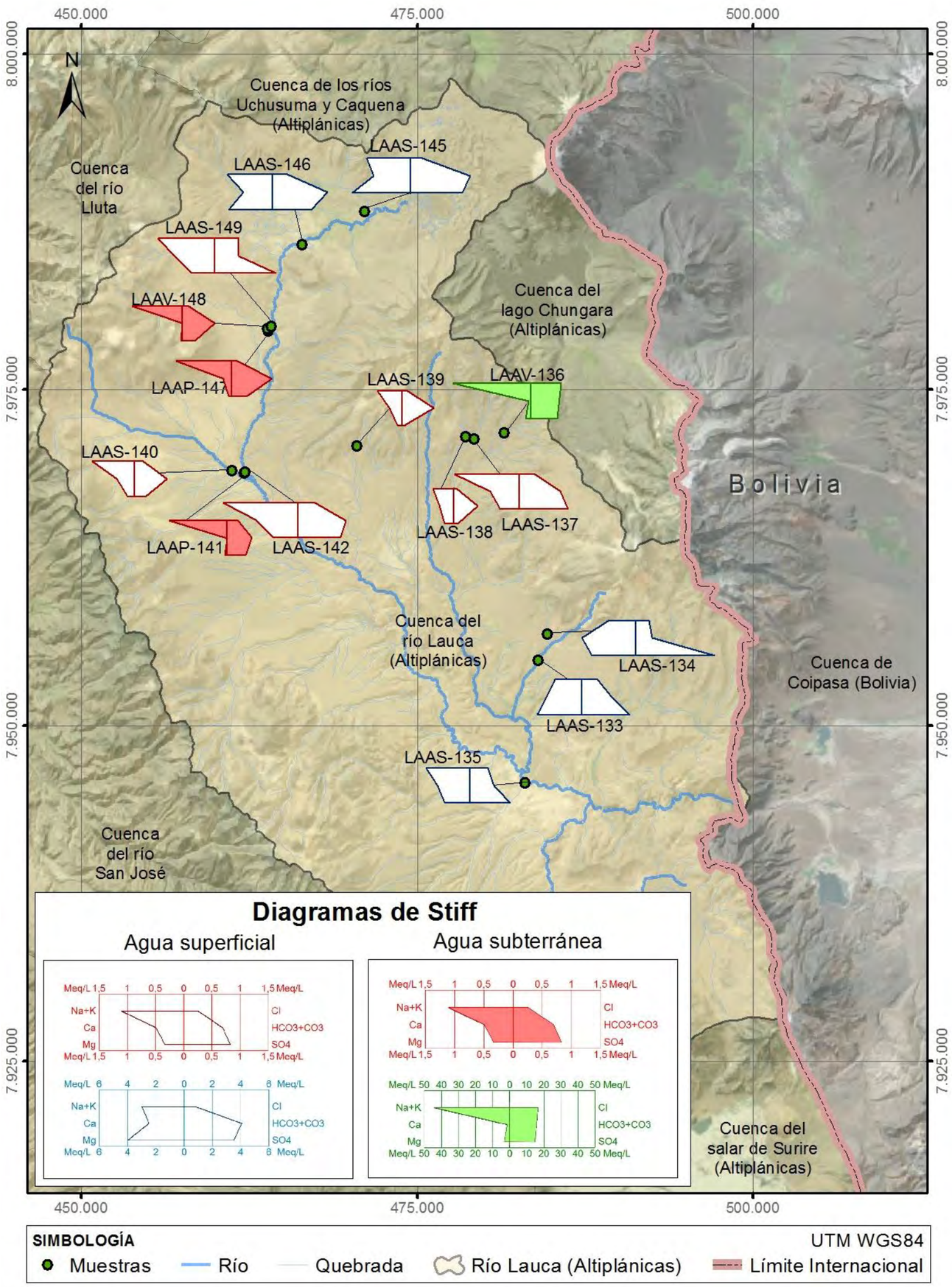


Figura 7.325 Mapa con los diagramas de Stiff de la composición química de las muestras recogidas en la cuenca del río Lauca en agosto de 2016. Fuente: elaboración propia.

EVOLUCIÓN DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS AGUAS

En el sector de las lagunas de Cotacotani y ciénagas de Parinacota se identifica una evolución y mezcla de aguas de diferentes facies hidroquímicas. Según Matraz (2015) las aguas del río Benedicto Morales son bicarbonatadas, sin dominio de ningún catión, mientras que el resto de vertientes en las lagunas de Cotacotani son bicarbonatadas magnésicas. En cambio, las aguas de las lagunas de Cotacotani y del río Desaguadero son similares, sulfatadas-bicarbonatadas magnésicas con concentración relativamente alta de elementos mayores, pH alcalino y conductividad entre 700-500 µS/cm.

En el tramo de la cabecera del río Lauca, las aguas superficiales del río son alcalinas, con una conductividad que oscila entre 450-500 µS/cm y bicarbonatadas magnésico-sódicas, hasta la altura del pozo del MOP N°6 donde son sulfatadas sódicas. En el sector del pozo surgente N°6 se observa como las aguas subterráneas procedentes del acuífero semiconfinado son aguas neutras, con una conductividad igual o inferior a 160 µS/cm, bicarbonatadas cálcicas y muy poco mineralizadas, mientras que las superficiales del río son sulfatadas sódicas. A partir de este sector, las aguas del río Lauca van evolucionando a bicarbonatadas.

Por otro lado, el río Vizcachani es hidroquímicamente similar a las aguas surgentes de los pozos, indicando que son aguas que proceden principalmente del acuífero semiconfinado.

Las quebradas del complejo volcánico Choquelimpie-Ajoya son aguas alcalinas, con una conductividad de 160 µS/cm, bicarbonatadas sódico-cálcicas y muy poco mineralizadas. Esto indicaría que son aguas jóvenes que han sufrido escasa o nula interacción agua-roca en el acuífero fracturado del complejo Choquelimpie-Ajoya por lo que serían similares a las precipitaciones que recargan el acuífero. En cambio, en el río Guallatire son aguas neutras-alcalinas, con una conductividad eléctrica entre 850 y 1.000 µS/cm y sulfatadas cálcico-magnésicas, reflejo de la circulación e interacción con el material que constituye el acuífero fracturado del volcán Guallatire.

Por último, la vertiente Chiriguaya se caracteriza por tener aguas hidrotermales, con alta temperatura, neutras, salobre (6.100 µS/cm) e intermedia entre clorurada-bicarbonatada-sulfatadas sódica. Son aguas más mineralizadas que el resto de la cuenca.

7.9.4.5 Calidad de las aguas

En el Anexo VIII se presentan los resultados de las mediciones de parámetros *in situ* y análisis de laboratorio, y dentro de cada tabla se remarcaron en rojo aquellos valores que sobrepasan la norma chilena para uso de agua potable NCh 409 y en color verde los valores que superan el límite de aluminio y boro establecido en la norma para riego NCh 1.333.

Al comparar la composición hidroquímica de las 15 muestras de agua analizadas con la norma de agua potable NCh 409 se obtiene que las aguas del río Vizcachani y de la naciente del río Guallatire son aguas aptas para el consumo humano. Sin embargo las aguas del río Guallatire superan el nivel de boro determinado en la norma para riego NCh 1.333. El resto de muestras de agua superan los límites de arsénico, fluoruros, hierro, manganeso, selenio o el pH definido en la norma chilena NCh 409, por lo que no son aptas para el consumo humano. La muestra que supera el mayor número de parámetros es la muestra tomada en la fuente hidrotermal Chiriguaya, LAAV-136, que se ve sobrepasada en el arsénico, cloruros, fluoruros, sulfatos y sólidos totales disueltos. Por otro lado, 7 de las 15 muestras analizadas en la cuenca del río Lauca superan los límites de boro establecidos en la norma NCh 1333.

7.9.4.6 Isotopía de las aguas

La composición isotópica de la molécula del agua (D y ^{18}O) de las aguas superficiales y subterráneas de la cuenca del río Lauca fue analizada por Arrau (1999), Risacher *et al.* (2006), Matraz (2015) y en el presente estudio en agosto de 2016. En la Figura 7.326 se muestra la ubicación de los puntos de agua analizados en los antecedentes y en el presente estudio.

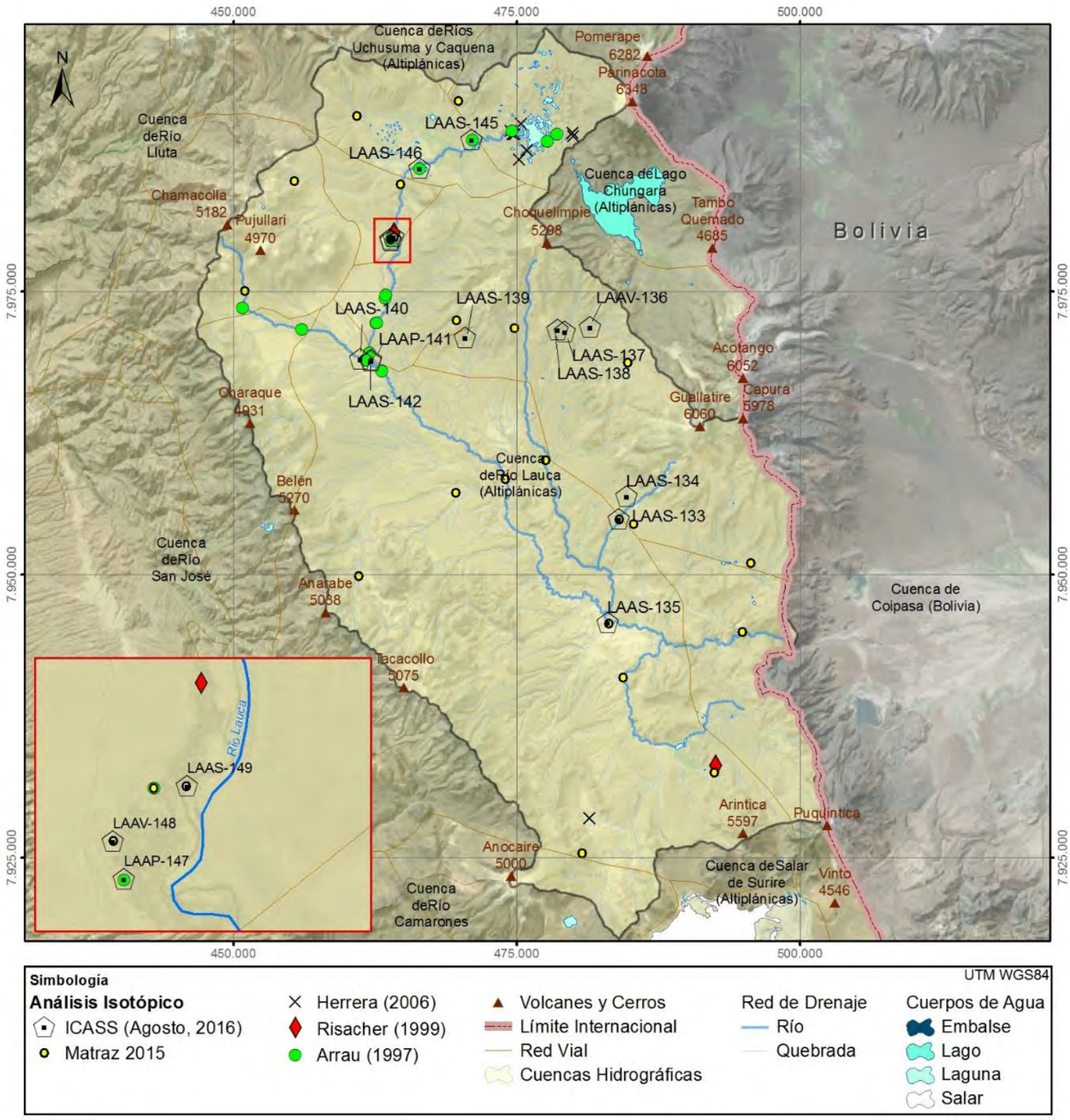


Figura 7.326 Ubicación de las muestras analizadas isotópicamente en la cuenca del río Lauca en los antecedentes y en la 4° campaña de terreno. Fuente: elaboración propia.

A continuación se resume la caracterización isotópica realizada en Matraz (2015), ya que es reciente y el único estudio que efectuó el análisis isotópico en la cuenca completa, tanto en aguas superficiales como en subterráneas, en dos campañas de terreno, septiembre de 2014 y abril de 2015. En la Figura 7.327 se muestra la relación D y ^{18}O del análisis isotópico obtenido en la campaña efectuada en septiembre de 2014, de color azul se representan las aguas superficiales, de color rojo las vertientes y de color negro los pozos. También en esta figura se presenta la ubicación de estas muestras y se indica si han sufrido algún tipo de proceso que modifique la composición isotópica.

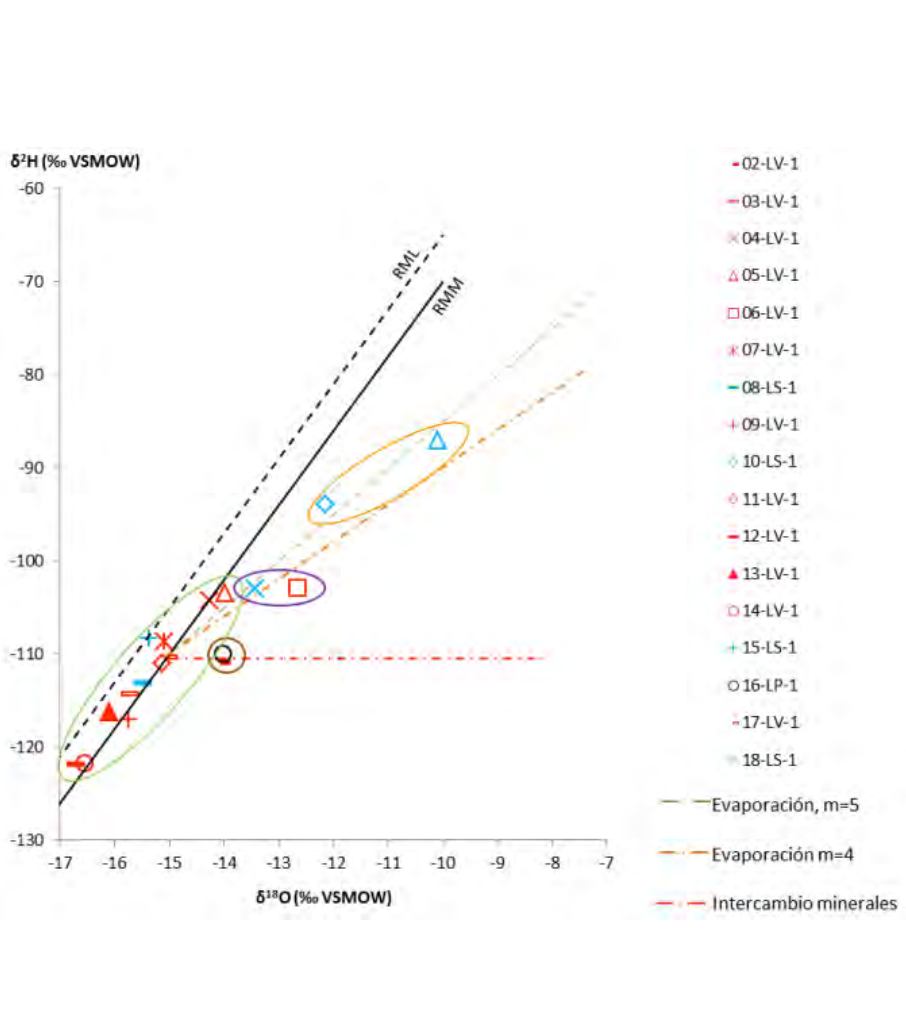
En el gráfico relación D y ^{18}O se diferencian 3 grupos de muestras que se han delimitado por círculos. El círculo verde engloba las muestras que se ajustan a la RML y RMM, lo cual implica que no han sufrido procesos que modifiquen la relación D y ^{18}O, el círculo naranja abarca a las muestras que se aproximan a la recta de pendiente 5, indicando un proceso de evaporación. Por otro lado, el círculo morado abarca las muestras que han sufrido evaporación y probablemente interacción agua-roca, y el círculo marrón incluye las aguas de un pozo y una vertiente, que se encuentra próxima al pozo, que manifestarían interacción agua-roca, según Matraz (2015).

En la Figura 7.328 se muestra la relación D y ^{18}O de las muestras analizadas isotópicamente y la ubicación de estas muestras en la cuenca del río Lauca. Según Matraz (2015) la muestra que se tomó en la naciente del río Guallatire, 43-LV-3, son aguas meteóricas que no han sufrido ningún proceso que modifique la composición isotópica e indicaría que las precipitaciones se produjeron en un clima árido, ya que se encuentra en la RML. Por otro lado, la muestra tomada en el río Paquisa, 46-LS-3, se ajusta a la recta de pendiente 5 y con un fuerte enriquecimiento, indicando que ha sufrido un alto grado de evaporación en la laguna de Paquisa. Las muestras tomadas en el pozo y en la vertiente, próxima a éste, reflejan interacción agua-roca y el intercambio de isótopos que se puede producir entre ellos. El resto de muestras indican evaporación, ya que se encuentran entre las rectas con pendiente 4 y 5.

Matraz (2015) determina que el enriquecimiento de las aguas de la cabecera del río Lauca muestra un fraccionamiento debido probablemente a la constante evaporación que sufren las aguas en la superficie de las lagunas. Estas aguas, a lo largo del cauce del río Lauca, reciben el aporte de aguas más ligeras

desde el acuífero inferior del Lauca, a través de fracturas, y desde el río Guallatire, provocando que la composición isotópica de las aguas del río Lauca sea más ligeras.

Por último, la composición isotópica de las muestras tomadas en ambas campañas no varía de un modo importante, es decir, sufren los mismos procesos.



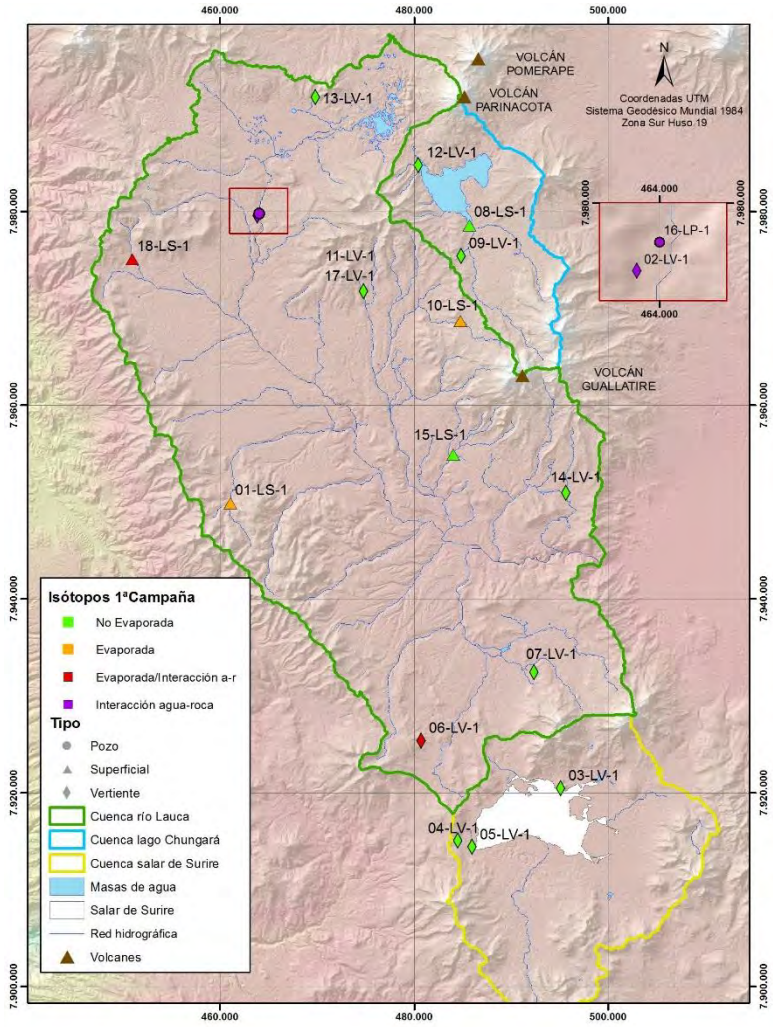


Figura 7.327 **Relación $\delta^{18}O/\delta D$ de las muestras analizadas en la cuenca del río Lauca en septiembre de 2014 por** Matraz (2015) y su ubicación. Fuente: Matraz (2015).

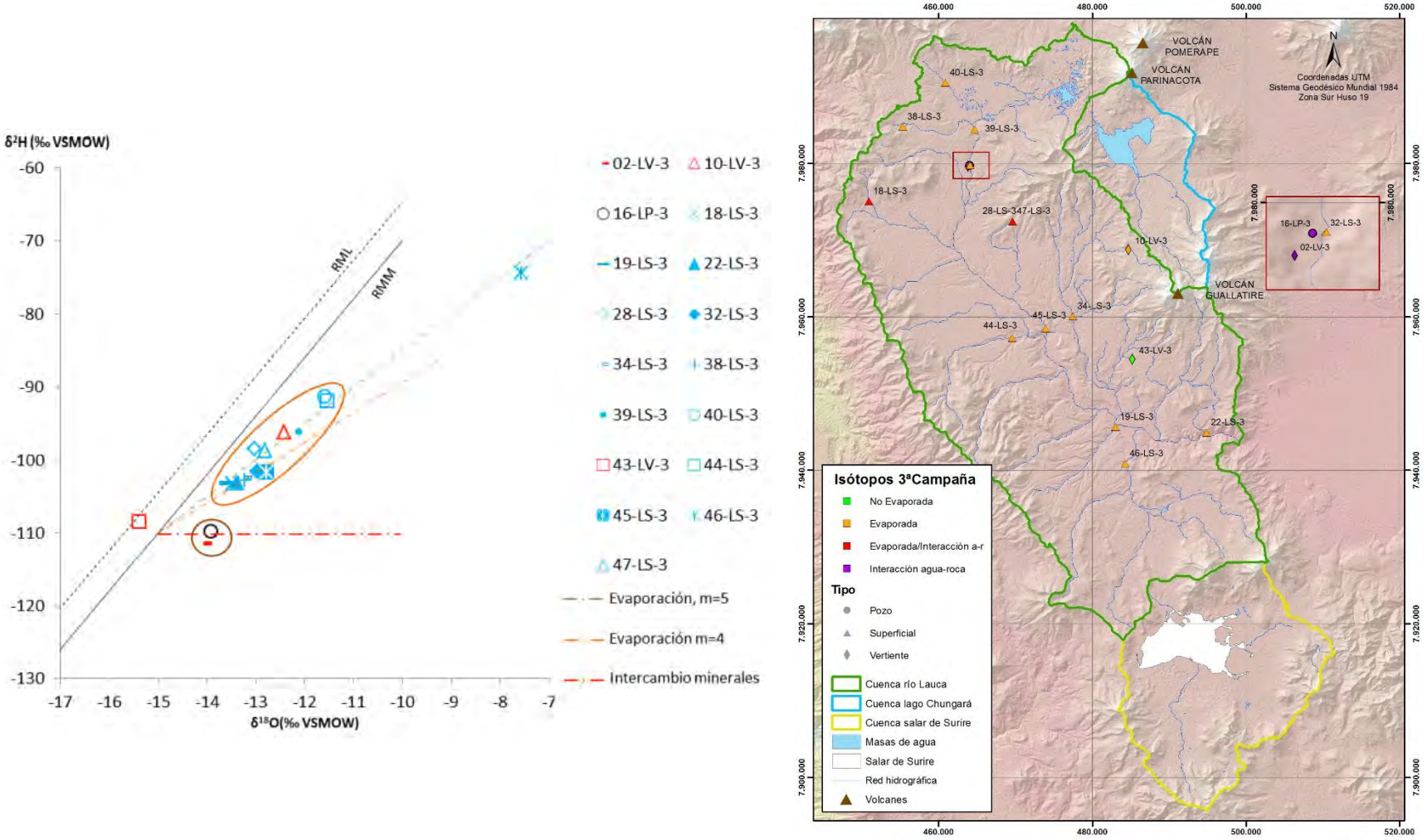


Figura 7.328 **Relación $\delta^{18}O/\delta D$ de las muestras analizadas en la cuenca del río Lauca en abril de 2015 por Matraz** (2015) y su ubicación. Fuente: Matraz (2015).

En la Figura 7.329 se muestran las 15 muestras de aguas analizadas en agosto de 2016 en la cuenca del río Lauca, de color azul se presentan las aguas superficiales de los ríos Lauca y Vizcachani, las aguas de las quebradas de color naranjo, el río Guallatire de color rojo, de color verde las aguas subterráneas tomadas de color verde, de color morado una vertiente y de color gris la vertiente hidrotermal Chiriguaya.

Las aguas del río Guallatire se encuentra entre la RML ($\delta D = 7{,}9\delta^{18}O + 14$) definida en Herrera *et al*. (2006) en la cuenca del lago Chungara, indicando que son aguas meteóricas livianas que no han sufrido ningún proceso que modifique el contenido de δD y $\delta^{18}O$ de las precipitaciones que recargan el acuífero. El resto de muestras superficiales indican diferentes grados de evaporación. La composición isotópica de las aguas del río Lauca en la bocatoma refleja que son aguas procedentes de las lagunas Cotacotani que sufren un alto grado de evaporación desde lámina libre. Aguas abajo se observa como a lo largo del río Lauca recibe desde el acuífero aguas menos evaporadas, siendo al final aguas poco evaporadas.

Según cita Matraz (2015) la composición isotópica de las aguas surgentes de los pozos y de la vertiente próxima al pozo N°6 del MOP reflejan una interacción agua-roca y el intercambio de isótopos que se puede producir entre ellos.

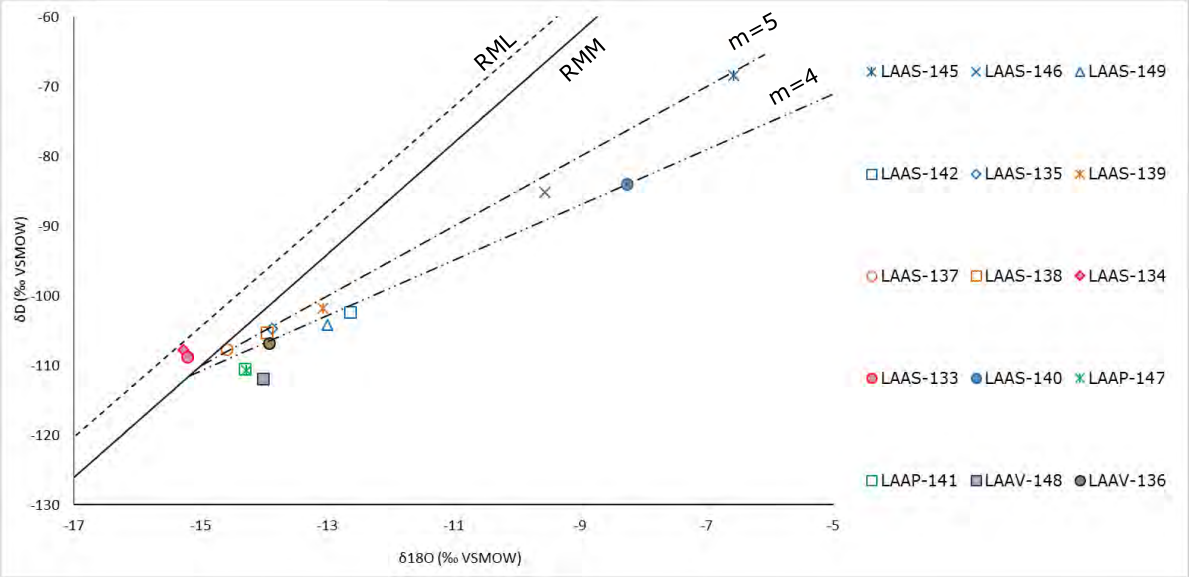


Figura 7.329 **Relación $\delta^{18}O/\delta D$ de las muestras** analizadas en la cuenca del río Lauca, agosto de 2016. Fuente: elaboración propia.

7.9.5 Modelo Conceptual

La cuenca del río Lauca corresponde a una subcuenca de un sistema mayor e internacional, correspondiente al salar de Coipasa que se ubica finalmente en Bolivia. La parte superior de la cuenca pertenecería al altiplano chileno, mientras que su zona media e inferior estaría en territorio boliviano. La cuenca del río Lauca tiene una superficie de 2.427 km^2. Limita al norte con la cuenca de los ríos Uchusuma y Caquena, al sur con la cuenca del salar de Surire, al este con la cuenca del lago Chungara y con Bolivia y al oeste con las cuenca de los ríos Lluta, San José y la quebrada Chaca-Vítor.

Los principales usos del suelo en la cuenca del río Lauca son praderas matorrales (63%), áreas sin vegetación (30%), humedales (5%) y nieves - glaciares (2%). Adicionalmente, el río Lauca, por el poniente recibe escurrimientos que gozan de alimentación desde cumbres englaciadas, entre ellos los ríos Chusjavida y Guallatire.

Las lagunas de Cotacotani controlan parte de la hidrología de la cuenca. Según DEP-DGA (2010), la laguna principal tiene una superficie aproximada de 6 km^2, la profundidad media asciende a los 10 m y la cota del espejo de agua se encuentra en promedio a 18 m más abajo que la del lago Chungara, lo que explicaría en parte su existencia, puesto que se presume de una conexión subterránea entre ambos cuerpos de agua. La salida superficial de las lagunas Cotacotani es el río Desaguadero, el cual alimenta a las ciénagas de Parinacota y está regulado con compuertas para controlar el caudal que se transfiere mediante el canal Lauca-Azapa en el nacimiento del río Lauca.

La cuenca se encuentra en una zona de alta variación térmica entre el día y la noche, y de alta pluviosidad, concentrada mayoritariamente en el periodo de noviembre y marzo. La precipitación media anual estimada con el método de las isoyetas es de 286,4 mm/año. Es válido considerar que una porción de la precipitación es interceptada por vegetación, otra caería directamente en los cuerpos de agua (lagunas, bofedales-humedales) y en depresiones, otra es evaporada y el agua que logra caer sobre la superficie de terreno posteriormente escurre hacia los cauces. El cauce del río lauca aumenta a medida que avanza el desarrollo en la cuenca, registrando caudales medios anuales de 410 l/s en el río Desaguadero en Cotacotani, de 150 l/s en río Lauca en Estancia el Lago, de 1200 l/s en canal Lauca en Sifón N°1 y

de 2540 l/s en río Lauca en Japu. Además el río Guallatire registra un caudal medio anual de 360 l/s en Guallatire.

Las precipitaciones se infiltran en las zonas de recarga que constituyen los conos volcánicos de Parinacota, Choquelimpie, Ajoya y Guallatire. A nivel de cuenca, la unidad hidrogeológica que constituye los principales acuíferos detríticos son los depósitos aluviales, fluviales y coluviales cuaternarios, depósitos detríticos aluviales de la Formaciones Lauca y Lupica (d).

En el sector de las lagunas de Cotacotani y ciénagas de Parinacota, el acuífero superior libre corresponde a los depósitos de avalancha del volcán Parinacota, mientras que el acuífero inferior lo constituyen las Formaciones Lauca y Lupica (d). Posteriormente, en el sector alto de la cuenca, la unidad acuífera compuesta por la Formación Lauca y la Formación Lupica OMI (d) está confinada por 40 m de ignimbrita Lauca, pero aguas abajo del anticlinal de Queñuacollo no existen depósitos ignimbrítico y pasa a ser un acuífero libre. En la Figura 7.330 se observa un pozo surgente que perfora la ignimbrita Lauca y desconfina las aguas subterráneas del acuífero inferior. Sin embargo, en el sector bajo de la cuenca, los primeros 40 m de la Formación Lauca son de material muy fino que provocan una desconexión entre el acuífero y el río, por eso en este tramo de río no recibe un importante aporte de agua subterráneo desde el acuífero al río, sino que recibe la escorrentía superficial de ríos y quebradas.

Figura 7.330 Pozo N°6 propiedad del MOP ubicado en el sector norte de la cuenca del río Lauca. Fuente: elaboración propia.

La composición hidroquímica e isotópica de las aguas superficiales de la bocatoma del río Lauca refleja que su origen son las lagunas de Cotacotani y las ciénagas de Parinacota, siendo sulfatadas-bicarbonatadas magnésicas con concentración relativamente alta de elementos mayores, pH alcalino y conductividad entre 700-500 µS/cm. En el tramo de la cabecera del río Lauca, donde el río Lauca se alimenta del aporte de aguas subterráneas procedentes del acuífero superior, son aguas alcalinas, frescas y bicarbonatadas magnésico-sódicas, hasta la altura del pozo del MOP N°6 donde son sulfatadas sódicas. Las aguas subterráneas que surgen del pozo N°6 son aguas neutras, frescas, bicarbonatadas cálcicas y muy poco mineralizadas, mientras que las superficiales del río son sulfatadas sódicas. A partir de este sector, las aguas del río Lauca van evolucionando a bicarbonatadas. Por otro lado, la composición hidroquímica del río Vizcachani indica que son aguas que proceden principalmente del acuífero semiconfinado.

Las quebradas del complejo volcánico Choquelimpie-Ajoya son aguas jóvenes, similares a las precipitaciones que recargan al acuífero fracturado. En cambio, el río Guallatire son aguas neutras-alcalinas, con una conductividad eléctrica entre 850 y 1.000 µS/cm y sulfatadas cálcico-magnésicas, reflejo de la circulación e interacción con

el material que constituye el acuífero fracturado del volcán Guallatire. Por último, la vertiente hidrotermal Chiriguaya son las aguas más mineralizadas de la cuenca.

Los resultados de la calidad de las aguas analizadas en agosto de 2016 indican que solo las aguas del río Vizcachani y de la naciente del río Guallatire son aguas aptas para el consumo humano.

Según se puede observar en la Figura 7.331, las principales entradas del sistema superficial corresponden a las precipitaciones, y al sistema subterráneo el aporte del flujo subterráneo lateral desde la cuenca del Lago Chungara y a la recarga de los acuíferos, cuya principal fuente la constituye la recarga por precipitación que se infiltra sobre todo en las cotas altas. Y las principales salidas superficiales la constituyen el trasvase del canal Lauca-Azapa, la descarga del río Lauca a Bolivia, la evaporación de los espejos de agua y la evapotranspiración de las vegas y bofedales; y las principales salidas subterráneas corresponden a la descarga subterránea hacia Bolivia por Japu, el aporte de agua subterránea al río Lauca, las extracciones desde algunos pozos y en menor magnitud, en afloramientos de aguas frías e hidrotermales que crean escorrentía superficial y en las surgencias de los pozos que alimentan al río Lauca. En ésta se muestran las componentes de recarga y descarga del sistema hidrológico (cuenca) y de sistema hidrogeológico (acuífero).

Figura 7.331 Esquema del modelo conceptual hidrogeológico de la cuenca del río Lauca. Fuente: modificado de la capa uso del suelo tomada del portal web del SINIA http://ide.mma.gob.cl/.

7.10 Cuenca del Salar de Surire

La cuenca del Salar de Surire tiene una superficie de 552 km^2 y el área que ocupa el Salar es de 61,7 km^2. Es una cuenca cerrada que se desarrolla casi completamente en territorio chileno, a excepción de una pequeña proporción correspondiente a la cabecera de los afluentes que descienden desde la ladera noroccidental del cerro Lliscaya y el cerro Quilhuiri. Limita al Sur con el Cerro Chiguana y la región de Tarapacá, al norte con el Cerro Arintica y la cuenca del río Lauca, el de mayor altitud (5.597 msnm), al noreste con el Cerro Vinto, al este con Bolivia, al suroeste con el Cerro Mulluri y al oeste con el Cerro Chuquiananta.

En la Figura 7.332 se presenta la ubicación de la cuenca del Salar de Surire y su red de drenaje.

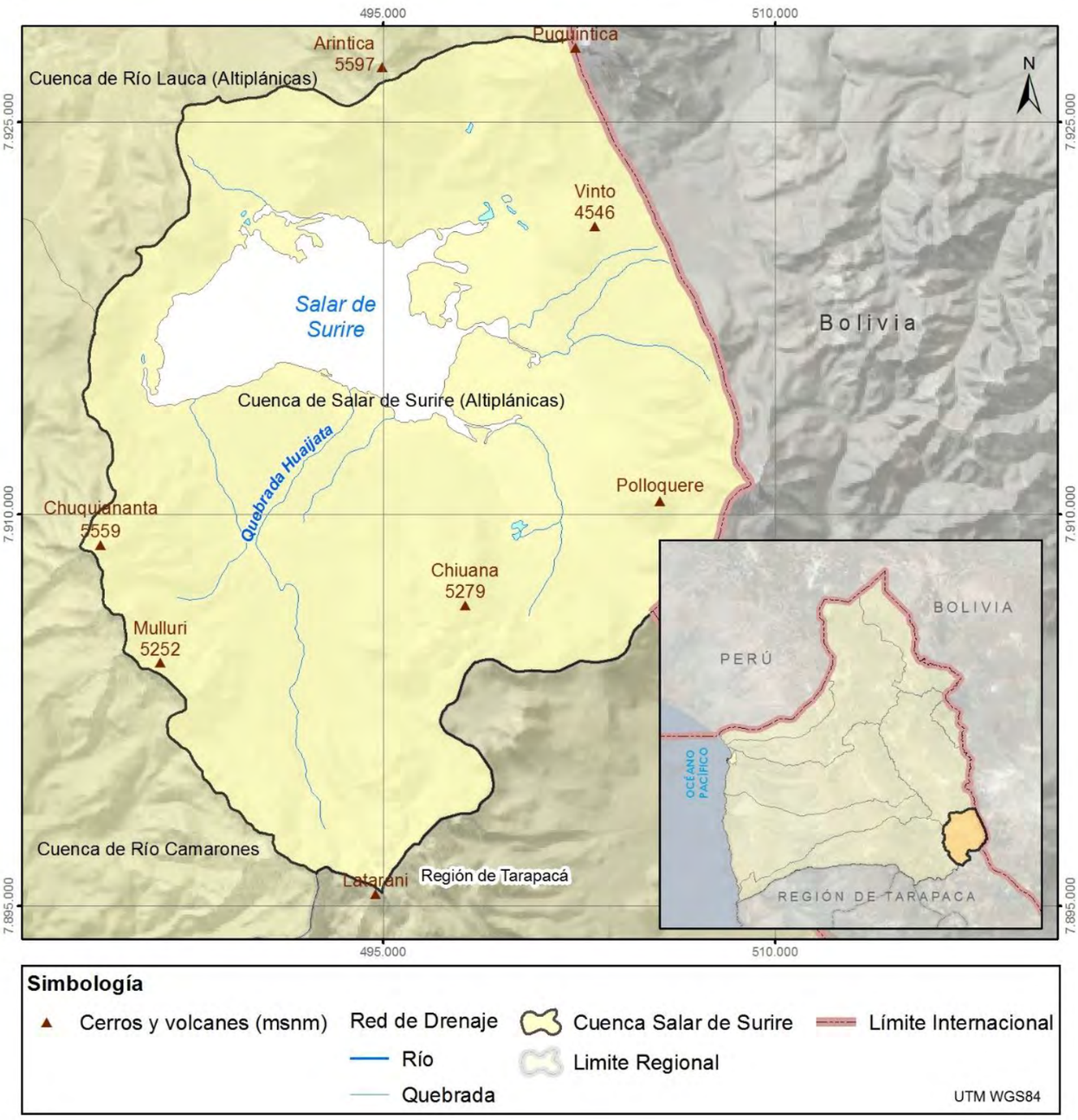


Figura 7.332 Ubicación de la cuenca del salar de Surire. Fuente: elaboración propia.

7.10.1 Caracterización Hidrológica

7.10.1.1 Definición y caracterización de la cuenca del Salar de Surire

Los escurrimientos superficiales de la cuenca drenan al Salar a través de numerosas pequeñas quebradas que han dado origen a diversos conos aluviales, entre los cuales cabe destacar el cono aluvial del río Surire. El conjunto de estas aguas escurre de Este a Oeste sobre la superficie del Salar, a través de dos amplios drenajes interiores de poca profundidad: el río Blanco que está en el centro y el río La Colonia que bordea la zona sur y que drena en períodos estivales a la laguna denominada La Jaula en el extremo suroeste.

El río Surire, también denominado quebrada Huaijata, es el curso superficial principal del Salar, se origina en la zona sur-oeste de la cuenca, a partir de las vertientes de los cerros Mulluri, Chiguana, Pumire y Surire. Su caudal aumenta notablemente en el período estival extendiendo de esa manera su curso hasta las lagunas interiores del Salar.

Por su parte, las vertientes más importantes por su aporte en volumen de agua y contenido salino son aquellas ubicadas dentro de la zona geotérmica en la parte sureste, en este sector aflora agua caliente con gran contenido de iones y que fluye con un caudal importante hacia el río La Colonia por el oeste. De acuerdo al documento "Plan de manejo monumento natural Salar de Surire" liderado por CONAF (2000), la vertiente característica de esta zona es la llamada Polloquere que ha formado una laguna de unos 60 metros de diámetro y cuyo chorro hirviente (85°C) brota humeante y sobresale de la superficie de agua.

Otras características de esta cuenca que la hace distintiva, tal como lo menciona DICTUC (2009), corresponde a la explotación de Bórax, los géiseres y su categoría de sitio Ramsar debido a su alta biodiversidad.

DELIMITACIÓN DE LA CUENCA

En la Figura 7.332 se muestra la delimitación y red de drenaje de la cuenca del Salar de Surire. El criterio utilizado para la delimitación se explicó en el apartado "Definición

y Caracterización de las Cuencas de la Región" en el capítulo de "Análisis Regional". De manera resumida el criterio es básicamente topográfico.

CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS DE LA CUENCA

La morfología de la cuenca del salar de Surire es un referente para establecer la dinámica esperada de la escorrentía superficial y se caracteriza por el análisis de tres parámetros, los relativos a la forma, al relieve y a la red de drenaje. Éstos se calcularon con el uso de SIG, además de utilizar expresiones matemáticas para este fin. La metodología se muestra en detalle en el Anexo VI.

En relación a la forma, la cuenca tiene un coeficiente de compacidad (K_G) de 1,23, por tanto su forma es redonda. La densidad del drenaje de la cuenca del salar de Surire definida como la longitud total de los cauces sobre el área de la cuenca, en este caso fue de 0,12 km/km^2 que corresponde a una densidad de drenaje pobre. Sin embargo, por las características de topografía regular del Salar, las lagunas presentan una dinámica activa, mostrando variaciones significativas en sus formas y tamaño durante el año, siendo influenciadas fuertemente por la ocurrencia de las lluvias estivales. Así, durante el verano, la relación entre las lagunas aumenta al incrementar el tamaño de sus espejos de agua, llegando muchas de ellas a unirse entre sí y a formar grandes lagunas cuyos tamaños cubren gran parte de la superficie del Salar.

Otra característica morfológica de importancia en la cuenca es el relieve. Para ello se construyó la curva hipsométrica, a partir del modelo digital de elevación DEM, cuya representación se presenta en la Figura 7.333. Allí se nota que la cota mínima es de 4.305 msnm y la máxima es de 5.728 msnm. Sin embargo, el 50% de la cuenca tiene una altura superior a los 4.415 msnm.

De acuerdo a la metodología presentada en el Anexo VI, esta curva hipsométrica se clasifica de tipo C y corresponde a una cuenca sedimentaria que está en la fase de vejez.

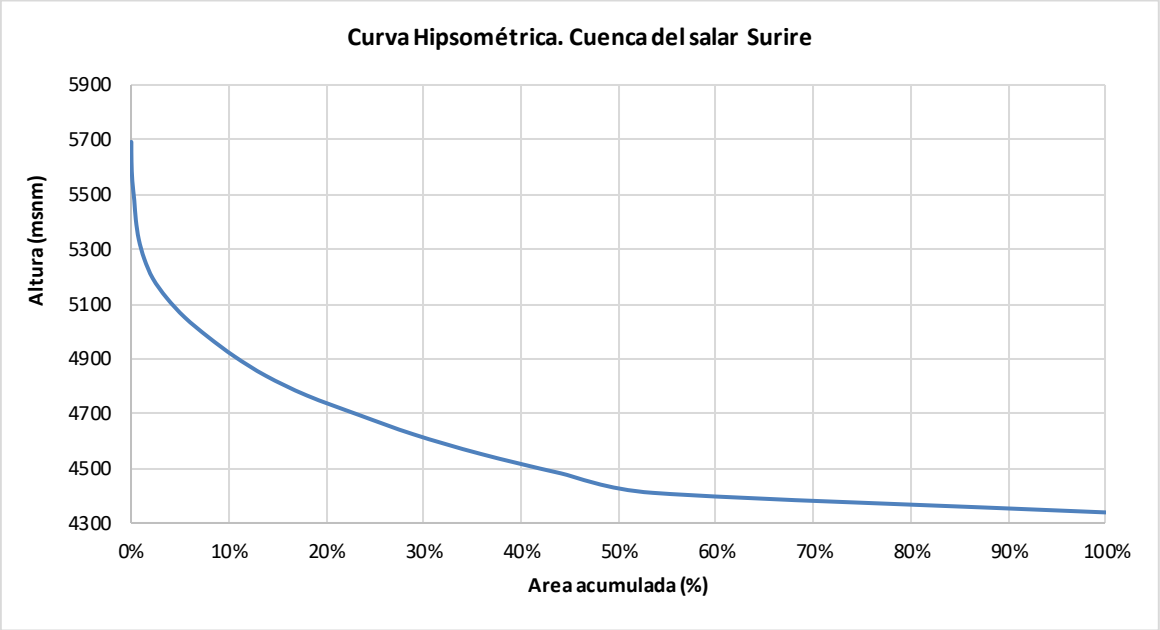


Figura 7.333 Curva hipsométrica de la cuenca del salar de Surire. Fuente: elaboración propia.

7.10.1.2 Caracterización de la red de drenaje

El diagrama Unifilar del Salar Surire se indica en la Figura 7.334. En este se incluyen las quebradas aportantes, en el que sólo un par cuenta con nombre identificado. No se cuenta con estaciones fluviométricas en la cuenca, por lo tanto no se conoce el caudal medio anual que traería los escurrimientos.

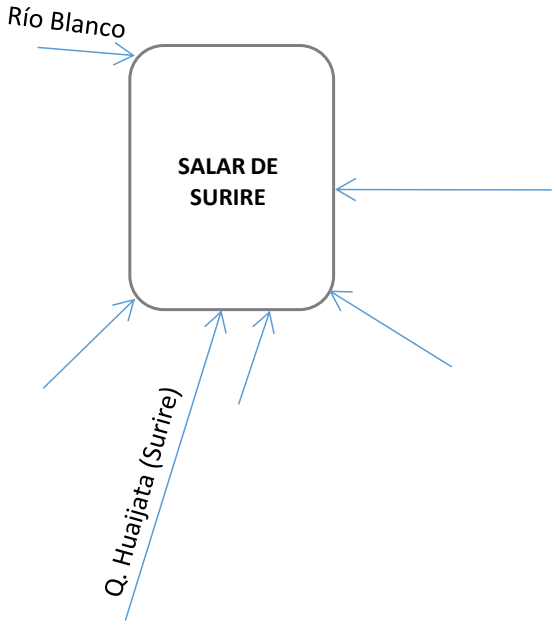


Figura 7.334 Diagrama Unifilar del salar Surire. Fuente: elaboración propia.

7.10.1.3 Hidrometeorología

La cuenca del Salar de Surire cuenta con registros históricos de la estación meteorológica DGA de Chilcaya. Adicionalmente, se consideraron las estaciones Pumire y Chungara Reten como de apoyo en la cuenca. Las coordenadas y periodos de información disponible de las estaciones se presentan en la Tabla 7.206. Cabe mencionar que la estación Chilcaya cuenta con mediciones de la variable temperatura desde la década de los 80's y contó en su momento hasta el año 1999 con medición de evaporación potencial.

En adelante el análisis de las variables hidrometeorológicas de la cuenca se realiza a nivel regional, con la finalidad de incluir un mayor número de estaciones localizadas en cuencas vecinas con características hidrológicamente similares.

Tabla 7.206 Coordenadas y periodo de información de las estaciones meteorológicas en la cuenca. Fuente: elaboración propia.

Estación Meteorológica DGA	Código BNA	DATUM WGS84 H19S		Altitud	Periodo	Años	Estado
		UTM Este	UTM Norte				
Chilcaya	01030003-7	491.101	7.921.976	4.270	1971-2014	44	V
Chungara Retén	01010007-0	485.379	7.978.738	4.570	1968-2014	47	V
Pumire*	01610003-K	488.142	7.888.269	4.150	1962-1991	30	S

V: Vigente, S: Suspendida. * Estación ubicada en la I Región de Tarapacá.

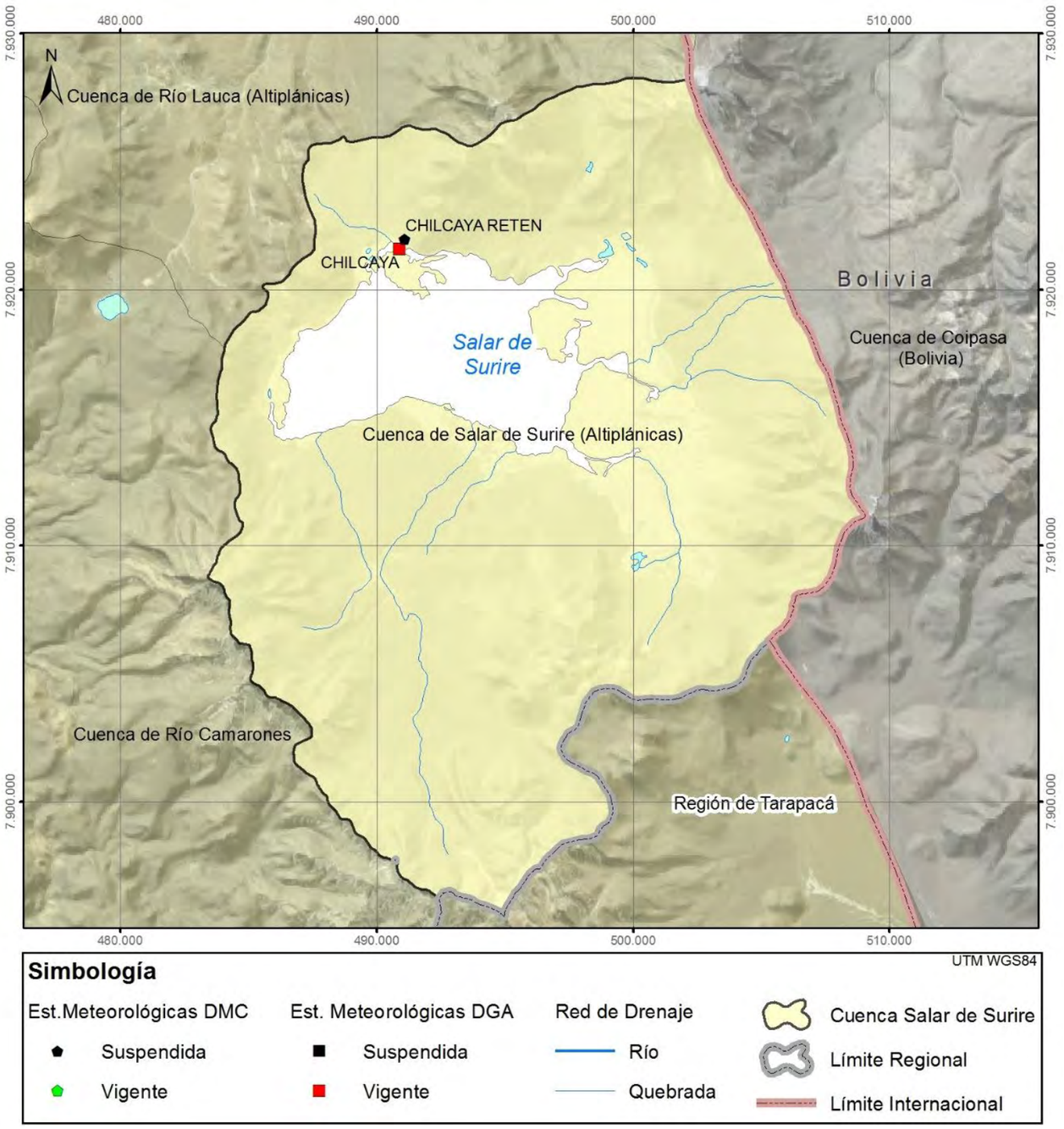


Figura 7.335 Ubicación estaciones meteorológicas en la cuenca del salar de Surire. Fuente: elaboración propia.

PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL Y MEDIA MENSUAL

Para el análisis de la precipitación media anual y media mensual se tomaron los registros de 30 años (periodo 1985 al 2014) de las estaciones pluviométricas existentes, que permiten analizar las variaciones de la precipitación. En la Figura 7.336 se presenta el registro de la precipitación media anual en la estación Chilcaya [4.270 msnm] localizada en dirección noreste dentro de la cuenca.

En ésta se observan los años húmedos, secos y promedio que se han presentado en la cuenca. Los años más húmedos en el periodo analizado, han sido 1985, 1986, 1999, 2001 y 2013. Por el contrario los años más secos en los últimos 30 años fueron 1989, 2009 y 2010.

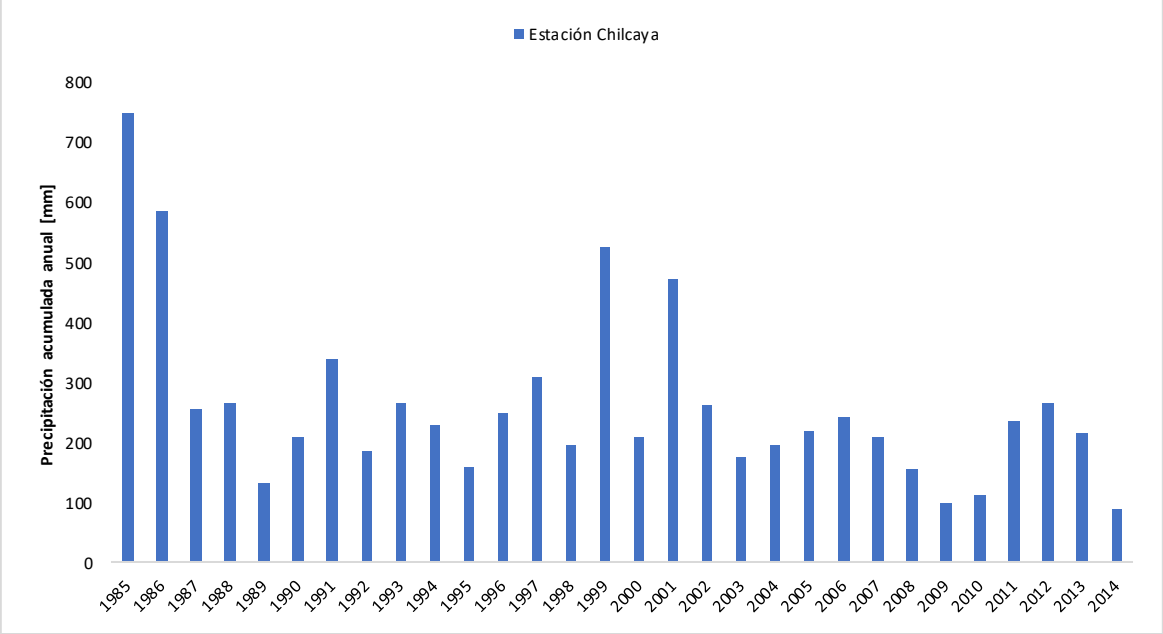


Figura 7.336 Precipitación media anual registrada en la estación Chilcaya en la cuenca del Salar de Surire. Fuente: elaboración propia.

A nivel regional se trazaron las isoyetas de precipitación media anual, construidas a partir de los datos registrados en 28 estaciones meteorológicas, 24 de ellas ubicadas en la XV Región de Arica y Parinacota y las 4 restantes en la I Región de Tarapacá. La información utilizada de las estaciones fue previamente completada y analizada, como se explicó en el subcapítulo "Análisis de las variables espacial y temporal" del capítulo "Análisis Regional".

De esta manera, haciendo un zoom en la cuenca del Salar Surire, las isoyetas de precipitación se presentan en la Figura 7.337. Se observa que la precipitación media anual en la cuenca es del orden de los 250 mm a los 400 mm al año, siendo esta una cuenca con altitudes elevadas (> 4.000 msnm), que registra lluvias intensas. En la Tabla 7.207 se especifica la precipitación ponderada de acuerdo al área de influencia entre isoyetas, obteniendo que la precipitación media anual en la cuenca es del orden de los 351,7 mm.

Tabla 7.207 Ponderación de la precipitación según área de influencia entre isoyetas en la cuenca del salar de Surire. Fuente: elaboración propia.

Isoyetas de Precipitación (mm)		Área entre isoyetas (km^2)	Precipitación media multianual 1985-2014 (mm)
<	300	93,1	27.933
300	400	309,0	108.133
250	400	25,1	8.167
>	300	124,6	49.824
			351,7 Precipitación media anual en la cuenca

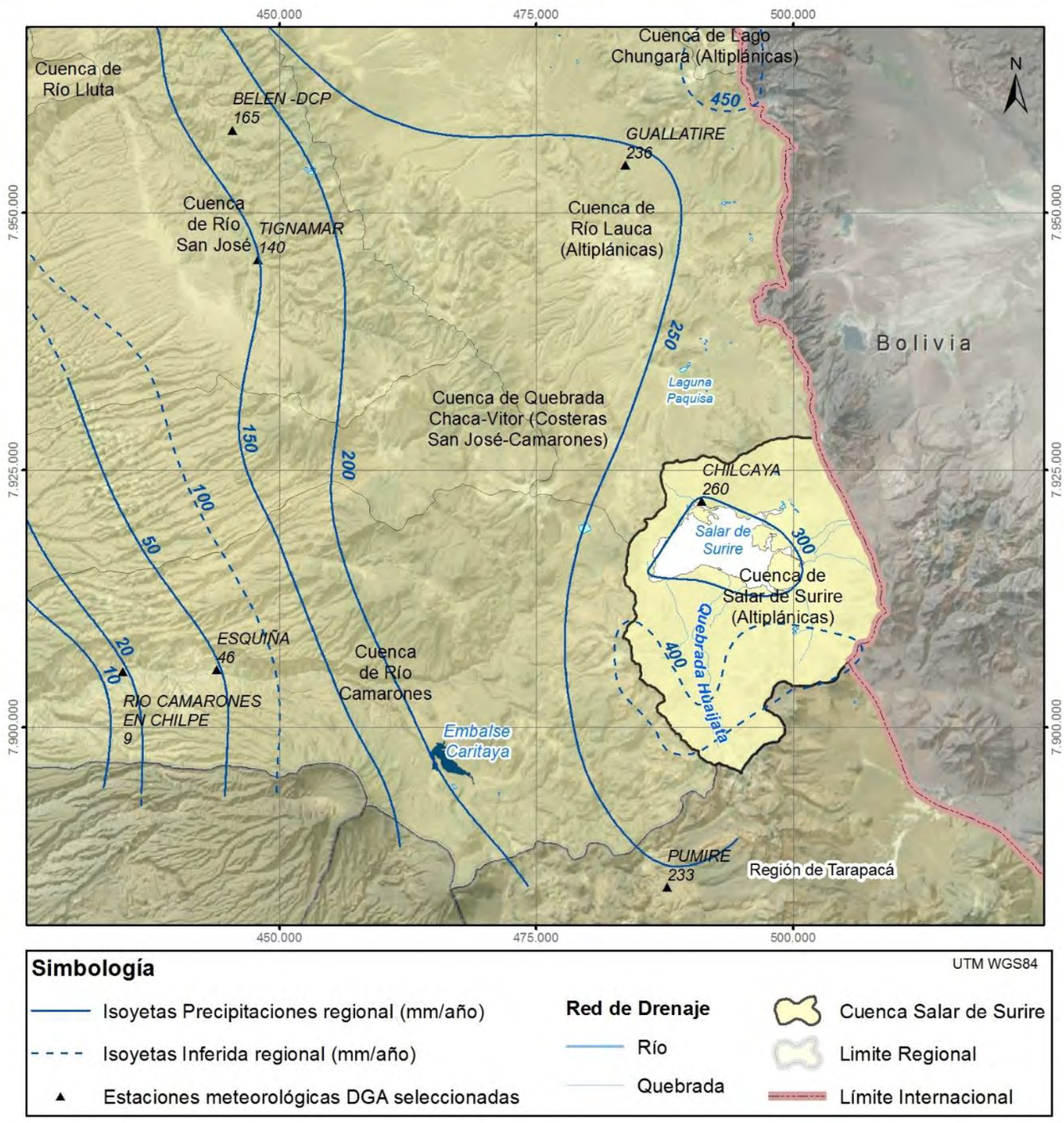


Figura 7.337 Isoyetas de precipitación media anual regional en la cuenca del salar Surire. Fuente: elaboración propia.

La magnitud de la precipitación media mensual en la cuenca se presenta en la Tabla 7.208 y de manera gráfica se observa la variación temporal en la Figura 7.338. Las lluvias se concentran en los meses de diciembre, enero, febrero y marzo, del orden de los 30 mm a 104 mm. El mes más seco es septiembre registrándose precipitaciones de 0 y 1 mm.

Tabla 7.208 Precipitación media mensual en la cuenca del salar Surire. Fuente: elaboración propia.

Estación pluviométrica DGA	Altitud [msnm]	Precipitación media mensual [mm] periodo 1985-2014												
		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Pp ACUM
Chilcaya	4.270	90	70	49,3	11,1	1,1	0,4	2,1	0,9	0,3	0,6	3,7	29,8	260
Chungara Reten	4.570	104	74	45,2	8,3	2,2	3,0	10	1,6	0,9	2,4	8,2	38,4	299
Pumire*	4.150	75	88	33	6	1	1	1	2	5	1	2	18	233

* Estación ubicada en la I Región de Tarapacá considerada para el análisis, datos tomados de DICTUC (2008)

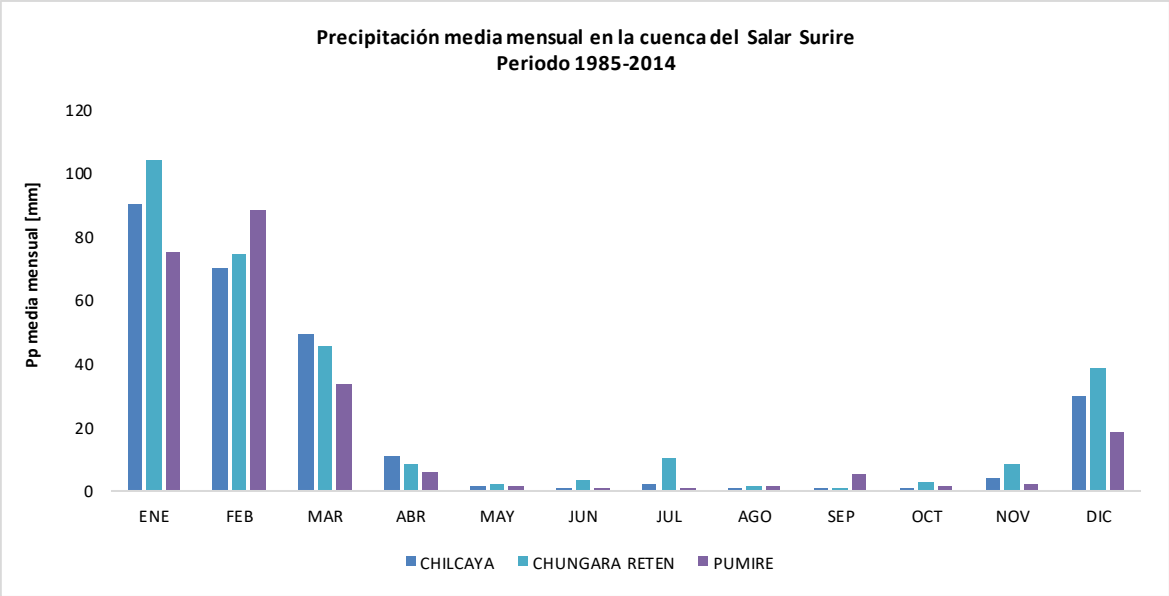


Figura 7.338 Variación de la precipitación media mensual en la cuenca del salar Surire. Fuente: elaboración propia.

EVAPORACIÓN MEDIA ANUAL Y MEDIA MENSUAL

Para el análisis de la evaporación media se consideraron todas las estaciones ubicadas en las cuencas altiplánicas de la región que contarán con registros anuales superior a 9 meses. En la Tabla 7.209 se referencian las coordenadas y periodos utilizados.

Por otro lado, en el subcapítulo "Evapotranspiración" del componente "Análisis Regional", se presentan todas las estaciones meteorológicas de la XV Región de Arica y Parinacota y I Región de Tarapacá que miden evaporación potencial de tanque tipo A y cuyo análisis se realiza más detallado.

Tabla 7.209 Coordenadas y periodo de información de las estaciones con medición de evaporación tanque tipo A. Fuente: elaboración propia.

Estación Meteorológica DGA	Código BNA	DATUM WGS84 H19S		Altitud	Periodo	Años	Estado del Tanque
		UTM Este	UTM Norte				
Caquena	01001005-5	478.658	8.003.810	4.400	1981-1990	9	S
Parinacota Ex Endesa	01020017-2	471.626	7.987.205	4.420	1985-1997	12	S
Chungara Ajata	01010010-0	480.618	7.983.774	4.585	1984-2011	27	V
Cotacotani	01020014-8	475.323	7.989.490	4.500	1960-1989	29	S
Coyacagua *	01050007-9	517.429	7.782.949	3.990	1964-2006	42	V
Pampa Lirima Lagunilla *	01730018-0	515.706	7.805.083	3.940	1982-2006	24	V

V: Vigente, S: Suspendida. * Estación ubicada en la I Región de Tarapacá, datos tomados de DICTUC (2008).

Los registros de la evaporación potencial media mensual se presenta en la Tabla 7.210. La mayor evaporación en las cuencas altiplánicas, entre ellas la del Salar de Surire, ocurre en los meses de septiembre, octubre, noviembre y diciembre. Los valores más bajos de evaporación se registran en los meses de junio y julio. A escala regional en relación a la cuenca, se estima una tasa de evaporación potencial media anual entre 4,5 y 5,5 mm/d.

Tabla 7.210 Evaporación potencial mensual en las cuencas altiplánicas. Fuente: elaboración propia.

Estación pluviométrica DGA	Evaporación del tanque tipo A mensual [mm]												
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
Caquena	127	122	122	116	128	93	102	122	144	155	168	166	1.565
Parinacota Ex Endesa	134	128	132	142	125	121	119	136	147	172	162	154	1.672
Chungara Ajata	85	86	105	124	120	106	103	115	136	154	156	140	1.430
Cotacotani	129	117	129	158	161	147	153	166	183	214	213	184	1.954
Coyacagua *	197	175	194	185	153	127	134	155	188	228	241	241	2.218
Pampa Lirima Lagunilla *	182	161	187	159	141	103	105	136	168	218	224	221	2.005

* Estación ubicada en la I Región de Tarapacá sobre las cuencas altiplánicas, datos tomados de DICTUC (2008).

DGA (1986) realizó una estimación de la evaporación anual desde el salar, a partir de los parámetros del balance hídrico, cuyo valor fue de 1840 l/s. En la Tabla 7.211 se muestra los demás valores considerados en el estudio.

Tabla 7.211 Estimación de la evaporación anual desde el Salar. Fuente: DGA (1986). *Determinado efectuando balance hídrico.

Salar	Escorrentía afluente al salar [l/s]	Precipitación sobre el salar [l/s]	Evaporación desde el salar [l/s] *
SURIRE	660	1.180	1.840

7.10.1.4 Fluviometría

En la cuenca del Salar de Surire no existen estaciones de control fluviométrico, por lo tanto no se cuenta con registros de series de caudales históricos.

Quiborax (2009) en el documento "Programa de seguimiento ambiental: Extracción de Ulexita en el Salar de Surire, calidad de agua, biota y paisaje", comenta que el Salar representa el nivel base del sistema de drenaje de la cuenca y que posee un escurrimiento estacional de régimen pluvio-nival. Los cursos que fluyen hacia el Salar son intermitentes, se pierden en su mayoría por infiltración. Sólo durante la época estival, cuando aumentan las precipitaciones, se activa el río Surire, principal afluente de la cuenca.

7.10.1.5 Levantamiento Hidrológico

Para el presente estudio se realizaron dos campañas de terreno, en donde se seleccionaron 8 puntos de medición. Los métodos de aforo utilizados fueron con molinete, de marca *SEBA* y modelo *Universal Current Meter F1*, y de forma manual, explicado detalladamente en el anexo VI.

Por otra parte, como antecedentes de la cuenca, se tienen registros de niveles de 13 puntos de monitoreo que incluye lagunas, pozos y vertientes. Esta información fue levantada por Quiborax (2009), dentro del plan de monitoreo ambiental desde el año 1999 al 2009.

En la Tabla 7.212 se especifican las coordenadas de los puntos medidos tanto históricos como recientes, y en las Figura 7.339 y Figura 7.340 se muestra su localización en la cuenca. Los resultados de los niveles históricos se presentan en

forma gráfica la tendencia (Figura 7.341) y los de las campañas de aforo recientes se presentan en la Tabla 7.212.

Tabla 7.212 Coordenadas de los puntos aforados en estudios de referencia y campaña reciente. Fuente: elaboración propia.

Sitio de Medición de nivel / Aforo	ID	DATUM WGS84 H19S		Año	Estudio de referencia
		UTM Este	UTM Norte		
Vertiente refugio CONAF	S1	485.100	7.915.386	1999-2009	Quiborax (2009)
Laguna CONAF	S2	486.069	7.914.468		
Laguna interior	S3	490.158	7.915.184		
Termas Polloquere	S4	500.163	7.908.827		
Laguna Termas	S5	500.050	7.909.215		
Laguna en río Blanco	S6	502.043	7.913.814		
Laguna El Bote	S7	494.170	7.921.270		
Laguna Retén Chilcaya	S8	491.363	7.921.590		
Laguna campamento Chilcaya	S9	489.299	7.920.165		
Vertiente campamento Chilcaya	S11	489.261	7.920.387		
Campamento Chilcaya pozo observación A	Pozo 1	489.205	7.929.720		
Campamento Chilcaya pozo observación B	Pozo 2	489.294	7.929.745		
-	SUAS-94	484.009	7.920.655	2015-2016	ICASS (2016)
-	SUAS-96	502.546	7.915.986		
-	SUAS-97	500.074	7.908.789		
-	SUAS-98	491.716	7.907.109		
-	SUAS-99	491.424	7.910.232		
-	SUAS-100	485.037	7.915.318		
-	SUAS-123	494.831	7.912.704		
-	SUAS-33	439.904	7.988.077		

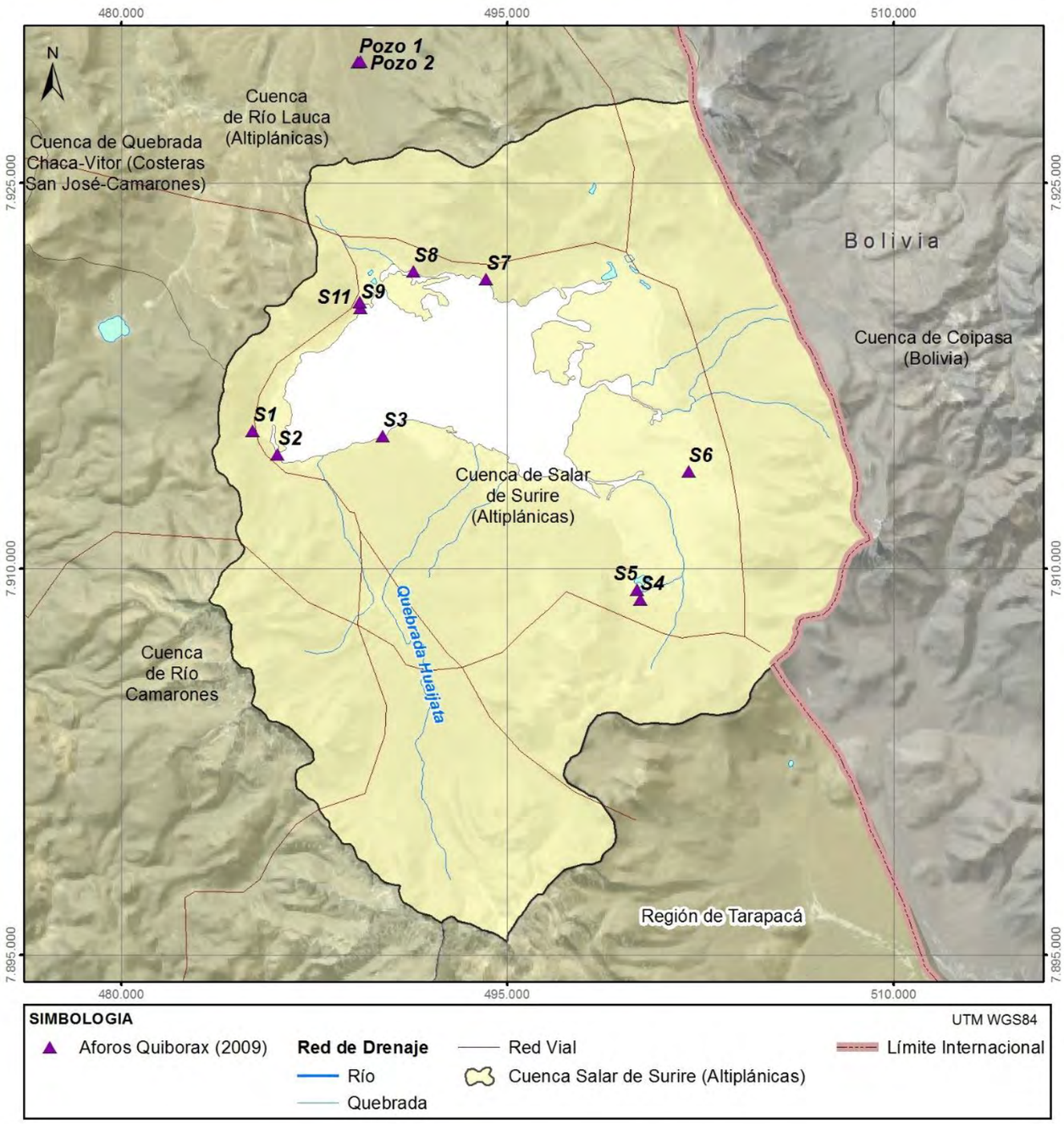


Figura 7.339 Localización de los aforos históricos en la cuenca del Salar de Surire. Fuente: elaboración propia.

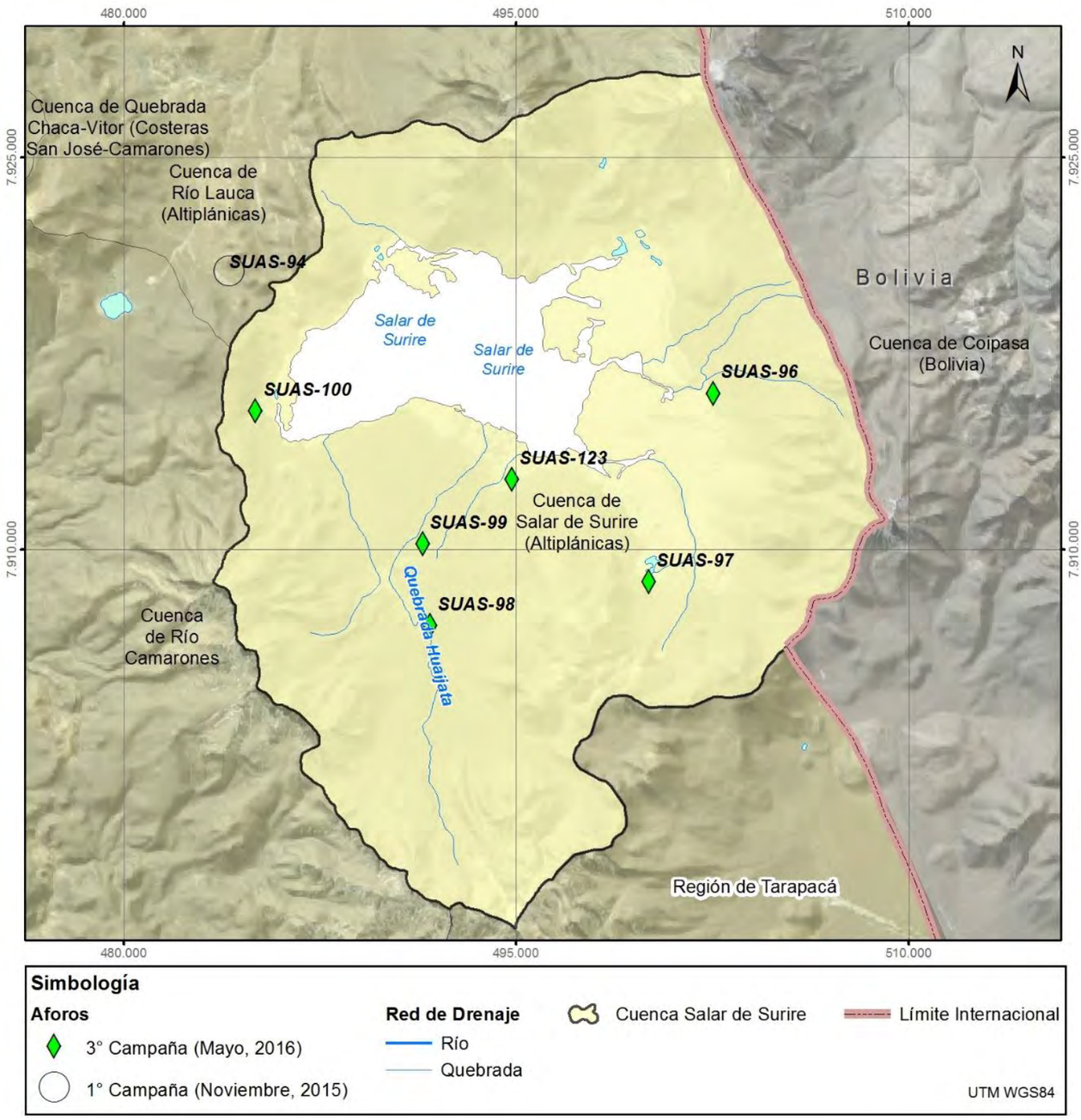


Figura 7.340 Localización de las campañas de aforo en la cuenca del Salar de Surire. Fuente: elaboración propia.

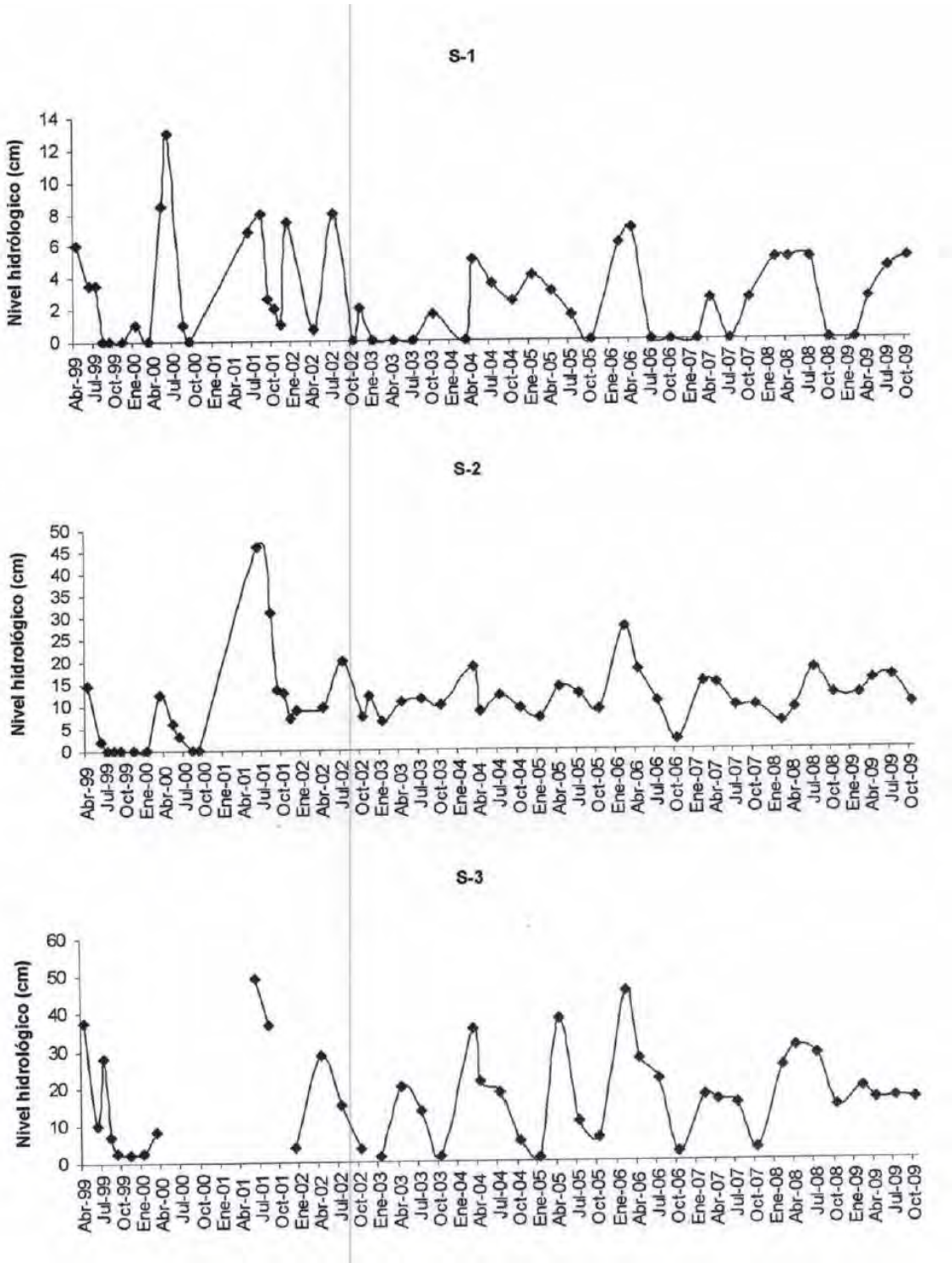
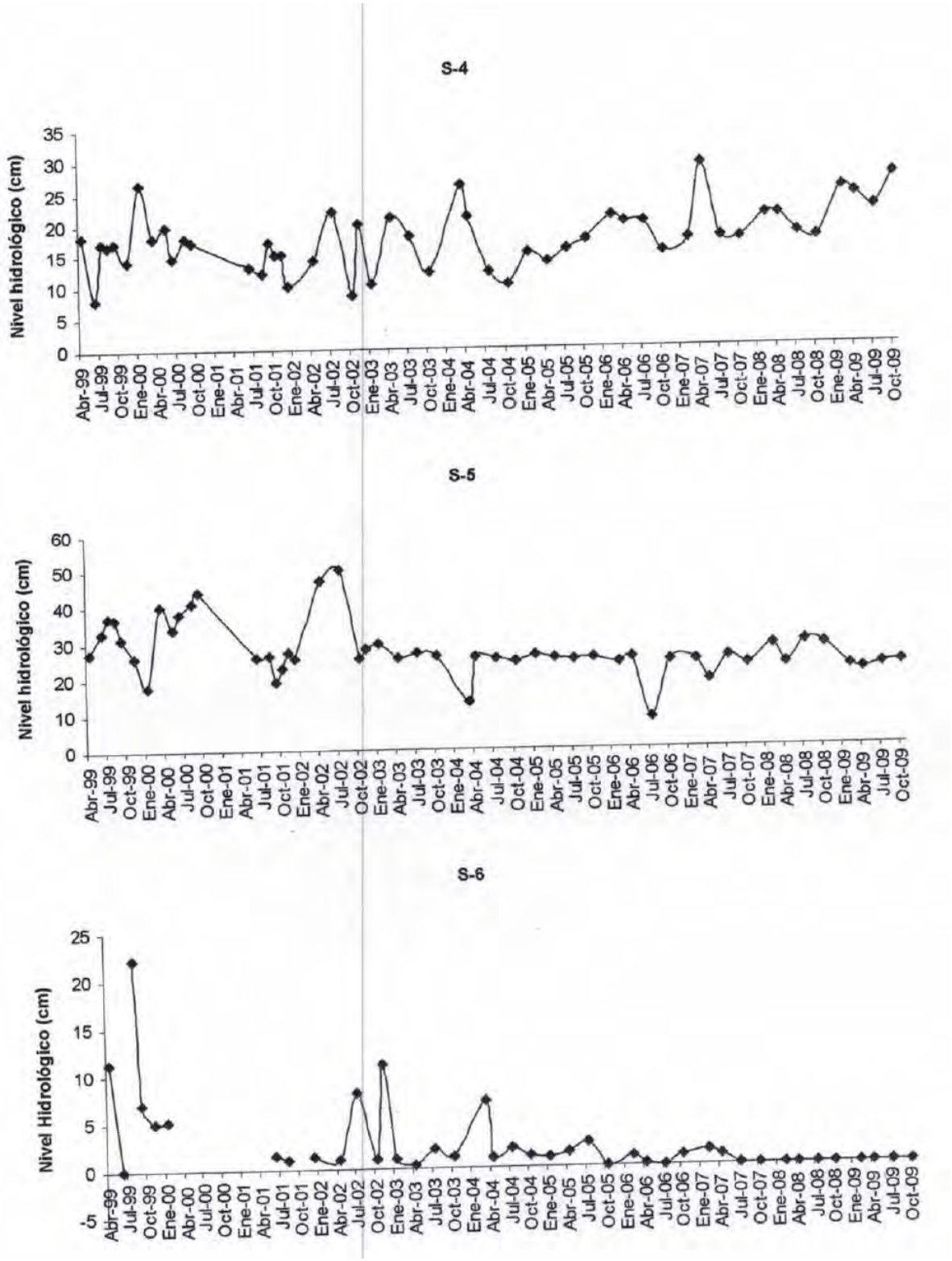
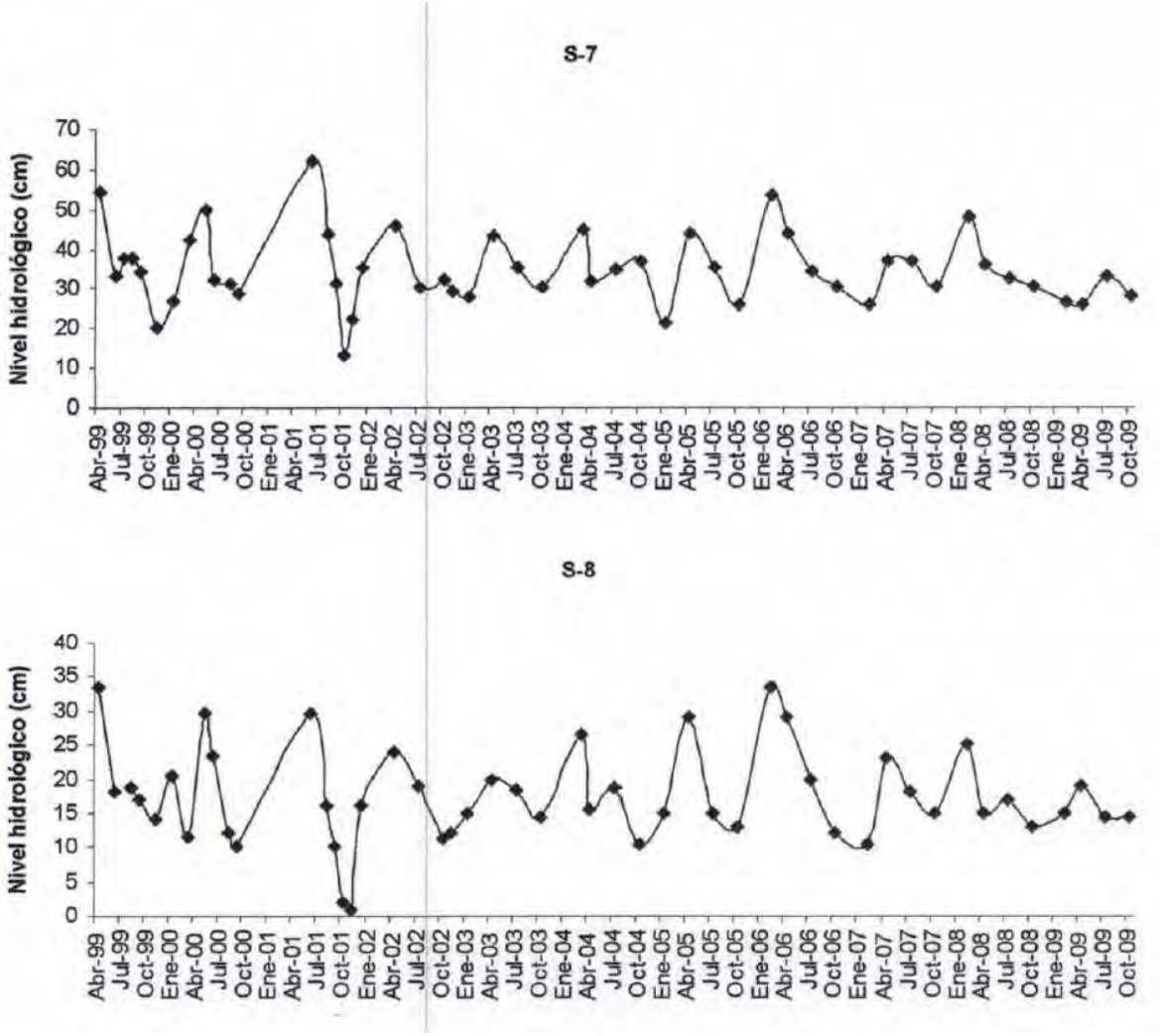


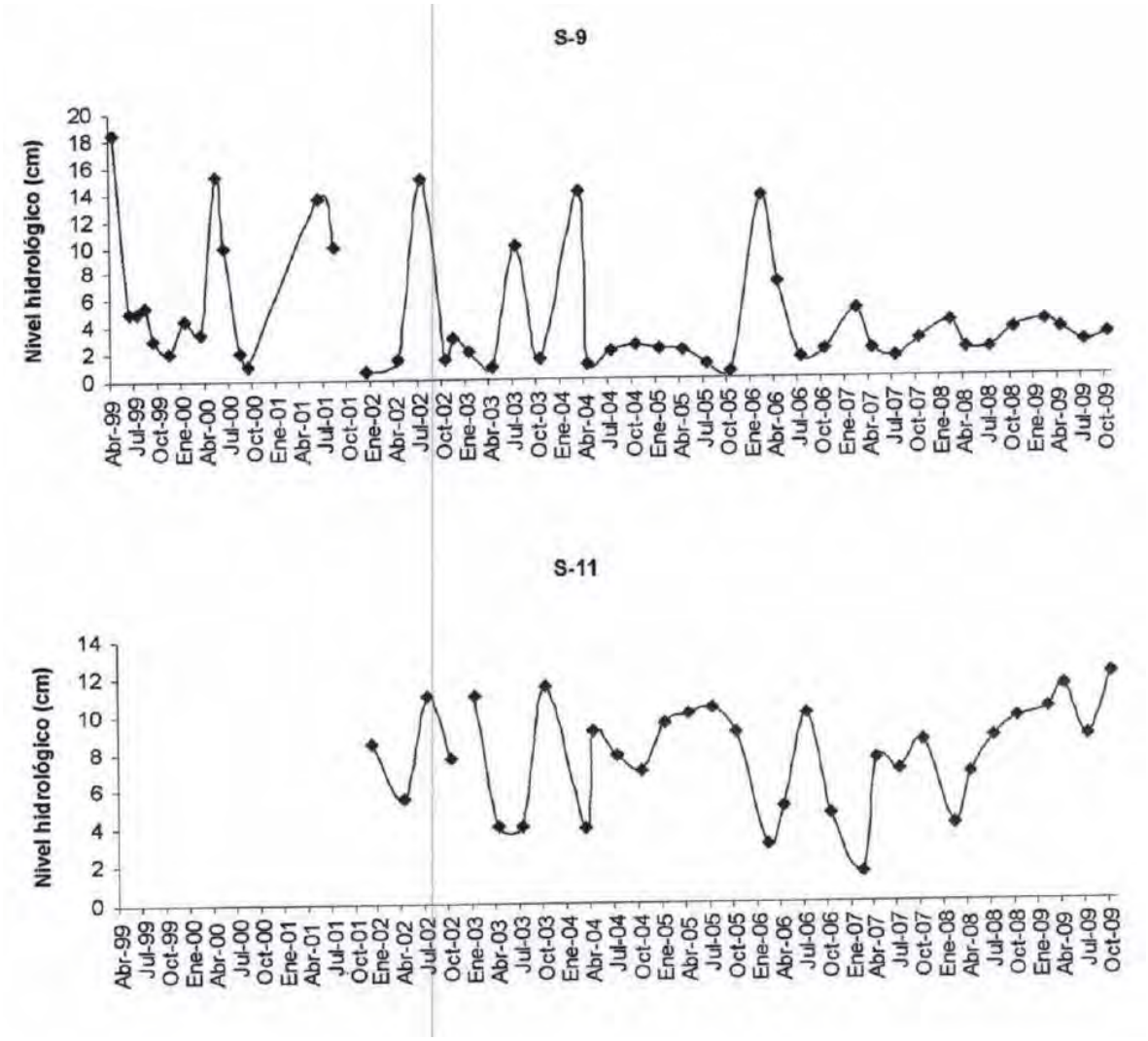
Figura 7.341 Fluctuación de niveles en los puntos de monitoreo seleccionados en la cuenca del Salar de Surire. Fuente: **"Programa de Seguimiento Ambiental, Extracción de Ulexita en el Salar de Surire" de Quiborax (2009).**
Continúa en páginas siguientes.



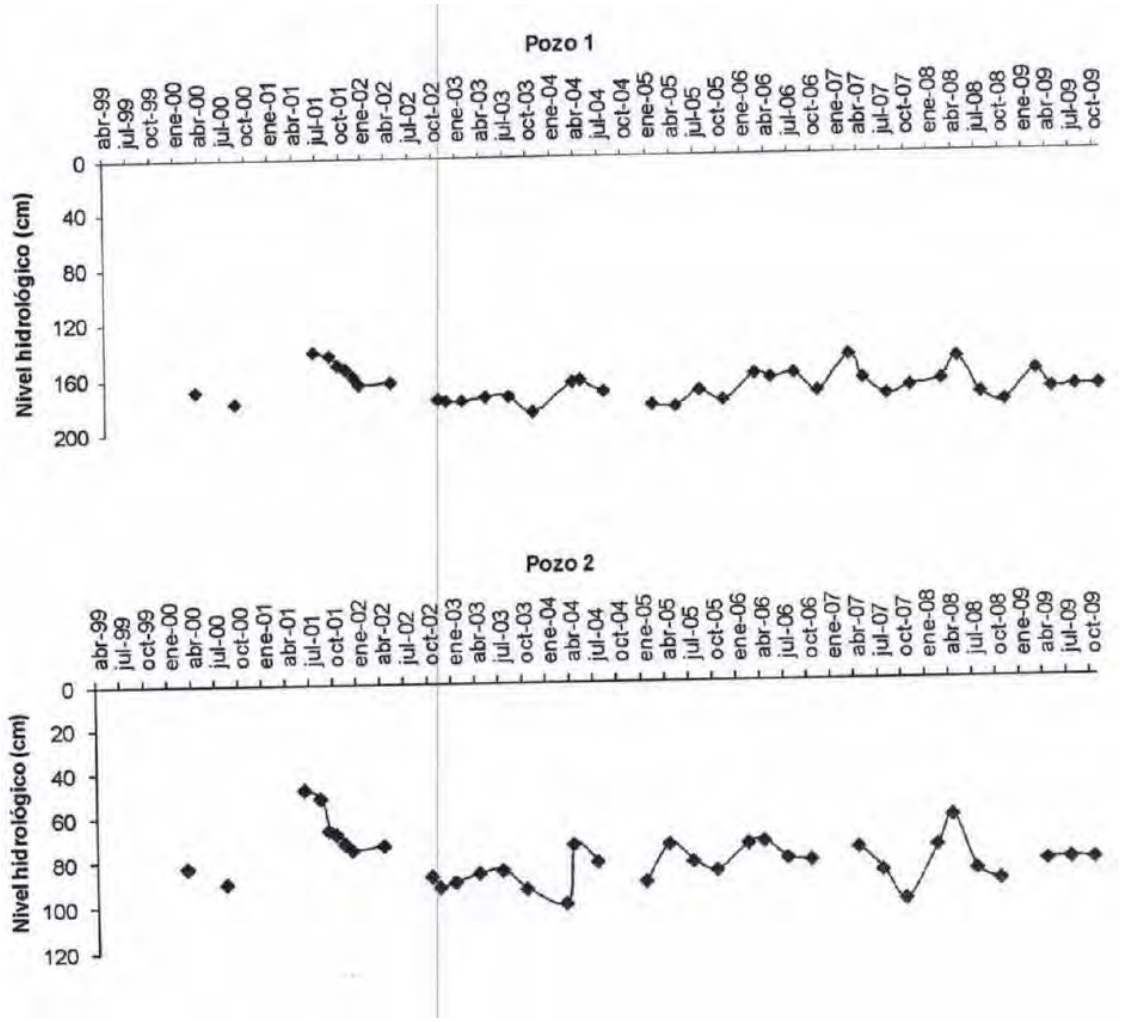
Continuación de Figura 7.341.



Continuación de Figura 7.341.



Continuación de Figura 7.341.



Continuación de Figura 7.341.

Tabla 7.213 Caudales obtenidos de las campañas de aforos en la cuenca del Salar de Surire. Fuente: elaboración propia.

No	Sitio de Aforo	Campaña I 26 Nov 2015		Campaña III 14-19 May 2016	
		Método	Q [l/s]	Método	Q [l/s]
1	SUAS-94	Manual	1,0		
2	SUAS-96			Manual	0,8
3	SUAS-97			Molinete	8
4	SUAS-98			Manual	5
5	SUAS-99			Manual	8,3
6	SUAS-100			Manual	3,9
7	SUAS-123			Manual	11

De las mediciones históricas, los puntos que registraron los niveles más profundos, entre 20 y 40 cm, son los identificados como S-7, S-5, S-8 y S-4. Sin embargo, en general durante los 10 años de medición se logra observar (Figura 7.341) que los niveles tienen fluctuaciones y recuperaciones importantes, que son atenuados logrando mantener un nivel de agua constante en la cuenca, en promedio menor a los 15 cm.

En relación a los caudales aforados en las campañas de noviembre de 2015 y mayo de 2016, se logra percibir que los mayores aportes superficiales que recibe el salar, provienen del sureste, del orden de los 8 y 11 l/s. Adicionalmente, se obtuvo un aforo de 30 l/s del punto SUAS-33 ubicado al oeste del salar, desconociendo si es un afluente permanente o estacional. Cabe mencionar que todos los aforos realizados en la cuenca, representan un instante dado y no es factible sacar mayores conclusiones al respecto.

7.10.1.6 Modelación hidrológica

Como se mencionó en los subcapítulos anteriores, la cuenca del Salar de Surire es cerrada, tiene un sistema de drenaje interno. La precipitación que allí cae, permanece ahí mismo y sale únicamente por infiltración o evaporación, dichos procesos favorecen la concentración de sales y que ocurran distintas reacciones químicas en el lugar. Adicionalmente, los caudales de los afluentes superficiales reportados en estudios anteriores, se atribuyen a instantes específicos en los que fueron medidos, desconociendo si estos son intermitentes, permanentes o estacionales. No existen estaciones de control fluviométrico en la cuenca, que permitan caracterizar mejor los afluentes.

Por otro lado, los valores de evaporación reportados en estudios anteriores, son obtenidos de balances hídricos o a través de un análisis regional, lo cual encierra un alto grado de incertidumbre su validez. No se cuenta con una estación meteorológica activa con tanque evaporímetro. De esta manera, realizar un modelo hidrológico del sistema tiene una complejidad mayor a la información con la que se cuenta en este estudio y se escaparía de los alcances.

Uno de los referentes de la cuenca que más ha acertado a este tipo de análisis, es el estudio de Risacher et al (1999). Allí se presenta un análisis de la evolución de aguas por evaporación y de la química de las aguas aportantes y contenidas en el salar. Se

concluye que el salar de Surire recibe aguas de composición y salinidad muy variada, y se enfatiza que no es posible estimar el caudal de las vertientes, mediante el método del balance hídrico de las lagunas, puesto que estas vertientes no constituyen el mayor aporte al salar. Además, se indica que la salmuera subterránea correspondería al agua central en el salar, concentrada ésta dos veces, puesto que se observó una importante reducción del contenido de sulfato en la napa subterránea. A partir de dicho resultado, la hipótesis planteada es que ocurre en los sedimentos del salar un proceso no previsto por los modelos, siendo lo más probable de que se trate de la reducción masiva del sulfato en sulfuros o azufre por acción de bacterias.

7.10.1.7 Estimación de la recarga de aguas subterráneas

Las principales recargas en la cuenca del Salar de Surire, provienen de las infiltraciones desde los manantiales que rodean al salar y del salar mismo, en el cual algunos estudios han identificado afloramientos y conexión con la napa subterránea. Estas se intensificarían durante las precipitaciones registradas en el invierno altiplánico.

ANTECEDENTES

El documento "Estudio geológico del Salar de Surire, provincia de Arica-Chile" presentado por Salas (1975), indica que en el Salar de Surire el nivel de las aguas subterráneas se encuentra a poca profundidad de la superficie. Hecho que es predecible, tomando en consideración que alrededor del 25% del área del salar está permanentemente cubierto por agua (lagunas y drenajes interiores) y que en el periodo lluvioso, este porcentaje aumentaría al 50% aproximadamente, convirtiendo el salar en una laguna de poca profundidad. Sin embargo, también se enfatiza que al noreste del salar se encuentra la zona donde el nivel de las aguas subterráneas está a mayor profundidad.

Matraz (2015), analizó la conexión hidráulica entre la cuenca del Salar de Surire y la cuenca del río Lauca, mediante prospección geofísica. Al interpretar el perfil se observó que coincidiendo con la parte alta del portezuelo, hay una formación volcánica de baja permeabilidad que divide subterráneamente las dos cuencas. De esta forma se concluyó que no existe un gradiente hidráulico que permita la circulación del agua de una cuenca a otra.

ESTIMACIÓN DE RECARGA MEDIANTE BALANCE HÍDRICO

En el subcapítulo de Balance Hídrico de la cuenca del Salar de Surire, se describen las componentes principales y se plantean los valores a nivel mensual y anual. Las principales entradas consideradas fueron la precipitación y el aporte desde el acuífero o ascenso subterráneo, este último mencionado por distintos estudios (Risacher et al, 1999; Salas, 1975); y las salidas fueron la evaporación y la infiltración (igualmente mencionado por Risacher et al (1999)). En la Tabla 7.214 se presentan los valores estimados de la recarga en la cuenca, referida ésta a la salida por infiltración. Se observa que este proceso ocurriría en los meses de diciembre a marzo, coincidiendo con el periodo de mayor precipitación en las cuencas altiplánicas de la región.

Tabla 7.214 Valores de recarga estimados en la cuenca del Salar de Surire. Fuente: elaboración propia.

Infiltración estimada en la cuenca del salar de Surire [l/s]	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	PROM ANUAL
	5.707	4.658	2.290	0	0	0	0	0	0	0	0	657	5

7.10.2 Marco geológico

La cuenca del salar de Surire se emplaza en la región geomorfológica correspondiente a la Cordillera Occidental.

GEOLOGÍA

Las rocas de la cuenca del salar de Surire más antiguas son las asociadas al Oligoceno-Holoceno. Entre ellas se cuenta con una fracción del miembro (b) de la Formación Lupica (OMl) en el límite noroeste de la cuenca y la Formación Macusa (Mmsm) en el límite oeste de la cuenca. Los volcanes del Mioceno Superior (Msv), Plioceno (Plv) y Pleistoceno (Pv) rodean los depósitos salinos del salar de Surire (Qss), y sus laderas están cubiertas por depósitos aluviales (Pa, Ha) y glaciares (Qg). Al este de la localidad de Surire se ubican los depósitos palustres (Hp).

TECTÓNICA Y ESTRUCTURAS

La cuenca de Surire tiene un origen tectónico producido por desplazamientos verticales de fallas regionales con rumbo NS, y complementada por acumulaciones de lavas

andesíticas y sedimentos coluviales. La cuenca fue rellenada en etapas sucesivas por sedimentos clásticos en su base, sedimentos químicos en su parte media y evaporitas en su parte superior. Los compuestos salinos de las evaporitas se originaron de las aguas termales de numerosas vertientes, ubicadas en la zona sureste del salar. Las evaporitas contienen boratos como principal compuesto de interés económicos, principalmente ulexita. En la zona suroriental del salar existe una extensa área geotérmica en donde se encuentran numerosas vertientes termales, originadas por un sistema de fallas más actual, de rumbo N a NE, emplazado en este mismo sector.

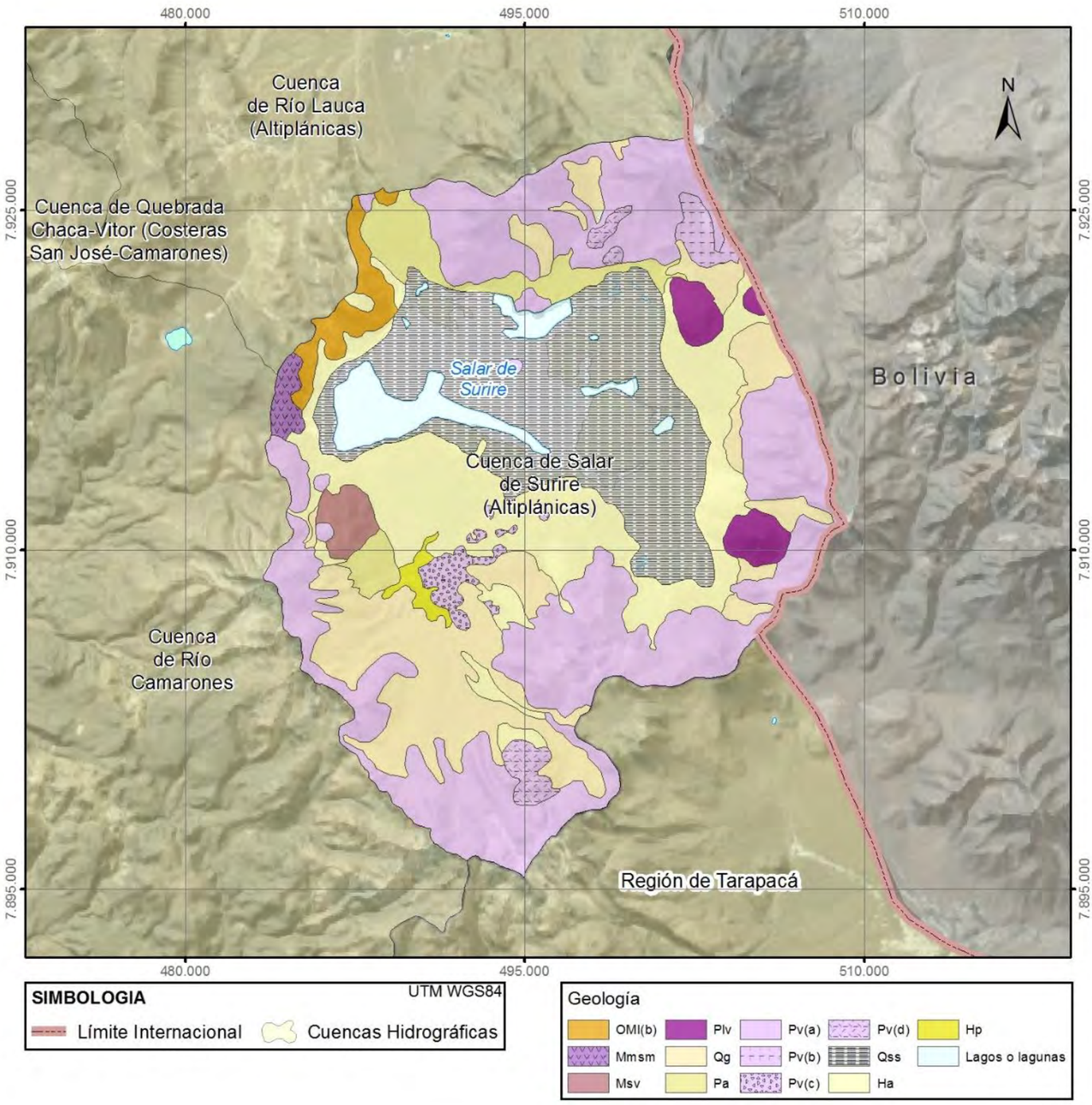


Figura 7.342 Mapa geológico de la cuenca del salar de Surire. Fuente: modificado de García *et al* (2004).

7.10.3 Caracterización Hidrogeológica

7.10.3.1 Estudios existentes

La cuenca del salar de Surire ha sido estudiada geológica e hidroquímicamente por su alto contenido en boratos, especialmente ulexita. El informe "Estudio geológico del salar de Surire, Provincia de Arica-Chile" elaborado por Salas en el año 1975, tiene como objetivo dimensionar el yacimiento del salar y posibles proyectos mineros. Es el primer estudio que describe en detalle la geología del salar, y presenta una columna estratigráfica del núcleo del salar y dos perfiles geológicos a partir de 11 sondajes de 45 m de profundidad existentes en el salar. En la Figura 7.343 se muestra la ubicación de los sondajes y perfiles y en la Figura 7.344 se presentan los perfiles geológicos elaborados en la cuenca del salar de Surire.

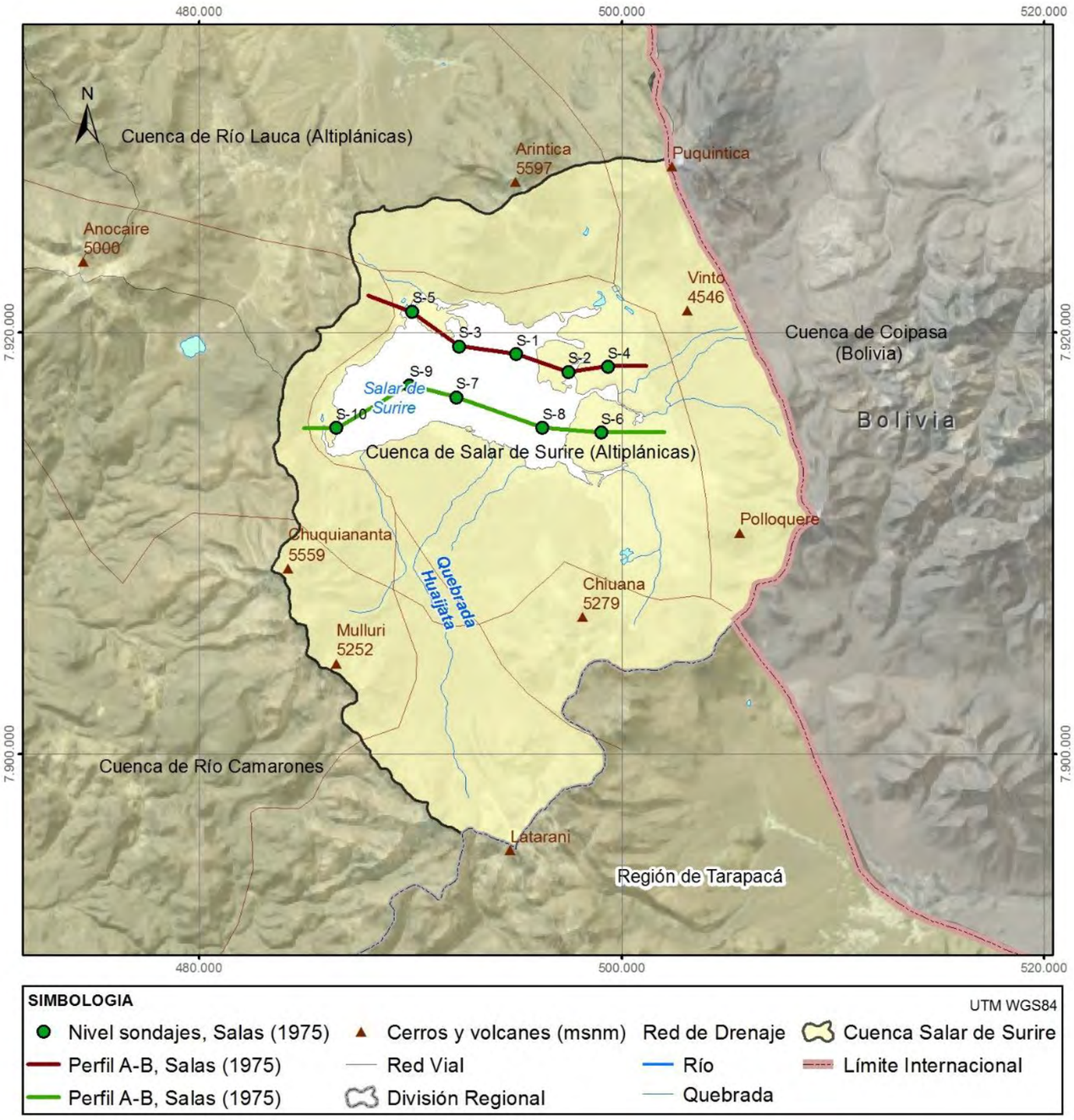


Figura 7.343 Ubicación de los perfiles geológicos A-B y C-D y de los sondajes en la cuenca del salar de Surire. Fuente: modificado de Salas *et al.* (1975).

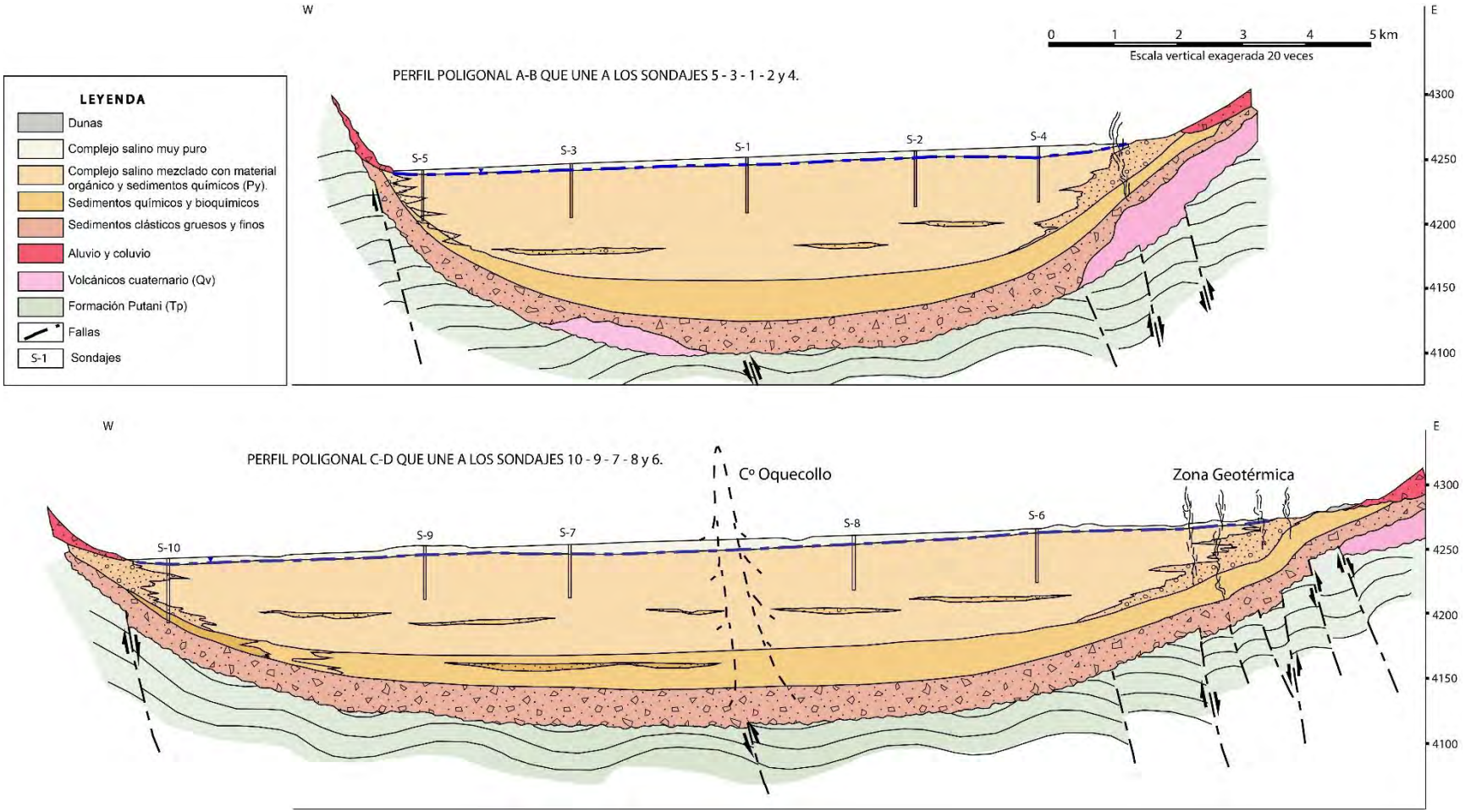


Figura 7.344 Perfiles geológicos del relleno de la cuenca del salar de Surire. Fuente: Salas (1975).

Posteriormente, en el estudio "Hidroquímica del salar de Surire" (López y Garcés, 2006) se describen las relaciones entre las aguas hidrotermales que existen en el sureste del salar, las vertientes y las salmueras del salar.

Por último, Matraz (2015) realizó una prospección geofísica en el límite norte de la cuenca mediante un perfil TEM para analizar la continuidad acuífera entre la cuenca del río Lauca (sector Paquisa) y la cuenca del salar de Surire, Figura 7.345. Matraz (2015) determinó que los depósitos aluviales del pleistoceno (Pa) y los depósitos salinos (Qss) están saturados de agua, pero no hay una continuidad hidráulica entre ambas cuencas.

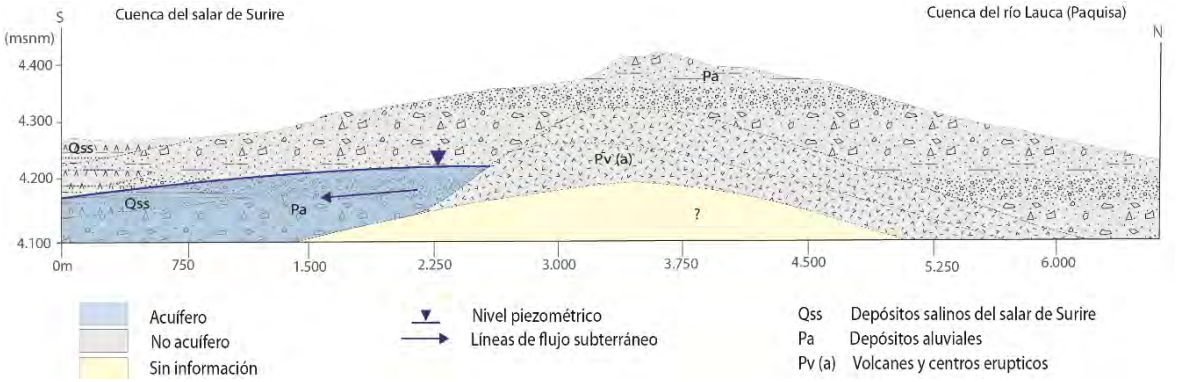


Figura 7.345 Perfil hidrogeológico entre la cuenca del salar de Surire y la cuenca del río Lauca. Fuente: Matraz (2015).

7.10.3.2 Definición y caracterización de las unidades hidrogeológicas

La cuenca del salar de Surire se caracteriza por presentar un cuerpo salino circundado por volcanes cuaternarios, un sistema de cabalgamientos y pliegues que provocan que el basamento aflore en el sector noroeste de la cuenca y por las aguas termales surgentes en el sector sureste. Se han definido las siguientes unidades hidrogeológicas a partir de los antecedentes, del mapa geológico de García *et al.* (2004) y del mapa hidrogeológico de Chile 1:1.000.000 (DGA, 1987) en la cuenca del salar de Surire:

- Unidad Hidrogeológica I (importancia alta): está constituido por los depósitos sedimentarios del pleistoceno y holoceno. Esta unidad acuífera detrítica rellena las zonas deprimidas y cubren las laderas de los volcanes. Los extensos depósitos aluviales del Pleistoceno son ripios, gravas, arenas y limos que bordean al salar por el sector norte, mientras que los depósitos aluviales del Holoceno corresponden a gravas y brechas matriz soportadas, con intercalaciones

de arenas, limos y arcillas, que crean la pampa de Surire al sur del salar y la pampa Guarmire al oriente del salar. Esta unidad es un medio poroso.

- Unidad Hidrogeológica II (importancia alta-media): corresponde a la cadena de volcanes que limita la cuenca. Se considera la principal zona de recarga de todo el sistema hídrico de la cuenca. Cada volcán presenta un grado de alteración hidrotermal y de sistemas de fracturas conectadas entre sí o no en diferente grado, siendo estas las variables principales que controlan el valor de transmisividad del cuerpo volcánico.
- Unidad Hidrogeológica III (importancia media): constituido por los depósitos salinos del salar. Estos depósitos son mantos subhorizontales de sales, limos salinos y costras salinas, en parte ligeramente detríticos, de espesor centimétrico a métrico y colores blanco y amarillo. Esta unidad constituye un medio de porosidad primaria y secundaria por disolución de sales.
- Unidad Hidrogeológica IV (importancia media): engloba a los depósitos glaciares del cuaternario y depósitos de avalancha. Los depósitos glaciales son morrenas laterales y/o frontales por lo que su geometría es elongada y de espesor máximo de 100 m de parabrechas polimícticas. Presentan una permeabilidad intergranular y un carácter libre.
- Unidad Hidrogeológica V (importancia baja a muy baja): son tobas con intercalaciones de rocas sedimentarias y de lavas. Considera la Formación Lupica (b) y Macusa. Estas formaciones han sufrido una serie de plegamientos que provocan un bajo grado de fracturamiento.
- Basamento: no afloraría en la cuenca del salar de Surire.

En la Tabla 7.215 se presenta un resumen de las unidades hidrogeológicas y en la Figura 7.346 el mapa de las unidades según la importancia hidrogeológica presentes en la cuenca del salar de Surire.

Tabla 7.215 Resumen de las unidades hidrogeológicas de la cuenca del salar de Surire. Fuente: elaboración propia.

Cuenca	Unidad Hidrogeológica	Descripción	Tipo de permeabilidad	Importancia hidrogeológica	Tipo de Unidad
Salar de Surire	I	Depósitos fluviales Depósitos aluviales	Primaria	Alta	Acuífero
	II	Complejos volcánicos	Secundaria	Media	Acuífero
	III	Depósitos salinos	Primaria Secundaria	Media	Supuestamente Acuitardo
	IV	Depósitos glaciares	Primaria	Media	Supuestamente Acuitardo
	V	Formación Macusa Formación Lupica (b)	Secundaria	Baja-muy baja	Supuestamente Acuícludo

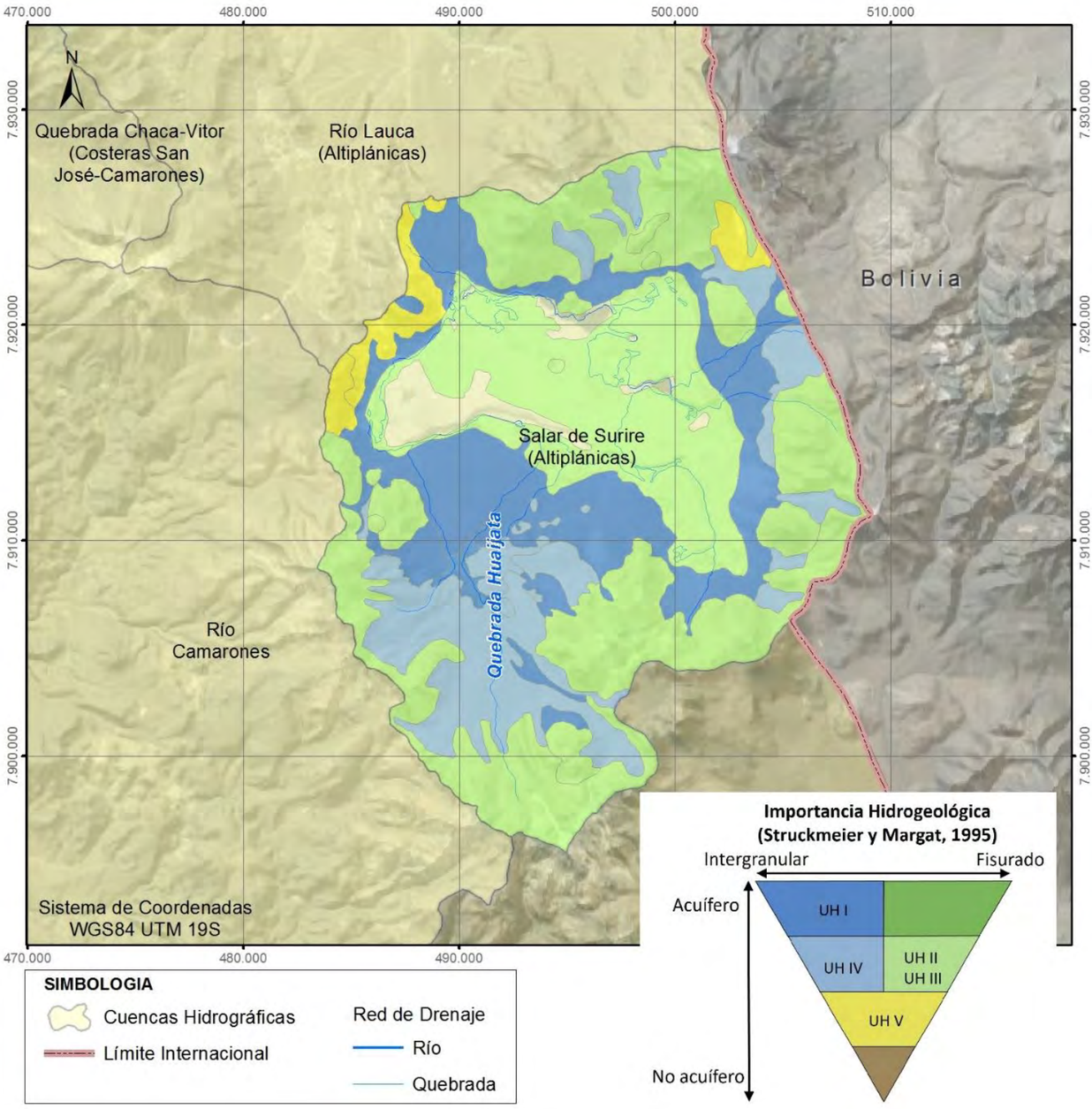


Figura 7.346 Mapa de las unidades según la importancia hidrogeológica presentes en la cuenca del salar de Surire. Fuente: elaboración propia.

7.10.3.3 Parámetros hidráulicos

En los depósitos salinos del salar de Surire se perforaron 10 sondajes, en los cuales se midieron los niveles en cada sondaje, pero no se efectuó ninguna prueba de bombeo en ningún pozo. Por lo tanto, en la Tabla 7.216 se han estimado los parámetros hidráulicos de cada una de las unidades hidrogeológicas a partir de valores de materiales geológicos similares obtenidos de la bibliografía existente.

Para estimar con mayor fiabilidad la disponibilidad de recursos hídricos subterráneos y caracterizar hidrogeológicamente mejor estas unidades se recomienda perforar dos sondajes, uno en los depósitos salinos y otro en los depósitos aluviales. Al perforar los sondajes se identificaría la litología de los estratos y se podrían realizar pruebas de bombeo, con el objetivo de determinar los parámetros hidráulicos de los depósitos salinos y de los depósitos aluviales.

Tabla 7.216 Resumen de los parámetros hidráulicos de cada unidad hidrogeológica de la cuenca del salar de Surire Fuente: elaboración propia.

Cuenca	Unidad Hidrogeológica	Régimen	T (m^2/día)	K (m/día)	Ss (m^{-1})	Sy (%)	Comentario
Salar de Surire	I	Libre	20-600	0,1-10		5-30	K base al estimado con pruebas de bombeo, JICA (1995) y AC (98) en Lluta
	II	Libre		E^{-2}-E^{2}			K estimado por Aquaconsult (2010) depósitos volcánicos
	III	Libre		$8E^{-7}$ – 1		--	K estimado por Domenico y Schwartz (1990) para rocas sedimentarias
	IV	Libre		$1E^{-3}$ – $5E^{-1}$		--	K estimado por Domenico y Schwartz (1990) para rocas sedimentarias
	V	Libre		$1E^{-5}$ – $7E^{-3-}$	--		K estimado por Domenico y Schwartz (1990) y S por Domenico y Mifflin (1965)
		Confinado			$3E^{-6}$-E^{-5}	--	

7.10.3.4 Piezometría

Los depósitos salinos del salar de Surire están emplazados en una cuenca endógena que es drenada subterráneamente a través de materiales de origen volcánico y sedimentario.

En ninguno de los estudios desarrollados anteriormente se han trazado piezometrías de las unidades hidrogeológicas existentes en la cuenca del Salar de Surire. La alimentación hídrica actual del salar de Surire proviene mayoritariamente de la escorrentía superficial que drena la cuenca, por las fracturas de los cuerpos volcánicos que crean vertientes y de los aportes subterráneos que se manifiestan como surgencias termales, las cuales se localizan en el sector sureste del salar, y como surgencias de agua fría alrededor del salar. En la Figura 7.347 se presenta el mapa piezométrico inferido y elaborado a partir de las vertientes, bofedales, cuerpos de agua y de los niveles piezométricos tomados en los 10 sondajes del informe de Salas (1975), imágenes satelitales y curvas de nivel cada 20 m del IGM. Por lo tanto, en la Figura 7.347 se observa que las isopiezas se hacen concéntricas al salar y que la dirección de los flujos subterráneos es convergente desde las cotas más altas hacia el núcleo del salar.

Según López *et al.* (2006) la superficie del salar aparece ligeramente basculada hacia el noroeste, lo que condiciona tanto la dirección de los flujos de aguas superficiales que acceden al salar como la ubicación de las acumulaciones temporales de agua sobre su superficie. Debido a esta situación, las aguas que proceden del sur de la cuenca al llegar al salar fluyen hacia el oeste.

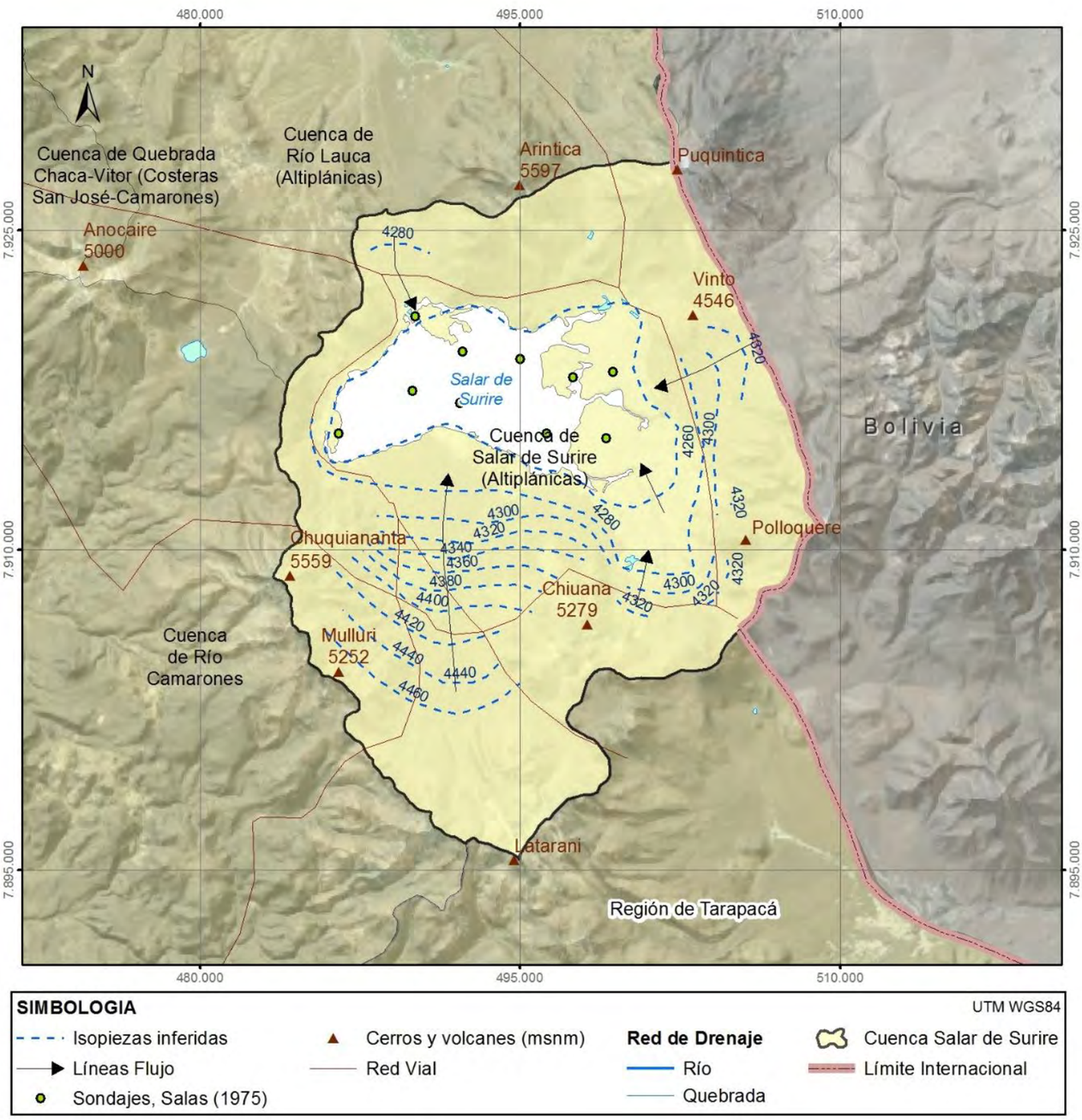


Figura 7.347 Mapa piezométrico inferido de la cuenca del salar de Surire. Fuente: elaboración propia.

7.10.4 Caracterización Hidroquímica

7.10.4.1 Estudios hidroquímicos existentes

La cuenca del salar de Surire se caracteriza por la existencia de fuentes termales en el sector sureste del salar y por el contenido de minerales evaporíticos de interés económico, como es la ulexita. En la Figura 7.348 se presenta la ubicación de los puntos donde se han recolectado muestras de aguas superficiales o subterráneas para el análisis hidroquímico y en algunos casos también análisis isotópico en los estudios de Salas (1975), Risacher et al. (1999) y Matraz (2015).

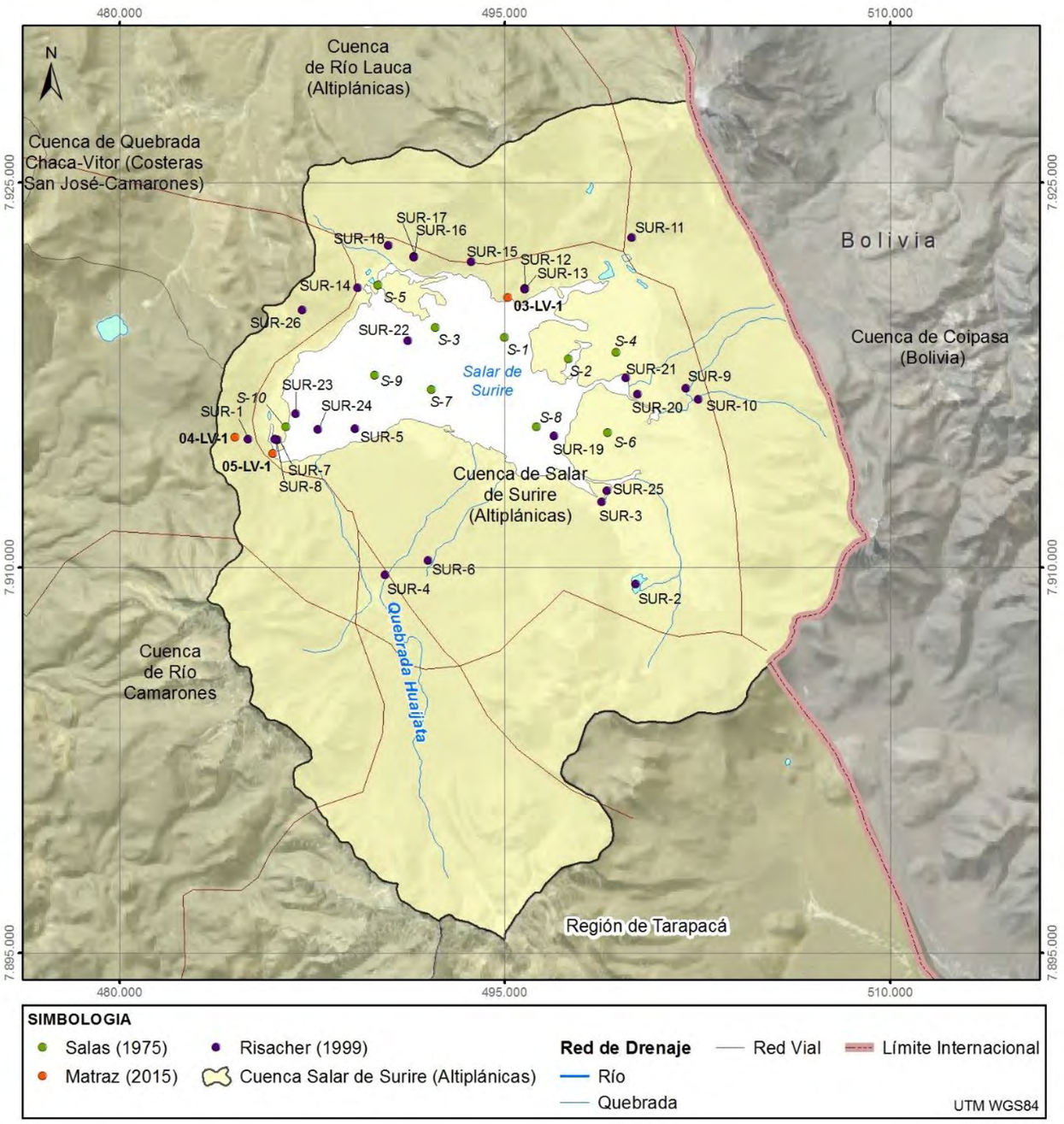


Figura 7.348 Ubicación de las muestras de agua analizadas hidroquímicamente en los estudios anteriores en la cuenca del salar de Surire. Fuente: elaboración propia.

Uno de los primeros antecedentes que determinó las sales y salmueras que se depositaron en el salar fue Salas (1975). En este estudio se tomaron muestras de agua subterránea en 10 sondajes de 45 m de profundidad, en el que su composición química se muestra en el diagrama Piper de la Figura 7.349. Todas las aguas son cloruradas sódicas, pero en el sondaje 10 se tomaron 3 muestras a diferentes profundidades (10, 24 y 45 m) y se observa que a mayor profundidad las aguas son menos cloruradas. Salas (1975) determinó que las sales de boro en las salmueras se encontrarían en el estado de ácido bórico, acompañados por sulfatos de sodio y magnesio y cloruros de sodio, magnesio y potasio.

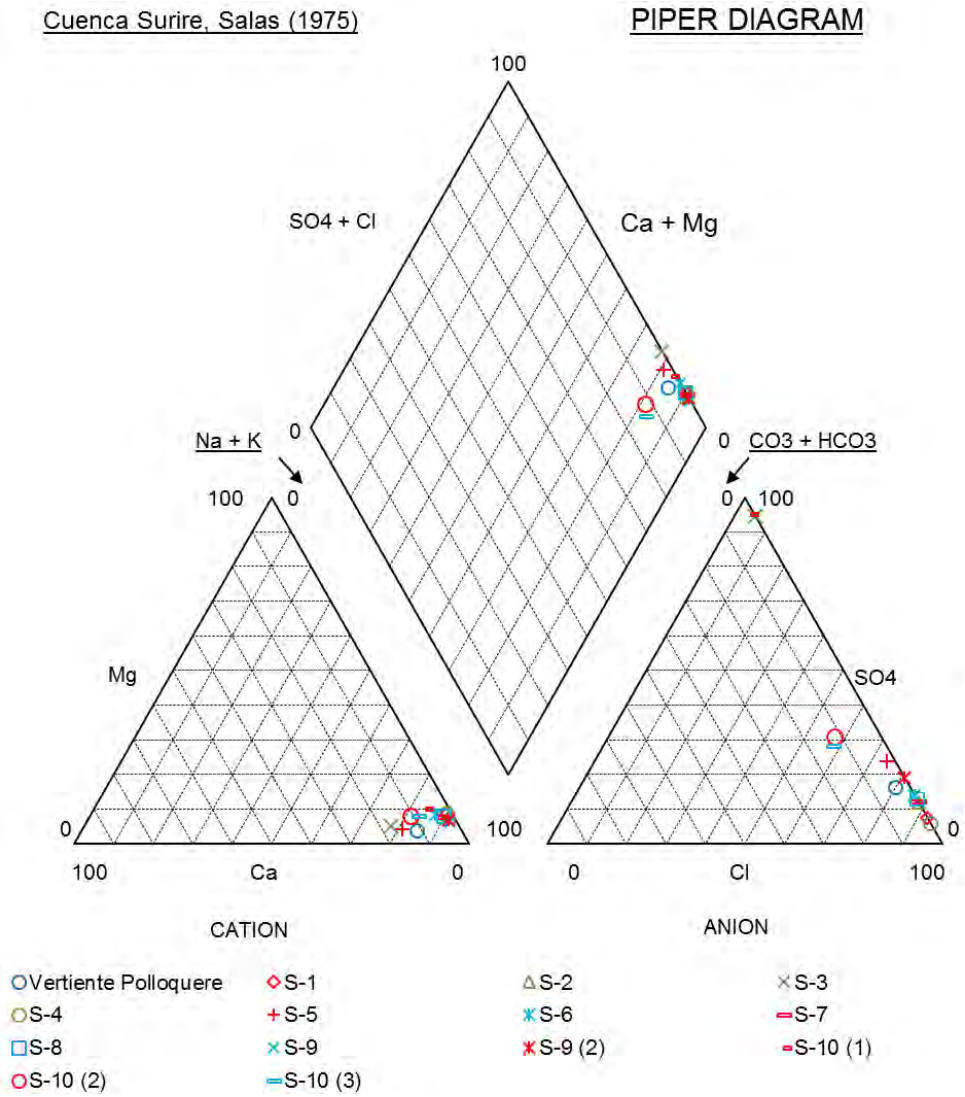


Figura 7.349 Composición isotópica de las muestras analizadas en el salar de Surire por Salas (1975). Fuente: elaboración propia.

En la misma década, Cusicanqui H. (1979) llevó a cabo una prospección geoquímica del área de la vertiente Polloquere. Concluyó que la concentración y naturaleza de los elementos disueltos en las aguas termales indican que pertenecen a un sistema hidrotermal, especialmente las concentraciones de boro, arsénico, litio, cesio y rubidio, que son elementos característicos en la lixiviación que se produce en un proceso hidrotermal que se desarrolla a altas temperaturas y presiones.

Posteriormente, se elaboró el informe Risacher *et al.* (1999), en el que se tomaron muestras de agua en 26 puntos (vertientes, un riachuelo, fuentes termales y lagunas) para el análisis hidroquímico e isotópico (en 20 muestras de estas) en la cuenca del salar de Surire. A continuación, se presenta la reinterpretación de los datos de la composición hidroquímica obtenido en este estudio. En primer lugar, se calculó el error del balance iónico de los resultados del laboratorio para validar estos datos y se obtuvo un error del balance iónico aceptable, que varía entre 3,1 y -2,07%. En la Figura 7.350 se han representado las aguas recogidas y analizadas del río en color morado, las aguas de manantiales en color naranja y rojo, las aguas tomadas en las lagunas de color azul, las agua de la napa en color verde y las aguas de pozas en color negro. La composición química de las aguas aportantes al salar de Surire es muy variada, Risacher *et al.* (1999) resume de la siguiente manera los tipos de agua según los sectores geográficos: las vertientes que alimentan el salar desde el borde occidental son aguas muy diluidas, al sur y al norte del salar entran aguas de aporte de tipo bicarbonatadas Na-Ca-Mg y sulfatadas Na-Ca-Mg respectivamente y por último el aporte de aguas salinas del tipo cloruradas sódicas desde los bordes sur y occidente del salar. Las aguas termales del centro del salar y las lagunas pertenecen al último grupo hidroquímico descrito, salobre o salmueras cloruradas sódicas

En el diagrama de Schoeller-Berkaloff se observa como las aguas de los manantiales (color rojo y naranja) y del riachuelo (morado) son más diluidas que las aguas de las lagunas (color azul) y de la napa (color verde).

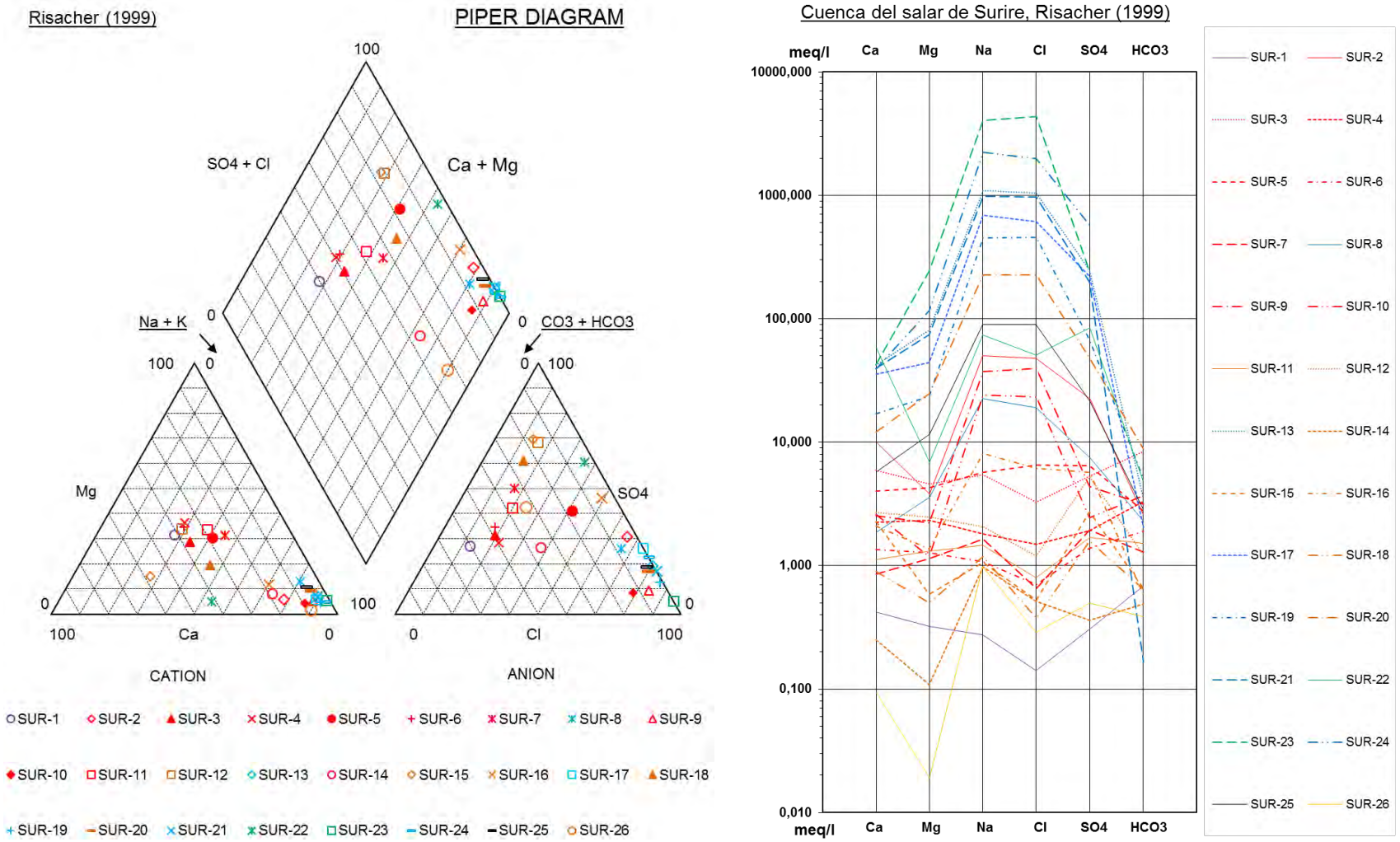


Figura 7.350 Diagramas de Piper y de Schoeller-Berkaloff de las muestras analizadas hidroquímicamente en el salar de Surire por Risacher *et al.* (1999). Fuente: elaboración propia.

Por otro lado, en el estudio de Risacher et al. (1999) se analiza la composición isotópica de $\delta^{18}O$ y δD de 20 de las muestras evaluadas hidroquímicamente. En la Figura 7.351 se muestra la composición isotópica de las aguas tomadas en manantiales (color verde) que rodean el salar de Surire y en el río que se ubica cerca del refugio de la Conaf (color azul). Los resultados isotópicos de las muestras analizadas presentan un valor de $\delta^{18}O$ VSMOW que varía entre -15,49 y -11,57‰ y de δD VSMOW entre -111 y -84 ‰. Todas las aguas analizadas se encuentran entre las rectas con exceso de deuterio 14 y 6, ajustándose a la Línea Meteórica Local definida por Fritz et al. (1979), $\delta D = 7{,}8 * O^{18} + 9{,}5$. Lo que manifestaría que son aguas que no han sufrido fraccionamiento por evaporación.

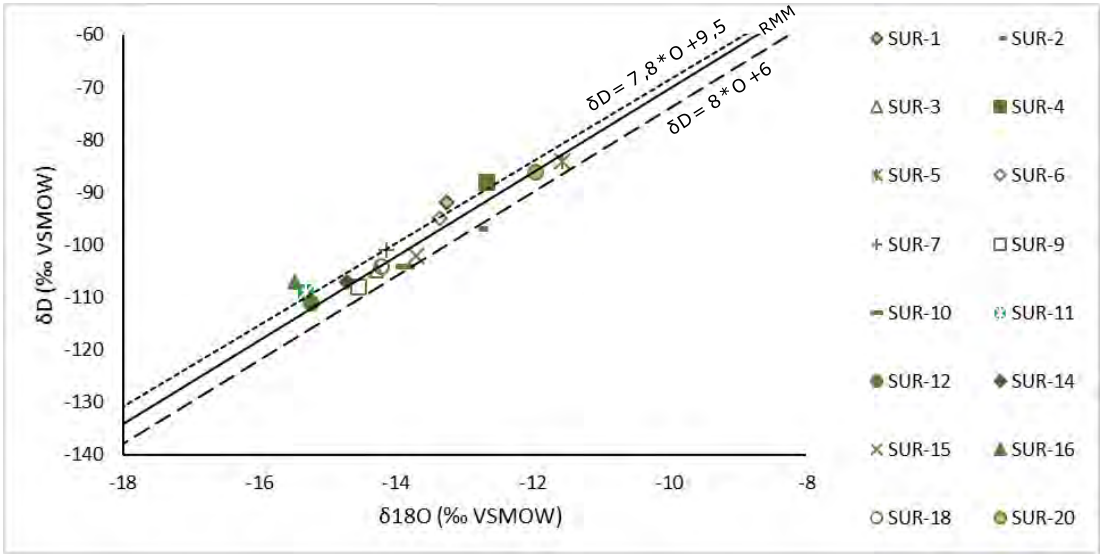


Figura 7.351 Composición isotópica de las muestras analizadas por Risacher *et al.* (1999) en el año 1995 en la cuenca del salar de Surire. Fuente: elaboración propia.

Por último, en el estudio López y Garcés (2006) se analizó la composición hidroquímica de las aguas recolectadas en enero de 1995, julio/agosto de 1996 y septiembre de 1997. En éste se concluyó que hidroquímicamente hay dos tipos de agua, por un lado las vertientes y las soluciones acumuladas en los bofedales y, por otro, entre las surgencias termales y las salmueras superficiales del salar. Las muestras de vertientes y bofedales presentan un alto grado de variación tanto en la distribución de cationes como de aniones, variando los aniones entre bicarbonatada-sulfatada-clorurada y el clorurada-sulfatada y los cationes desde magnésicos-sódicos-cálcico hasta el sódico-magnésico. Las aguas de las vertientes presentan una gran variación iónica porque al

fluir por diferentes tipos de depósitos volcánicos y sedimentarios y ser muy diluidas, les confieren diferentes marcas químicas a las aguas. Mientras que las surgencias termales del centro del salar y las salmueras son similares, cloruradas sódicas, esto se debe a que las aguas surgentes disuelven sales al ascender a la superficie del salar.

7.10.4.2 Campaña de muestreo

En el presente estudio se realizaron 3 campañas de muestreo de aguas superficiales y subterráneas para caracterizar hidroquímica e isotópicamente y determinar la calidad de agua de unos elementos y parámetros según la norma chilena para agua potable NCh 409/1. En la Tabla 7.217 se resume el número de mediciones de los parámetros fisicoquímicos registrados *in situ*, el número de muestras tomadas para el análisis hidroquímico y para el análisis isotópico y en la Figura 7.352 se presenta la ubicación de los puntos muestreados. En el Anexo VIII se describe el protocolo seguido en terreno para la toma de muestras de agua.

En la cuenca del salar de Surire no se recolectaron y analizaron muestras de agua durante la segunda campaña de terreno por la complicada accesibilidad a la cuenca y a los puntos de muestreo durante el invierno altiplánico.

Tabla 7.217 Resumen de las actividades realizadas en las campañas de muestreo realizadas en la cuenca del salar de Surire. Fuente: elaboración propia.

Campaña	Fecha	Medición parámetros fisicoquímicos *in situ*	Muestras para análisis hidroquímico	Muestras para análisis isotópico
Primera	26 y 27 de noviembre de 2015	8	8	8
Segunda	Febrero 2016	0	0	0
Tercera	14 y 15 de mayo de 2016	7	7	7
Cuarta	02 de agosto de 2016	5	5	5

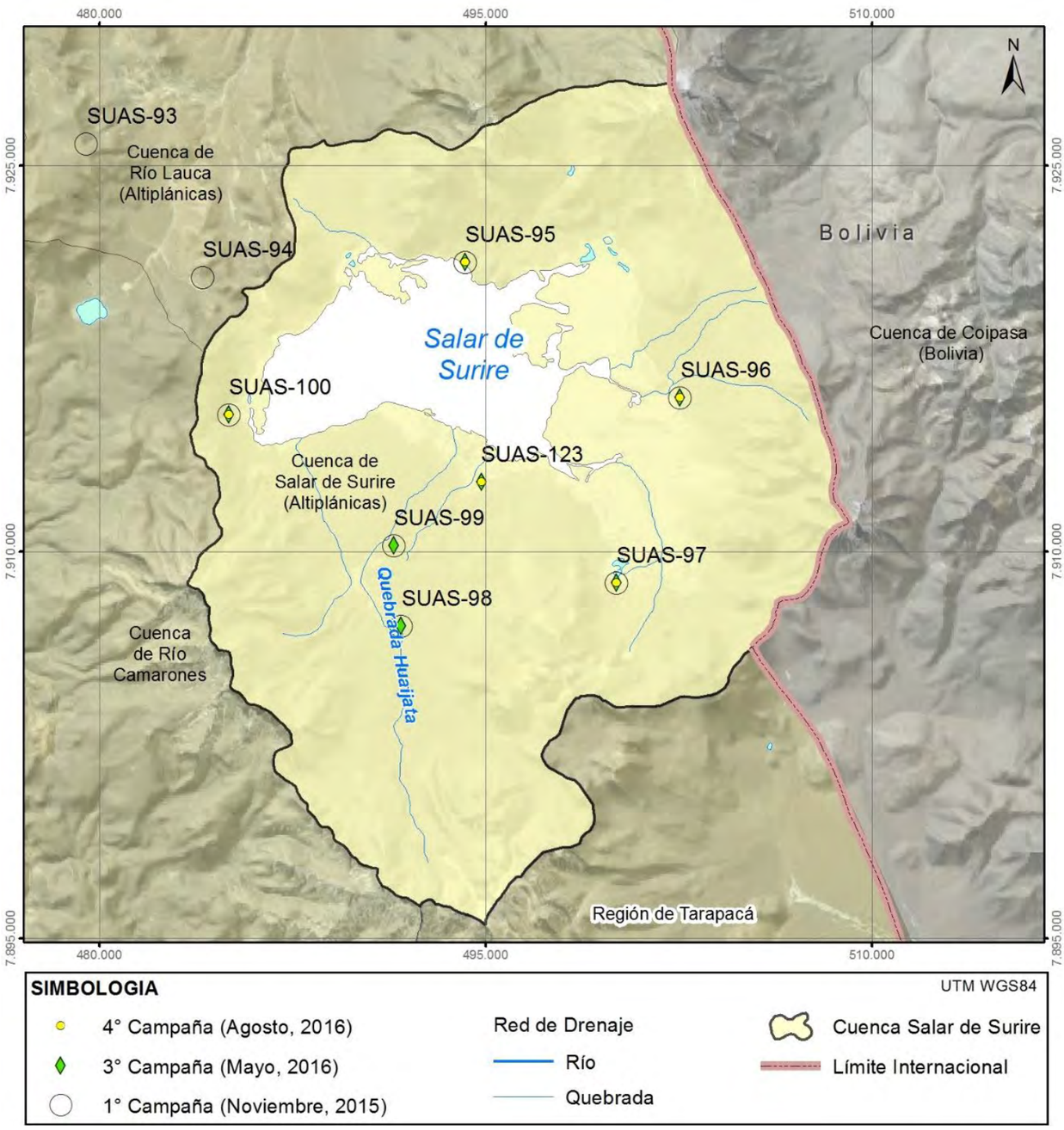


Figura 7.352 Ubicación de las muestras analizadas hidroquímicamente en la cuenca del salar de Surire en las diferentes campañas. Fuente: elaboración propia.

7.10.4.3 Parámetros fisicoquímicos *in situ*

En las 3 campañas de terreno se midieron los parámetros fisicoquímicos de las muestras que se tomaron para el análisis hidroquímico e isotópico. En esta sección se evalúan los valores de temperatura, pH, conductividad eléctrica y Sólidos Disueltos Totales (TDS) para caracterizar estos parámetros fisicoquímicos e identificar si existe una variación espacial y estacional de éstos en la cuenca del salar de Surire.

TEMPERATURA

La cuenca del salar de Surire se caracteriza por presentar un conjunto de vertientes termales y fumarolas. La Tabla 7.218 resume los valores máximos, mínimos y promedios registrados de temperatura en las 3 campañas de terreno realizados en el presente estudio. Las máximas temperaturas se registraron, entre 46,4°C y 35°C, en una de las vertientes hidrotermales de Polloquere, ubicadas al sureste de la cuenca, mientras que el resto de puntos de agua presentan una temperatura menor a 25°C. En la Figura 7.353 se observa que generalmente las temperaturas fueron descendiendo desde la primera campaña realizada en noviembre de 2015 hasta agosto de 2016, reflejo de las temperaturas estacionales propias de Chile.

Tabla 7.218 Valores máximos, mínimos y promedio de temperatura registrados en cada campaña de muestreo en la cuenca del salar de Surire. Fuente: elaboración propia.

Temperatura (°C)	1°Campaña Noviembre 2015	2°Campaña Febrero 2016	3°Campaña Mayo 2016	4°Campaña Agosto 2016
Máxima	46,4	-	34,8	34
Mínima	8,4	-	7,2	2,33
Promedio	22,4	-	15,3	14,6

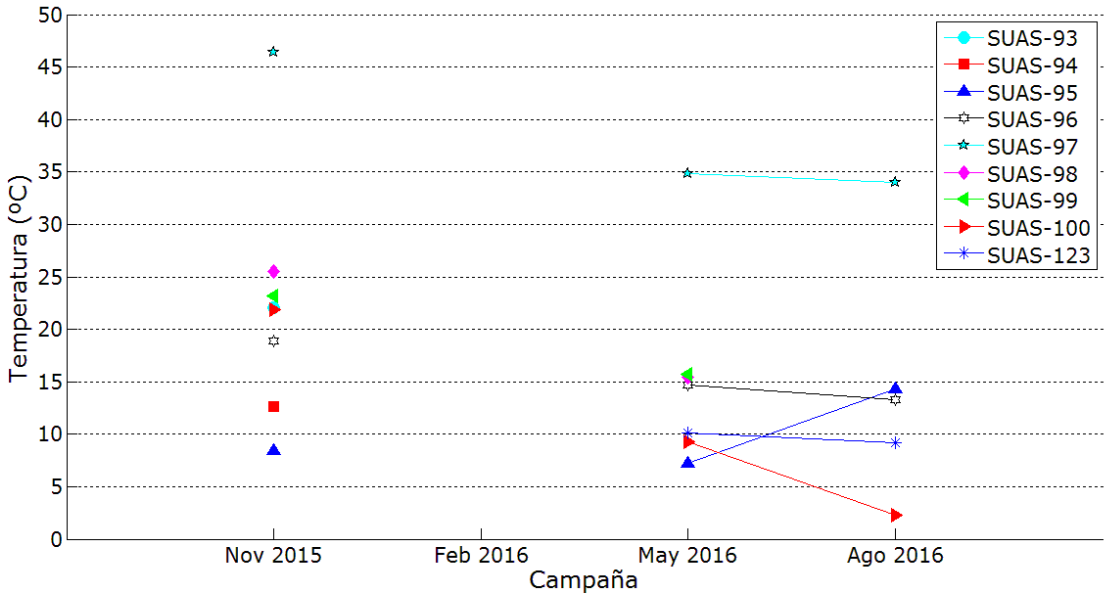


Figura 7.353 Valores de temperatura registrados en las aguas superficiales en las campañas realizadas en la cuenca del salar de Surire. Fuente: elaboración propia.

PH

La Tabla 7.219 resume los valores máximos, mínimos y promedios de pH registrados en las 3 campañas de terreno realizados en el presente estudio. De la muestra SUAS-100 se consideró el valor de pH obtenido en el laboratorio, ya que no era fiable la medición efectuada *in situ*. Las muestras recolectadas en la cuenca del salar de Surire son aguas neutras a alcalinas, cuyo pH varía entre 6,5 y 9,7. En la Figura 7.354 se observa que el pH suele ser constante en el tiempo, sin sufrir fuertes variaciones en el tiempo, excepto la muestra SUAS-96 que varía de 8,7 a 9,7. La muestra con pH más bajo, 6,5 y 7,5 corresponde a la fuente hidrotermal de Polloquere.

Tabla 7.219. Valores máximos, mínimos y promedio de pH registrados en cada campaña de muestreo en la cuenca del salar de Surire. Fuente: elaboración propia.

pH	1°Campaña Noviembre 2015	2°Campaña Febrero 2016	3°Campaña Mayo 2016	4°Campaña Agosto 2016
Máxima	9,52	-	9,6	9,8
Mínima	6,51	-	7,5	5,6
Promedio	8,48	-	8,6	7,8

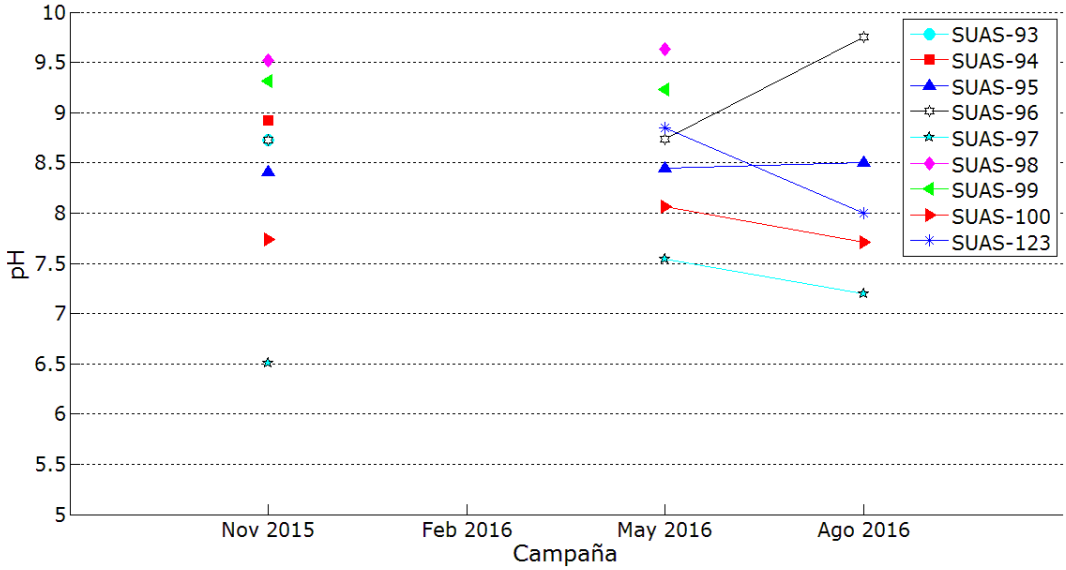


Figura 7.354 Valores de pH registrados en las aguas superficiales en las campañas realizadas en la cuenca del salar de Surire. Fuente: elaboración propia.

CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

En la cuenca del salar de Surire las aguas presentan un amplio rango de conductividad eléctrica. En la Tabla 7.220 se resume los valores máximos, mínimos y promedios registrados de conductividad eléctrica en las 3 campañas de terreno realizados en el presente estudio. En la Figura 7.355 destaca la muestra SUAS-95 por ser salmuera con valor de conductividad eléctrica que varía entre 71.000 a 37.600 µS/cm mientras que el resto de aguas superficiales presentan valores inferiores a 10.000 µS/cm. De los 8 puntos de agua muestreados, 6 muestras se trataban de aguas dulces con valores de conductividad inferior a 1.000 µS/cm.

Tabla 7.220 Valores máximos, mínimos y promedio de conductividad eléctrica registrados en cada campaña de muestreo en la cuenca del salar de Surire. Fuente: elaboración propia.

CE (µS/cm)	1°Campaña Noviembre 2015	2°Campaña Febrero 2016	3°Campaña Mayo 2016	4°Campaña Agosto 2016
Máxima	71.500	-	88.770	37.600
Mínima	114	-	17,34	110
Promedio	10.542	-	261	10.033

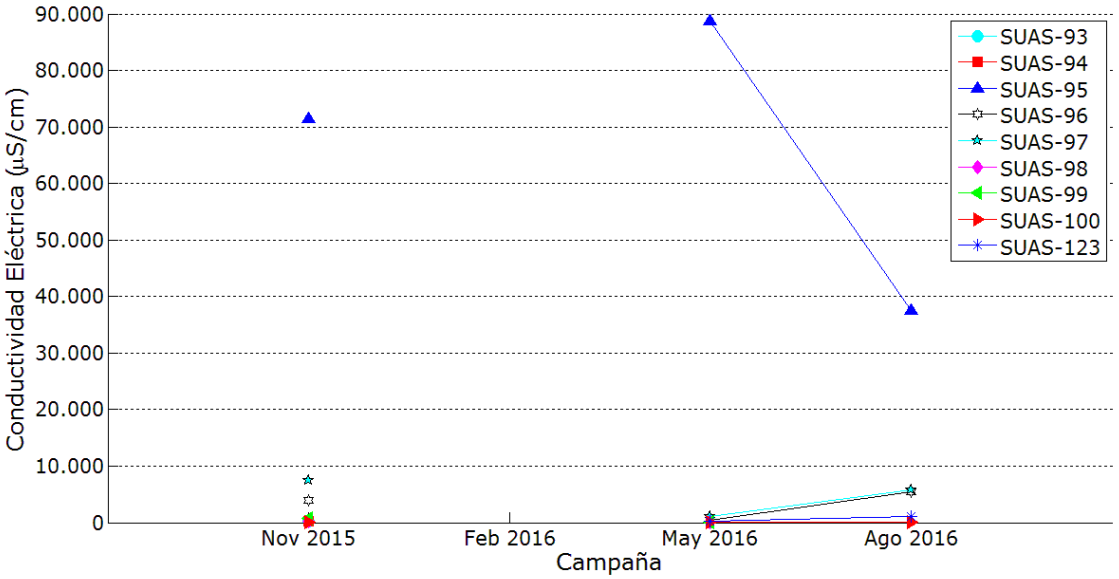


Figura 7.355 Valores de conductividad eléctrica registrados en las aguas superficiales en las campañas realizadas en la cuenca del salar de Surire. Fuente: elaboración propia.

SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES

Los valores máximos, 67.600 mg/L, y mínimos, 11 mg/l, corresponden a las mismas muestras que tiene alto valor de conductividad eléctrica. La Tabla 7.221 resume los valores máximos, mínimos y promedios de sólidos disueltos totales registrados en las cuatro campañas de terreno realizados en el presente estudio.

Tabla 7.221 Valores máximos, mínimos y promedio de sólidos disueltos totales registrados en cada campaña de muestreo en la cuenca del salar de Surire. Fuente: elaboración propia.

TDS (mg/L)	1°Campaña Noviembre 2015	2°Campaña Febrero 2016	3°Campaña Mayo 2016	4°Campaña Agosto 2016
Máxima	45.800	-	67.638	24.000
Mínima	73,3	-	11	71
Promedio	6.751	-	9.828	6.430

7.10.4.4 Modelo hidroquímico de las aguas

CONTROL DE CALIDAD ANÁLISIS QUÍMICOS

Los valores máximos y mínimos del error del balance iónico de la composición química entregada por el laboratorio se presentan en la Tabla 7.222. Al ser valores inferiores al

5% se consideró que el valor del error del balance iónico fue aceptable en todos los resultados obtenidos en cada campaña efectuada.

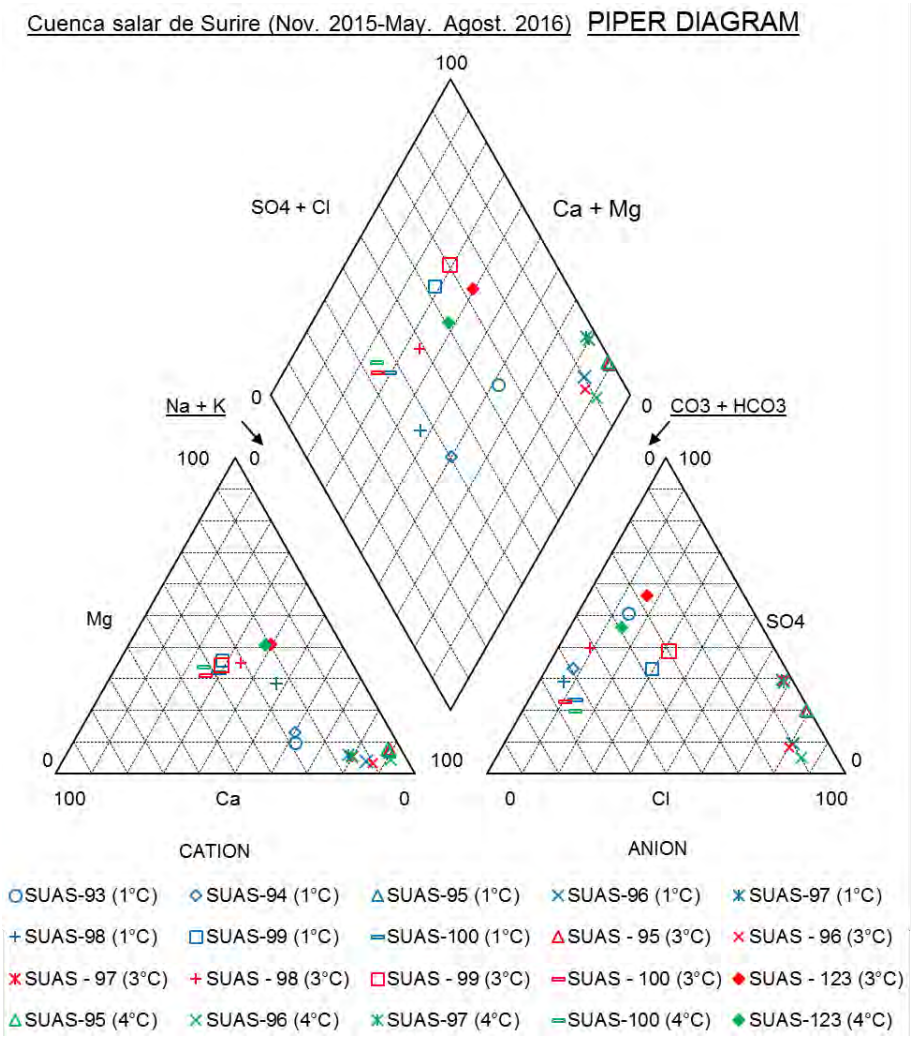
Tabla 7.222 Resumen de los valores máximos y mínimos del error del balance iónico de la composición química de las muestras de las cuatro campañas de muestreo en la cuenca del salar de Surire. Fuente: elaboración propia.

Error del balance iónico	1°Campaña Noviembre 2015	2°Campaña Febrero 2016	3°Campaña Mayo 2016	4°Campaña Agosto 2016
Máximo	5,72%	-	7,19%	-10,01%
Mínimo	-9,33%	-	-6,59%	-7,77%

ANÁLISIS DE FACIES QUÍMICAS

Los resultados obtenidos de las campañas de muestreo efectuadas en el presente estudio indican que existe una amplia variación en la composición hidroquímica. Como se observa en la Figura 7.356, la composición química de las aguas varía entre aguas bicarbonatadas y cloruradas, pasando por las composiciones intermedias. Las muestras tomadas en la laguna ubicada en el borde norte del salar, SUAS-95, el manantial del límite oriental, SUAS-96, y en la fuente hidrotermal, SUAS-97, son aguas cloruradas sódicas. Estas aguas son las más mineralizadas de todas las muestras analizadas durante las campañas de muestreo. Por otro lado, las muestras SUAS-94, en la cuenca del río Lauca, SUAS-100, en el borde occidental del salar, y SUAS-98, en la cabecera de la quebrada Huaijata (o río Surire) son bicarbonatadas, en cambio el catión dominante varía entre sodio y calcio. Las aguas de la quebrada Huaijata (o río Surire) son bicarbonatadas en la naciente del bofedal de Surire, pero aguas abajo del pueblo Aijota, las aguas (SUAS-99) evolucionan a bicarbonatadas-cloruradas y se enriquece en los cationes de calcio y magnesio.

Es destacable mencionar que se comparó, por un lado, la composición química de los puntos de agua que se muestrearon en el estudio de Risacher *et al*. (1999) (SUR-1, SUR-6, SUR-2 y SUR-10) y, por otro lado, las muestras tomadas en las 3 campañas de muestreo en la misma ubicación en el presente estudio (SUAS-100, SUAS-99, SUAS-97 y SUAS-95). En éstas se ha obtenido la misma marca química en las aguas analizadas en las 3 campañas de muestreo y en los antecedentes, lo cual implica que no se ha producido una variación temporal importante en la cuenca del salar de Surire.



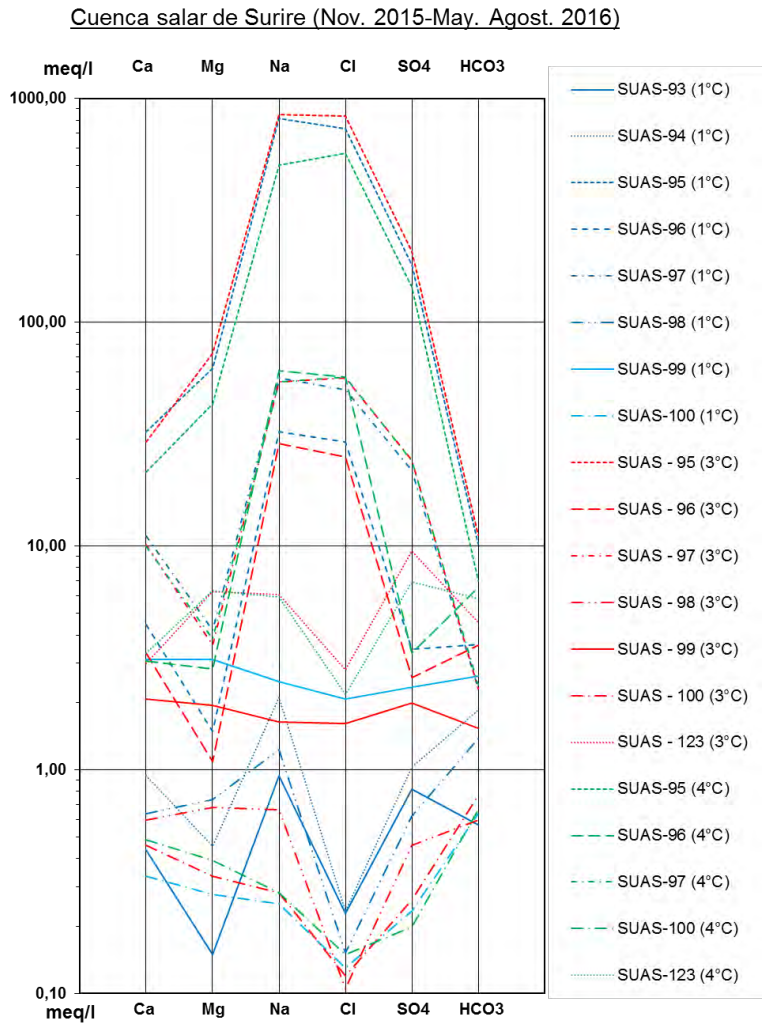


Figura 7.356 Diagramas de Piper y de Schoeller-Berkaloff de las muestras analizadas hidroquímicamente en las diferentes campañas en la cuenca del salar de Surire. Fuente: elaboración propia.

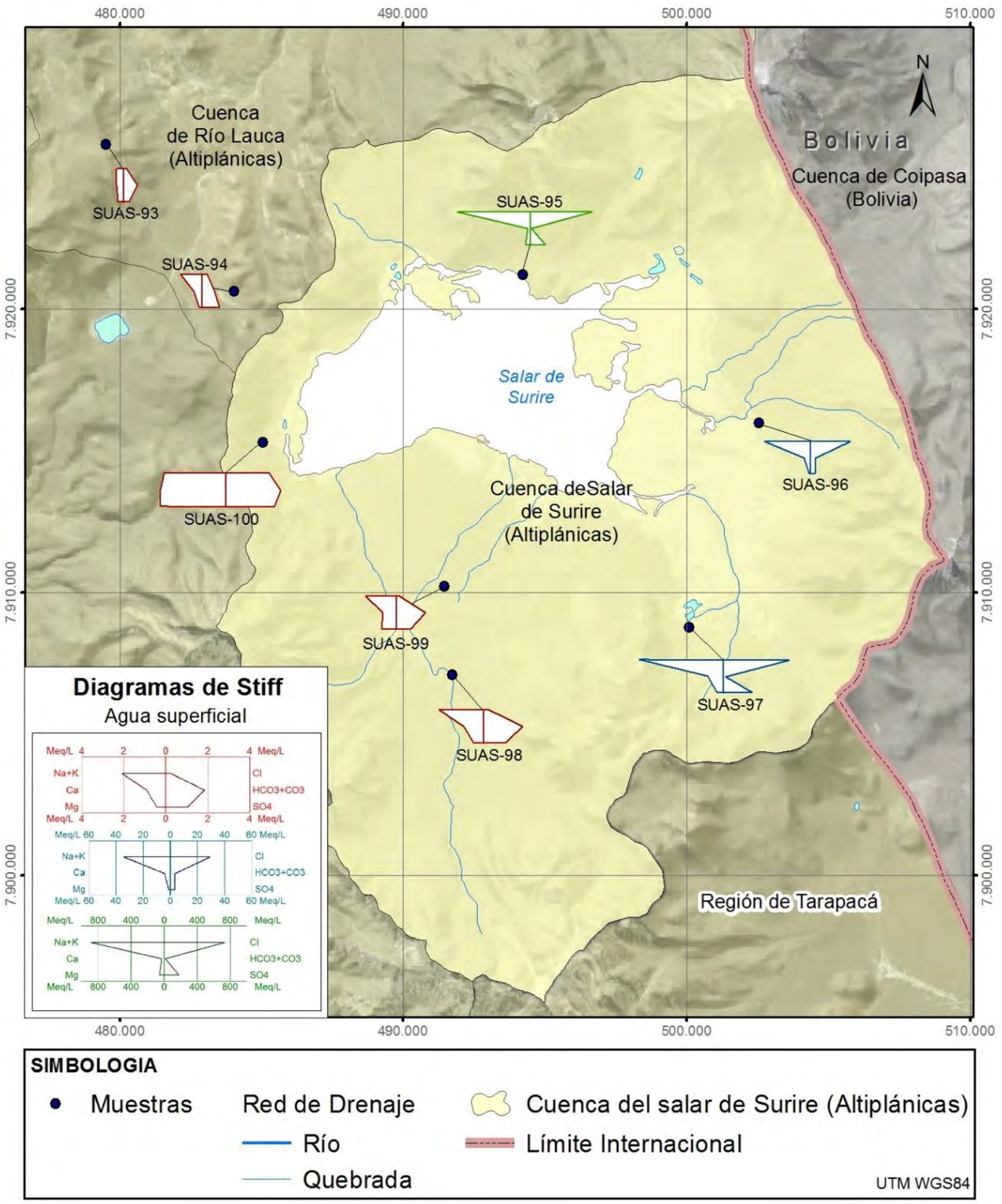


Figura 7.357 Mapa con los diagramas de Stiff de la composición química de las muestras recogidas en la cuenca del salar de Surire en agosto de 2016. Fuente: elaboración propia.

En el Anexo VIII se presenta la evolución temporal durante el presente estudio del contenido de los diferentes elementos mayoritarios y minoritarios en la cuenca del salar de Surire. Los diferentes gráficos indican que las muestras SUAS-95, SUAS-96 y SUAS-97 contienen niveles más altos de arsénico, bromuro, calcio, cloruros, fluoruros, litio, potasio, sodio, sulfatos y boro en todas las campañas de muestreo, siendo la muestra SUAS-95 la que tiene los contenido máximos registrados, seguida de SUAS-97.

El contenido de aluminio es inferior a 0,3 mg/l en todas las muestras analizadas en noviembre de 2015 y agosto de 2016, sin embargo en mayo de 2016 todas las muestras presentan un nivel mayor, entre 0,04 y 0,43 mg/l. Por otro lado, las aguas superficiales del salar de Surire contienen niveles de amonio por debajo de los límites detectables de los instrumentos del laboratorio, excepto la muestra SUAS-97 que presenta 0,68 mg/l y 0,52 mg/l en mayo y agosto de 2016 respectivamente.

Ninguna muestra contiene niveles detectables por el laboratorio de cadmio, cianuro, cromo, plomo, zinc, mercurio (excepto la muestra SUAS-95 en mayo de 2016) y selenio (excepto la muestra SUAS-95 en mayo de 2016).

EVOLUCIÓN DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS AGUAS

Las aguas de la cuenca del salar de Surire presentan una amplia variación en la composición hidroquímica. La muestra SUAS-100 tomada en el borde occidental, refugio de la Conaf, corresponde a aguas frescas, bicarbonatadas cálcicas y muy poco mineralizadas que no están afectadas por los depósitos salinos. La quebrada Huaijata (o Surire) antes de circular por el bofedal son aguas bicarbonatadas sódico-magnésicas que evolucionan a bicarbonatadas –cloruradas cálcico-magnésicas más mineralizadas, por efecto del bofedal. Por otro lado, las muestras ubicadas en el borde norte, oriente y sureste del salar de Surire son cloruradas sódicas y más mineralizadas que el resto de aguas analizadas, reflejo de la circulación por depósitos salinos.

Destaca la muestra SUAS-95, ubicada en la laguna del norte del salar, por ser agua de salmuera típica de salar como indica su alta conductividad eléctrica y composición química. Además, posiblemente esté afectada por un alto grado de evaporación, como refleja su composición isotópica y alto contenido de elementos. Por otro lado, la

composición química de la muestra SUAS-97 evidencia su origen hidrotermal, como se observa en la Figura 7.358.

Figura 7.358 Vertiente hidrotermal Pollequere, ubicada al sureste del salar de Surire. Fuente: elaboración propia.

7.10.4.5 Calidad de las aguas

En la primera campaña de terreno, noviembre de 2015, se analizó el contenido de elementos mayoritarios y minoritarios disueltos en las aguas superficiales y subterráneas para poder comparar con el contenido de elementos mayoritarios y minoritarios totales analizados en el resto de las campañas de muestreo. En el Anexo VIII se presentan los resultados de las mediciones de parámetros *in situ* y análisis de laboratorio, y dentro de cada tabla se remarcaron en rojo aquellos valores que sobrepasan la norma chilena para uso de agua potable NCh 409 y de color verde los valores de contenido de aluminio, litio y boro que superen los límites establecidos en la norma para riego NCh 1.333.

Los resultados del análisis hidroquímico de las aguas recogidas en la primera campaña de terreno, indican que ninguna de las 8 muestras respetan los límites establecidos en la norma NCh 409 en algún elemento, excepto la muestra SUAS-98, la cual sí sería apta para el consumo humano. El resto de muestras superan los valores de arsénico, cloruros, fluoruros, hierro, magnesio, manganeso, sulfatos, sólidos disueltos totales y/o pH establecidos en la norma chilena NCh 409. Además, 3 de las muestras (norte,

este y fuente hidrotermal) superan el nivel de litio expresado en la norma de riego NCh 1.333.

Posteriormente, en mayo de 2016 se analizaron 7 muestras de agua superficial. Todas las muestras superan el límite de arsénico citado en la NCh 409, excepto la muestra SUAS-100 que tiene 0,01 mg/L de arsénico, es decir, el mismo valor que indica la norma. Sin embargo, la muestra SUAS-100 supera ligeramente el límite de boro establecido en la NCh 1.333. El resto de las muestras superan los valores de arsénico, cloruros, fluoruros, hierro, magnesio, manganeso, mercurio, selenio, sulfatos, sólidos disueltos totales y/o pH definidos en la NCh 409.

Finalmente, se analizaron 5 muestras de agua superficial en agosto de 2016. Del mismo modo que la campaña anterior, todas las muestras superaron el contenido de arsénico, excepto la muestra SUAS-100 que no superó ningún límite establecido en las normas NCh 409 y NCh 1.333. El resto de las muestras excedieron los valores de arsénico, cloruros, hierro, magnesio, manganeso, sulfatos, sólidos disueltos totales y/o pH establecidos en la NCh 409 y los valores de boro indicados en la NCh 1.333.

Por lo tanto, las aguas superficiales muestreadas en la cuenca del salar de Surire no son aptas para el consumo humano, excepto la muestra SUAS-100. El resto de muestras superan siempre el contenido de arsénico definido en la norma NCh 409 y puntualmente cada muestra excede el nivel de cloruros, fluoruros, hierro, magnesio, manganeso, mercurio, selenio, sulfatos, sólidos disueltos totales y/o pH establecido en la NCh 409 y el boro limitado en la norma de riego NCh 1.333. Las muestras que superan mayor número de límites establecidos son siempre las muestras SUAS-95 y SUAS-97.

7.10.4.6 Isotopía de las aguas

En el presente estudio se tomaron muestras para el análisis isotópico de la molécula de aguas superficiales alrededor de la cuenca del salar de Surire. En la Figura 7.359 se muestra la ubicación de los puntos de aguas superficiales muestreados en cada campaña de terreno.

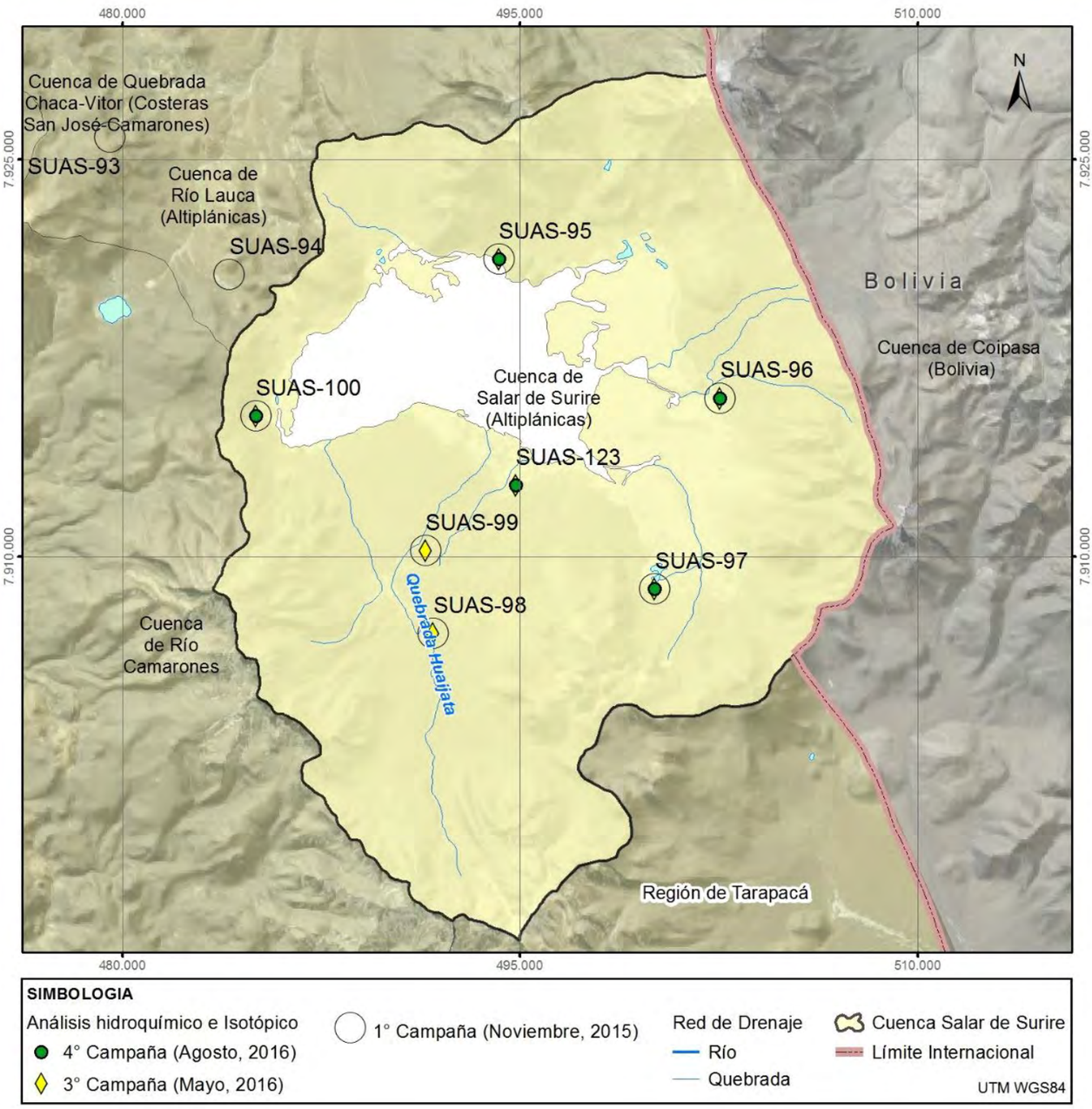


Figura 7.359 Ubicación de las muestras analizadas isotópicamente en la cuenca del salar de Surire en las diferentes campañas de terreno. Fuente: elaboración propia.

En la Tabla 7.223 se indican los valores máximos y mínimos de oxígeno 18 y deuterio obtenidos en cada campaña de muestreo.

Tabla 7.223 Resumen de los valores máximos y mínimos de oxígeno 18 y deuterio obtenidos en las cuatro campañas de muestreo en la cuenca del salar de Surire. Fuente: elaboración propia.

		1°Campaña Noviembre 2015	2°Campaña Febrero 2016	3°Campaña Mayo 2016	4°Campaña Agosto 2016
$\delta^{18}O‰$ SMOW	Máximo	-3,76	-	-3,66	-5,83
	Mínimo	-12,84	-	-13,25	-12,78
δD‰ SMOW	Máximo	-51,49	-	-53,19	-64,60
	Mínimo	-103,15	-	-105,48	-98,93

En la Figura 7.360 se muestra la composición isotópica de las aguas superficiales de color morado que rodean el salar de Surire y de color rojo dos muestras en la cuenca del río Lauca que se recargan en el mismo sector que el borde poniente de la cuenca del salar de Surire, tomadas en noviembre de 2015. De color verde se representan las muestras analizadas en mayo de 2016 y en naranjo las aguas superficiales recogidas en agosto de 2016. Todas las aguas superficiales muestreadas reflejan evaporación, ajustándose a las rectas con pendiente 5, siendo la más evaporada la muestra SUAS-95 en las 3 campañas. Si se comparan las campañas de muestreo no se identifica una tendencia clara de una evolución temporal en la composición isotópica de las aguas analizadas. Es destacable que la composición isotópica de las muestras tomadas en la vertiente Polloquere (SUAS-97) es igual en las 3 campañas.

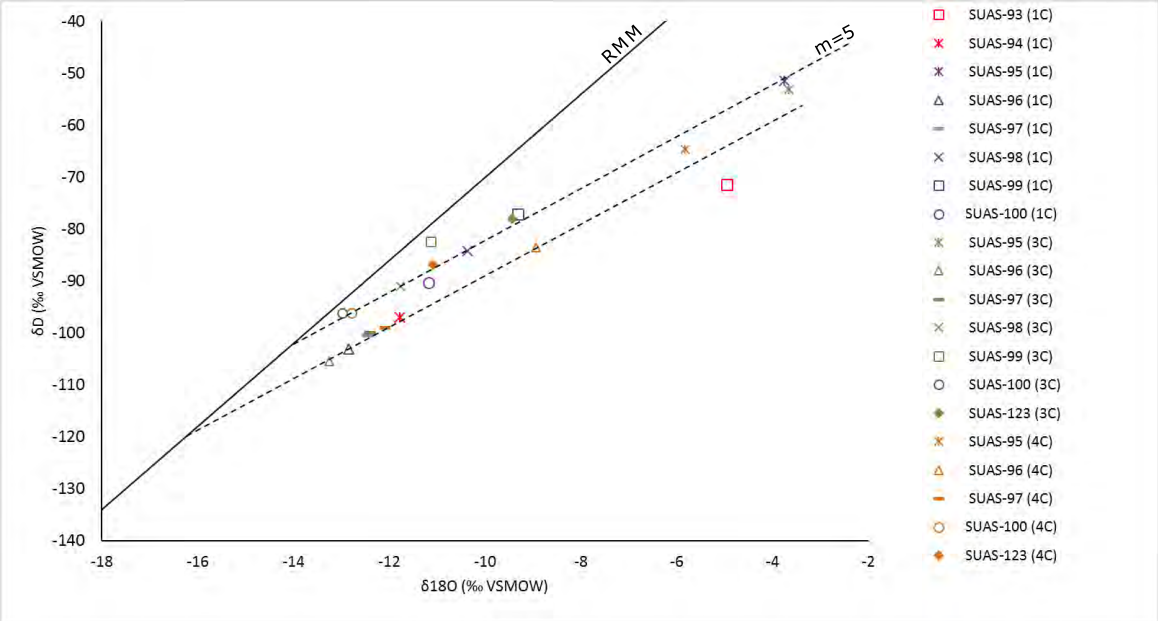


Figura 7.360 **Relación $\delta^{18}O/\delta D$ de las muestras analizadas en la cuenca del** salar de Surire, noviembre de 2015 (morado), mayo de 2016 (verde) y agosto de 2016 (naranjo). Fuente: elaboración propia.

7.10.5 Modelo Conceptual

La cuenca del Salar de Surire tiene una superficie de 552 km^2 y el área que ocupa el Salar es de 61,7 km^2. Es una cuenca cerrada que se desarrolla casi completamente en territorio chileno, a excepción de una pequeña proporción correspondiente a la cabecera de los afluentes que descienden desde la ladera noroccidental del cerro Lliscaya y el cerro Quilhuiri. Limita al norte con la cuenca del río Lauca, al sur con la región de Tarapacá, al este con Bolivia y al oeste con la cuenca del río Camarones.

El salar de Surire representa la zona baja de acumulación del sistema de drenaje de la cuenca endorreica Surire. Las aguas que en mayor cantidad llegan al salar, son aguas de vertientes y dentro de éstas las más importantes por su volumen y contenido salino son las de vertientes calientes, principalmente Polloquere, ubicadas al sureste del salar. Las vertientes de agua fría se encuentran más homogéneamente distribuidas en la periferia del salar.

Según Risacher *et al* (1999), el 90% de la superficie del salar está constituido de limos arcillosos salinos húmedos, muy resbalosos. Además menciona que las lagunas poco profundas, tienen una extensión variable dependiente de la época del año. De acuerdo

a Salas (1975), el nivel de las aguas subterráneas está muy cerca de la superficie, por lo tanto se infiere que las variaciones de su profundidad están relacionadas con los periodos lluviosos en la cuenca, inundándose el salar en las épocas de invierno altiplánico.

Esta cuenca se encuentra en una zona de alta pluviometría en forma líquida y sólida (nieve, granizo), la precipitación media anual estimada con el método de las isoyetas es de 352 mm/año, produciéndose principalmente durante el invierno altiplánico. Una parte de las aguas que precipitan se evapora en los mismos lugares en que cae, otra caería sobre cuerpos de agua, otra logra escurrir superficialmente hasta llegar al salar infiltrándose progresivamente en los acuíferos. Como escorrentía superficial se presenta algunos cursos que fluyen hacia el Salar, los cuales son intermitentes, y en su mayoría se pierden por infiltración. Sólo durante la época estival, cuando aumentan las precipitaciones, se activa el río Surire, principal afluente de la cuenca.

Parte de las precipitaciones infiltran y se acumulan a través de fracturas en las cadenas de volcanes que limitan la cuenca, creando acuíferos colgados y/o recargando al acuífero sedimentario. Por otro lado, el acuífero detrítico corresponde a los depósitos sedimentarios del pleistoceno y holoceno que bordean la cuenca. El acuífero detrítico principal posee porosidad primaria, una transmisividad de 20 y 600 m^2/día y una conductividad hidráulica de 1 a 10 m/día según las estimaciones efectuadas en materiales geológicos similares en otras cuencas vecinas. Además, el propio salar en sí constituye un acuitardo, compuesto de mantos subhorizontales de sales, limos salinos y costras salinas, en parte ligeramente detríticos, de espesor centimétrico a métrico. Dependiendo del grado de disolución de las sales podría comportarse a nivel local como un medio kárstico con una alta transmisividad.

La dirección de las líneas de flujos subterráneas es convergente desde las cotas más altas hacia el núcleo del salar. Según López *et al.* (2006) la superficie del salar aparece ligeramente basculada hacia el noroeste, lo que condiciona tanto la dirección de los flujos de aguas superficiales que acceden al salar como la ubicación de las acumulaciones temporales de agua sobre su superficie. Debido a esta situación, las aguas que proceden del sur de la cuenca al llegar al salar fluyen hacia el oeste.

Las aguas de la cuenca del salar de Surire presenten una amplia variación en la composición hidroquímica. La muestra de agua superficial tomada en el borde

occidental, refugio de la Conaf, corresponde a aguas frescas, bicarbonatadas cálcicas y muy poco mineralizadas. La quebrada Huaijata (o Surire) antes de circular por el bofedal son aguas bicarbonatadas sódico-magnésicas que evolucionan a bicarbonatadas–cloruradas cálcico-magnésicas más mineralizadas, por efecto del bofedal. Por otro lado, las muestras ubicadas en el borde norte, oriente y sureste del salar de Surire son cloruradas sódicas y más mineralizadas que el resto de aguas analizadas, reflejo de la circulación por depósitos salinos. Las aguas superficiales muestreadas en la cuenca del salar de Surire no son aptas para el consumo humano, excepto las aguas superficiales muestreadas en el borde occidental, próxima al refugio de la Conaf. El resto de las muestras superan siempre el contenido de arsénico definido en la norma NCh 409 y puntualmente cada muestra excede otros elementos establecido en la NCh 409 y el nivel de boro definido en la norma de riego NCh 1.333.

Según se puede observar el esquema del modelo conceptual de la cuenca del salar de Surire en la Figura 7.361, la principal entrada al sistema superficial se encuentra dado por las precipitaciones y al sistema subterráneo por la recarga de la precipitación que se infiltran hasta el acuífero. Y las principales salidas del sistema superficial lo constituyen las evaporaciones desde lámina libre de agua en las lagunas y la evapotranspiración desde las vegas y bofedales. Tal como se observa en la Figura 7.361 en menor magnitud los acuíferos descargan bajos caudales a través de vertientes frías y de la vertiente hidrotermal Polloquere. Por lo tanto, según la época del año se produce almacenamiento en el acuífero principal de la cuenca del salar de Surire, principalmente durante el invierno altiplánico.

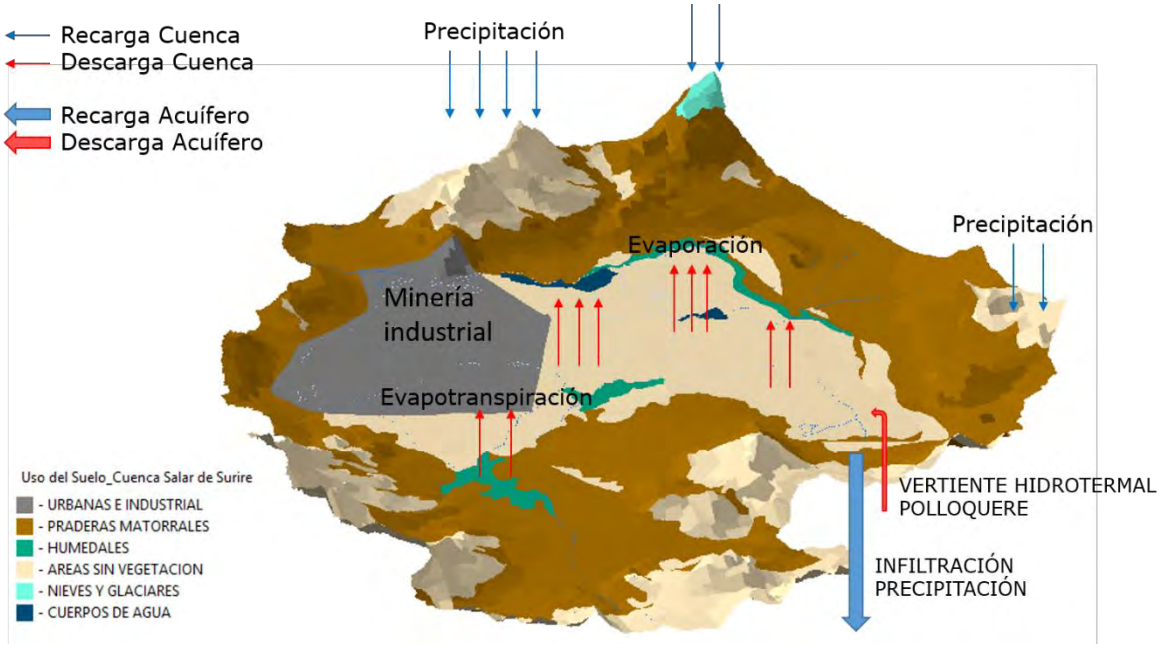


Figura 7.361 Esquema del modelo conceptual hidrogeológico de la cuenca del Salar de Surire. Fuente: modificado de la capa uso del suelo tomada del portal web del SINIA http://ide.mma.gob.cl/.

8. **Balances Preliminares**

A partir de todos los antecedentes desarrollados en los capítulos anteriores, tanto de oferta como de demanda del recurso hídrico, se desarrollan a continuación los balances preliminares por cuenca y acuífero, según corresponda. Para ello se hace una diferencia entre el balance hídrico del sistema real y el balance legal. El primero considerará los consumos reales asociados a cada cuenca y/o acuífero, a partir de las estimaciones realizadas en el Capítulo 6 Línea Base de la Demanda, acápite 6.3.2 Demandas reales. Por otra parte, el balance legal considerará las demandas asociadas a derechos de agua otorgados, de acuerdo a lo desarrollado en el Capítulo 6 Línea Base de la Demanda, acápite 6.1 Sistematización de la Información de Derechos.

8.1 Balance Hídrico del Sistema Real

El desarrollo del balance hídrico del sistema real corresponde a analizar todas las entradas y salidas de agua hacia y desde el sistema, con el objetivo de establecer su disponibilidad hídrica y el estado de equilibrio o desbalance en que se encuentra. En este caso se considera como disponibilidad hídrica la suma de los caudales superficiales y subterráneos salientes, y se debe prestar especial atención en el caso de balances de cuencas intermedias, dado que en este caso se trata de una disponibilidad teórica, pues estos recursos ya están siendo muchas veces utilizados hacia aguas abajo.

Los sistemas a estudiar son, en primer lugar, las nueve cuencas estudiadas anteriormente, considerando las unidades completas, vale decir, incorporando tanto recursos superficiales como subterráneos. En algunos casos, según sea el interés y de acuerdo a lo definido en conjunto con la inspección fiscal, se desarrollarán balances de subcuencas. En segundo lugar, se desarrollarán los balances preliminares de los acuíferos identificados por la DGA en la zona, los cuales corresponden a las unidades de la Cuenca del Río Lluta, Cuenca del Río San José y Cuenca de la Quebrada Chaca-Vítor.

Los balances de cuenca serán desarrollados en una primera instancia a nivel anual, para lo cual se dispone en general de antecedentes con un mayor grado de

confiabilidad. Posteriormente, los balances serán desarrollados a escala mensual, según la disponibilidad de antecedentes y adoptando los criterios que mejor se adapten a la situación de cada sistema.

Para el caso de balances de cuenca, se presenta en la Figura 8.1 un esquema conceptual, a modo referencial, con todas las posibles entradas y salidas, las cuales son analizadas en detalle a continuación. Cabe destacar que todos estos balances son preliminares y han sido desarrollados a partir de toda la información recopilada o desarrollada en el presente estudio.

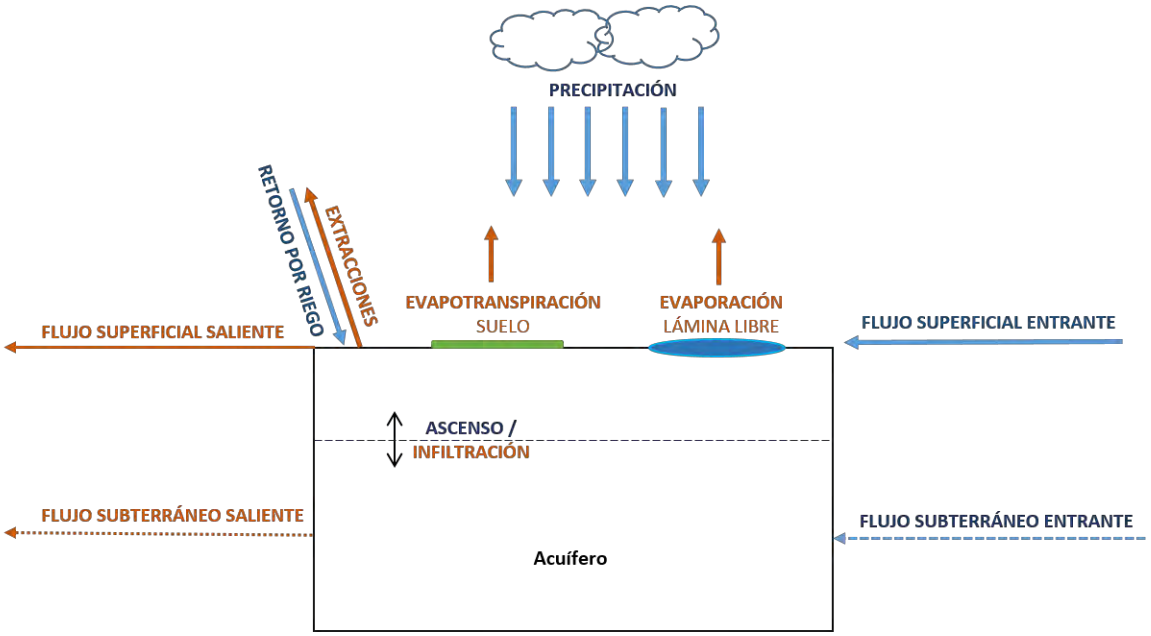


Figura 8.1 Esquema conceptual del balance hídrico general de una cuenca. Fuente: Elaboración propia.

Entradas:

- Precipitaciones: Las precipitaciones se estiman en cada cuenca o subcuenca a partir de las isoyetas de precipitación regional desarrolladas en el Capítulo 7 Línea Base de la Oferta. Esta estimación se desarrolla a nivel anual, y la distribución mensual se hace de acuerdo al patrón de alguna estación meteorológica cercana. El detalle de cálculo de las precipitaciones para cada subcuenca se entrega en el Anexo IX Memoria de Cálculo de Balances Hídricos, en las pestañas Cálculo Pp y ET Anual y Cálculo Pp y ET Mensual.

- Flujo Superficial Entrante: Corresponde al flujo superficial del mismo río, en el caso del desarrollo de balances de subcuencas, o al trasvase desde otras cuencas. La información se corresponde a los promedios anuales y mensuales de la estación fluviométrica correspondiente, o bien al resultado de utilizar métodos de transposición de áreas, en caso no contar con datos reales. Los antecedentes se obtienen del trabajo desarrollado en el Capítulo 7 Línea Base de la Oferta y un detalle particular se incluye en el Anexo IX Memoria de Cálculo de Balances Hídricos, en las pestañas Caudales Estaciones.
- Flujo Subterráneo Entrante: Corresponde al flujo subterráneo desde otras cuencas o subcuencas, nacionales o internacionales. Estos valores han sido estimados a partir de la recopilación de antecedentes y se detalla en cada caso la fuente utilizada.
- Retorno por Riego: Se considera que parte del agua estimada como consumo agrícola es recuperada por el sistema al no ser completamente utilizada por el cultivo. Este valor se ha estimado como un porcentaje, el cual varía en cada cuenca o subcuenca según la situación agrícola, en función del tipo de cultivo y el menor o mayor grado de tecnificación observado, lo cual es detallado en cada caso.

Salidas:

- Evapotranspiración (ET): La evapotranspiración se estima partir de la Fórmula de Turc. Este valor corresponde a la evapotranspiración del suelo, y no considera el efecto de los cultivos existentes. El cálculo se ha realizado para cada subcuenca por bandas, tal como se hizo en el Capítulo 7 Línea Base de la Oferta para cada cuenca, según la distribución de las isoyetas de precipitación regional y el gradiente de temperatura. Este cálculo se realiza a nivel anual y la distribución mensual se hace de acuerdo al patrón de alguna estación meteorológica cercana a partir de los valores de precipitación. El detalle de cálculo de la ET para cada subcuenca se entrega en el Anexo IX Memoria de Cálculo de Balances Hídricos, en las pestañas Cálculo Pp y ET Anual y Cálculo Pp y ET Mensual.
- Evaporación: Se ha estimado la evaporación en las láminas de agua (ríos, lagunas, lagos y embalses) de acuerdo a los valores de evaporación de tanque mensual de las estaciones más cercanas a cada cuenca o subcuenca. El detalle de dicho cálculo se incluye en el Capítulo 6 Línea Base de la Demanda, específicamente en el acápite 6.3.2 Demandas reales.

- Extracciones: Las extracciones corresponden a todos los consumos, tanto superficiales como subterráneos, existentes en la cuenca, de acuerdo a lo estimado en el Capítulo 6 Línea Base de la Demanda, acápite 6.3.2 Demandas reales. Estas demandas han sido estimadas a nivel anual y mensual.
- Flujo superficial Saliente: El flujo superficial saliente corresponde al promedio mensual o anual de la estación fluviométrica existente, o bien se ha estimado mediante transposición de áreas. Existen casos en los cuales no existe flujo superficial saliente, y otros en los cuales ocurre únicamente en épocas de crecidas. Para dichos casos se han considerado valores cero, o un valor estimativo para las crecidas, obtenido de la revisión de antecedentes.
- Flujo Subterráneo Saliente: Corresponde al flujo subterráneo hacia el mar o bien hacia otra cuenca. Los valores utilizados corresponden a antecedentes recopilados en la bibliografía o bien a cálculos estimativos mediante la fórmula de Darcy, los cuales han entregado rangos dada el importante grado de incertidumbre asociado a los parámetros de los acuíferos.

En el caso de los acuíferos, se realizará el balance de las 3 unidades antes mencionadas. Para ello se consideran las siguientes entradas y salidas, con cálculos realizados a nivel anual y luego mensual. En particular las diferencias entre entradas y salidas para el caso de los acuíferos pueden estar ligadas a un agotamiento de sus recursos.

Entradas:

- Recarga al acuífero desde el río: Dado que las unidades acuíferas son de interés mayormente en la zona baja de las cuencas, se ha estimado una recarga desde el río considerando los caudales de este último el punto en que comienza en acuífero. La metodología utilizada en cada caso es particular y se detalla para cada uno de los balances del acuífero.
- Caudal subterráneo entrante: Se considera a partir de la bibliografía un caudal subterráneo entrante desde otro acuífero, en el caso de existir.
- Recarga por infiltración del caudal de retorno por riego: Dada la importancia que tiene el retorno de agua de riego al sistema, se ha considerado un porcentaje de aporte hacia el acuífero que ha sido estimado caso a caso a partir de las características de los sistemas de riego observados.

Salidas:

- Extracciones subterráneas: A partir de las extracciones totales se han estimado aquellas que corresponden a extracciones subterráneas.
- Flujo subterráneo saliente: Se han estimado valores o se han obtenido valores bibliográficos para el flujo subterráneo saliente, ya sea hacia el océano Pacífico o hacia otra cuenca o acuífero vecino. Cabe destacar que existe un alto grado de incertidumbre ligado a la estimación de flujo subterráneo, debido a que no se conocen completamente las propiedades de cada uno de estos sistemas.

8.1.1 Cuenca de la Quebrada de La Concordia

El balance hídrico en la cuenca de la quebrada de La Concordia (territorio chileno), se analizó considerando el área total de drenaje de 720,4 km^2. Para efectos de este estudio, se aplicó el principio de conservación de masa, suponiendo un sistema en equilibrio donde las entradas son iguales a las salidas. Como se mencionó en el subcapítulo de Fluviometría, esta cuenca no cuenta con registros históricos de caudales, además de acuerdo a los antecedentes y las campañas de terreno realizadas, no se evidencian escurrimientos permanentes durante el año, por lo tanto se considera que no existe flujo superficial de salida en la cuenca.

Las principales componentes del balance hídrico consideradas en la cuenca son: como entradas, la precipitación y el flujo subterráneo lateral desde las cuencas adyacentes (río Lluta (sureste) y río Caplina (noreste)), esta última analizada en el estudio SDT N° 214 -DGA (2011); y como salidas, la evapotranspiración, las extracciones subterráneas y una salida subterránea al mar. En la Figura 8.2 se describen las componentes del balance hídrico y en la Tabla 8.2 se presentan los valores estimados a nivel anual.

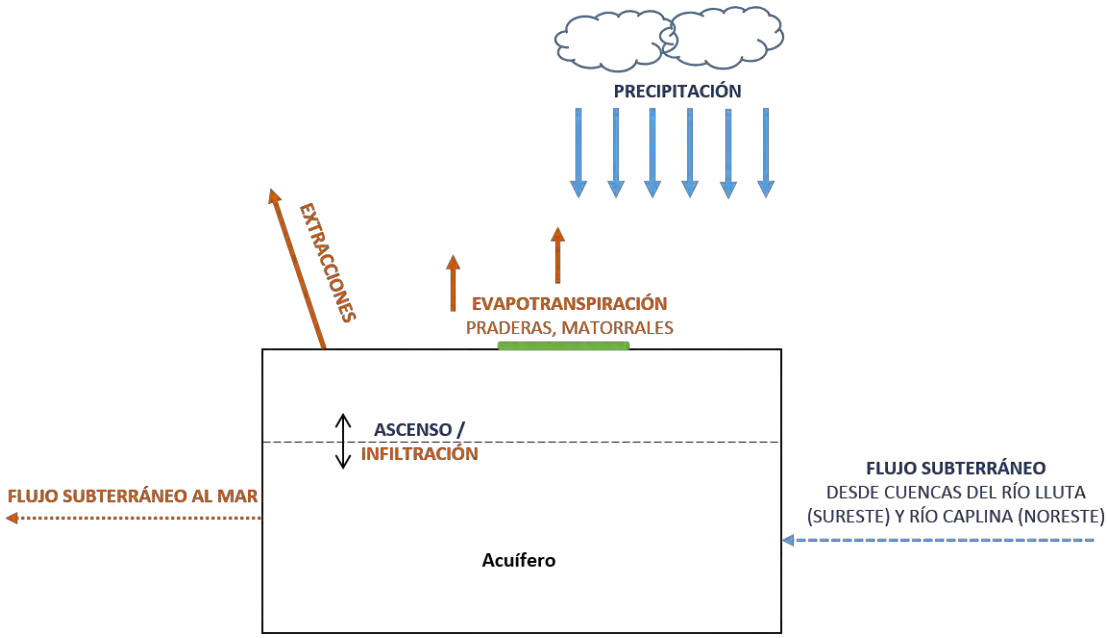


Figura 8.2 Esquema conceptual del balance hídrico en la cuenca de la quebrada de La Concordia (Territorio chileno). Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8.1 Balance hídrico anual en la cuenca de la quebrada de La Concordia (Territorio chileno). Fuente: Elaboración propia.

Sector: Cuenca de la quebrada de La Concordia	Área [km^2]: 720,4
Componente del balance	[l/s]
Entradas [l/s]	
Precipitación	617
Flujo Subterráneo Lateral[1]	100
Salidas [l/s]	
Evapotranspiración[2]	614
Extracciones	81
Caudal superficial estimado saliente	0
Caudal subterráneo estimado saliente[3]	47
Σ Entradas [l/s]	717
Σ Salidas [l/s]	741
Balance [l/s]	-24
Disponibilidad hídrica [l/s] (Q sup+Q sub sale)	47

[1] Valor estimado por SDT N° 214 -DGA (2011)

[2] Valor calculado a partir de la fórmula de Turc

[3] Valor medio estimado del rango 2,2 y 91,2 l/s obtenido mediante la fórmula de Darcy

En esta Tabla se presentan los valores de las distintas componentes del balance hídrico anual, el que resulta negativo, considerando un caudal subterráneo saliente de 47 l/s. Este balance negativo, aunque puede ser despreciable, es factible de presentarse en la cuenca si se observa los descensos sostenidos de los niveles piezométricos del acuífero.

Por su parte, se señala que cada componente conlleva una incertidumbre derivada principalmente de la definición de isoyetas de precipitación media anual, de la estimación del flujo subterráneo lateral y del caudal subterráneo saliente al mar del que no se dispone mayor información para su verificación.

Con el objetivo de disponer información acerca del comportamiento de la cuenca a nivel mensual, en la Tabla 8.2 se realiza un balance hídrico mensual, considerando una distribución de precipitaciones a partir de la estación meteorológica de Putre. Se observa que a nivel mensual durante todo el año el balance resulta negativo y que la disponibilidad hídrica corresponde al caudal subterráneo estimado.

Tabla 8.2 Componentes del balance hídrico en la cuenca de la quebrada de La Concordia (Territorio chileno). Fuente: Elaboración propia.

Componentes del balance	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Entradas [l/s]												
Precipitación[1]	2.396	2.717	1.115	158	59	26	61	68	62	17	65	795
Caudal subterráneo cuencas adyacentes[2]	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Salidas [l/s]												
Evapotrans-piración[3]	2.383	2.702	1.109	157	59	26	61	67	62	17	65	791
Caudal superficial estimado saliente[4]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Extracciones[5]	81	81	81	81	81	81	81	81	81	81	81	81
Caudal subterráneo estimado saliente[6]	47	47	47	47	47	47	47	47	47	47	47	47
Σ Entradas [l/s]	2.496	2.817	1.215	258	159	126	161	168	162	117	165	895
Σ Salidas [l/s]	2.511	2.829	1.237	284	186	153	188	194	189	144	192	918
Balance [l/s]	-14	-12	-21	-26	-27	-27	-27	-27	-27	-27	-27	-23
Disponibilidad hídrica [l/s]	47	47	47	47	47	47	47	47	47	47	47	47

[1] Valor anual estimado por isoyetas de precipitación y distribuido mensualmente acorde a la Est. Putre
[2] Valor estimado por SDT N° 214 -DGA (2011)
[3] Valor calculado a partir de la fórmula de Turc y distribuido según la distribución de precipitación.
[4] Valor estimado en base a los antecedentes de la cuenca y campañas de terreno, en donde no se evidencia escurrimiento
[5] Valor estimado de acuerdo al estudio de la demanda capítulo 6
[6] Valor medio estimado del rango 2,2 y 91 l/s obtenido mediante la fórmula de Darcy, y distribuido constante al no contar con mayores antecedentes

8.1.2 Cuenca del Río Lluta

El balance hídrico en la cuenca del río Lluta se analizó en 4 subcuencas de interés, que representan sectores con distinto tipo de intervención antrópica o que disponen de estación fluviométrica:

- Lluta en Alcérreca
- Lluta en Alcérreca - Socoroma
- Socoroma - Lluta en Panamericana
- Lluta en Alcérreca – Lluta en Panamericana

Se aplicó el principio de conservación de masa, suponiendo un sistema en equilibrio donde las entradas son iguales a las salidas. Los valores de las componentes principales fueron previamente descritos en los subcapítulos de Hidrometeorología y Fluviometría, escogiendo para cada subcuenca los registros de la estación representativa. A continuación se presentan esquemas con las principales componentes de entrada y salida, y posteriormente las tablas con los valores en cada subcuenca.

8.1.2.1 Subcuenca del río Lluta en Alcérreca

Dicha subcuenca tiene un área de drenaje de 1.357 km^2. La principal entrada es la precipitación y se considera como entrada también el retorno debido al método de riego aplicado en la zona, que es no tecnificado. Las principales salidas son la evapotranspiración, la evaporación desde cuerpos de agua, las extracciones superficiales, el flujo superficial y el flujo subterráneo. Las componentes del balance hídrico se describen en la Figura 8.3 y en la Tabla 8.4 se presentan los valores a nivel anual.

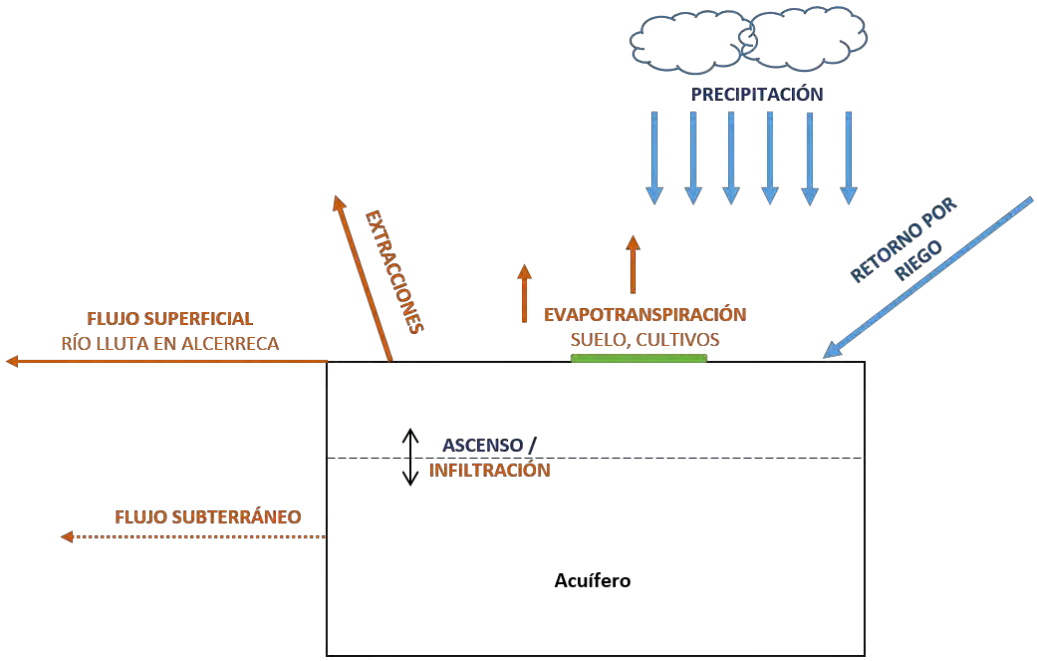


Figura 8.3. Esquema conceptual del balance hídrico en la subcuenca del río Lluta en Alcérreca. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8.3 Balance hídrico anual en la subcuenca río Lluta en Alcérreca. Fuente: Elaboración propia

Sector: río Lluta hasta Alcérreca — Área [km²]: 1.357

Componente del balance	[l/s]
Entradas [l/s]	
Precipitación	13.649
Retorno por riego	498
Salidas [l/s]	
Evapotranspiración[1]	10.788
Evaporación desde cuerpos de agua	35
Extracciones	1.246
Caudal superficial registrado en estación	1.968
Caudal subterráneo estimado saliente[2]	29
Σ Entradas [l/s]	14.147
Σ Salidas [l/s]	14.067
Balance [l/s]	81
Disponibilidad hídrica [l/s] (Q sup+Q sub sale)	1.997

[1] Valor calculado a partir de la fórmula de Turc

[2] Valor medio estimado del rango 0,04 y 58 l/s obtenido mediante la fórmula de Darcy

En esta Tabla se presentan los valores de las distintas componentes del balance hídrico anual, el que resulta positivo en 81 l/s, sin embargo se señala que cada componente conlleva una incertidumbre, en que la definición de isoyetas de precipitación media anual y de la evapotranspiración estimada a partir de Turc aportarían la mayor incertidumbre.

Con el objetivo de disponer información acerca del comportamiento de la cuenca a nivel mensual, en la Tabla 8.4 se realiza un balance hídrico mensual, considerando una distribución de precipitaciones a partir de la estación meteorológica Villa Industrial.

Se observa que a nivel mensual, durante los meses de abril a noviembre, las salidas superan a las entradas. Por el contrario, en los meses de diciembre a marzo ocurriría una mayor infiltración, lo cual es acorde al periodo de mayor precipitación en las cuencas de la región. La disponibilidad hídrica de la subcuenca se plantea como la suma del caudal superficial registrado en la estación fluviométrica y el caudal subterráneo estimado.

Tabla 8.4. Componentes del balance hídrico en la subcuenca del río Lluta en Alcérreca. Fuente: Elaboración propia.

Componentes del balance	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Entradas [l/s]												
Precipitación[1]	51.700	51.074	28.083	5.123	920	1.504	2.915	1.672	370	1.079	2.892	18.636
Retorno por Riego[2]	463	312	449	482	398	381	428	495	564	676	687	631
Salidas [l/s]												
Evapotranspiración[3]	40.863	40.368	22.196	4.049	727	1.189	2.304	1.321	292	853	2.286	14.730
Evaporación desde cuerpos de agua	32	31	33	38	34	34	33	37	40	44	43	37
Extracciones[4]	1.159	781	1.122	1.205	996	952	1.070	1.239	1.411	1.692	1.717	1.579
Caudal superficial sale[5]	3.469	4.885	3.217	1.764	1.400	1.456	1.460	1.376	1.208	1.084	1.036	1.260
Caudal subterráneo estimado saliente[6]	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29
Σ Entradas [l/s]	52.163	51.386	28.531	5.604	1.318	1.885	3.343	2.167	934	1.756	3.578	19.267
Σ Salidas [l/s]	45.552	46.094	26.597	7.085	3.186	3.660	4.896	4.002	2.981	3.702	5.110	17.634
Balance [l/s]	6.611	5.292	1.935	-1.480	-1.868	-1.775	-1.553	-1.835	-2.047	-1.946	-1.532	1.633
Disponibilidad hídrica [l/s]	3.498	4.914	3.246	1.793	1.429	1.485	1.489	1.405	1.237	1.113	1.065	1.289

[1] Según distribución del registro medio mensual del periodo 1985-2014 de la Est. Villa Industrial

[2] Valor considerado como 40% de la demanda de riego

[3] Valor anual estimado por el método de Turc y distribuido mensualmente acorde a la Est. Villa Industrial

[4] Valor estimado de acuerdo al estudio de la demanda capítulo 6.

[5] Registro medio mensual de la Est. río Lluta en Alcérreca

[6] Valor medio estimado del rango 0,04 y 58 l/s obtenido mediante la fórmula de Darcy, y distribuido constante al no contar con mayores antecedentes

8.1.2.2 Subcuenca Río Lluta en Alcérreca – Socoroma

Esta subcuenca tiene un área de drenaje de 931,9 km^2 y no dispone de estación fluviométrica en su cierre. Tiene como aportes la precipitación y el flujo saliente de Lluta en Alcérreca. Las principales salidas son la evapotranspiración, las extracciones superficiales y el flujo saliente del río. Las componentes del balance hídrico se describen en la Figura 8.4 y en la Tabla 8.5 se presentan los valores a nivel anual.

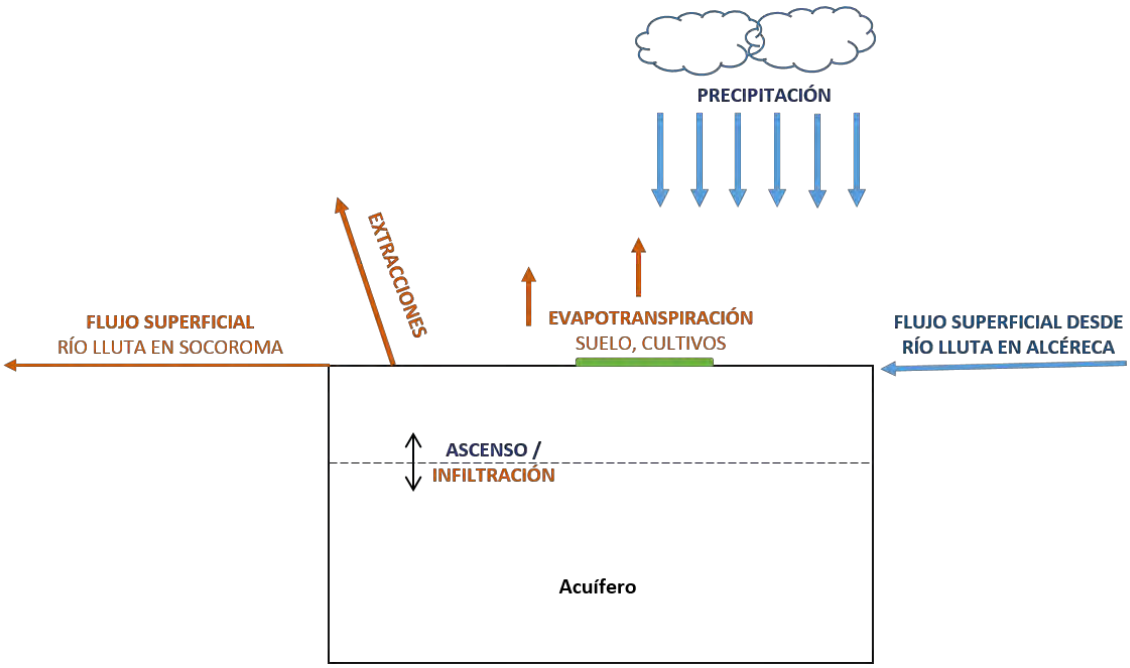


Figura 8.4. Esquema conceptual del balance hídrico en la subcuenca del río Lluta entre Alcérreca y Socoroma. Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar en la tabla, existe un desbalance anual que puede ser explicado principalmente por la incertidumbre asociada al cálculo del caudal superficial en Socoroma mediante transposición de áreas, lo que indica que en este sector es necesaria la instalación de una estación fluviométrica que permita definir un balance que dé cuenta del tipo de consumo que se produce en este sector.

En esta subcuenca no se presentará el balance mensual debido a la incertidumbre dada por la falta de estación fluviométrica y que se ve reflejada en el balance anual.

Tabla 8.5 Balance hídrico anual en la subcuenca río Lluta en Alcérreca - Socoroma. Fuente: Elaboración propia.

Sector: río Lluta hasta Socoroma	Área [km^2]: 931,9
Componente del balance	[l/s]
Entradas [l/s]	
Precipitación	6.995
Caudal superficial registrado en estación	1.968
Caudal subterráneo estimado entrante	29
Salidas [l/s]	
Evapotranspiración[1]	6.188
Extracciones	58
Evaporación desde cuerpos de agua	9
Caudal superficial estimado por transposición[2]	2.976
Caudal subterráneo estimado saliente[3]	3,5
Σ Entradas [l/s]	8.992
Σ Salidas [l/s]	9.235
Balance [l/s]	-243
Disponibilidad hídrica [l/s] (Q sup+Q sub sale)	2.980

[1] Valor calculado a partir de la fórmula de Turc

[2] Valor estimado por transposición de áreas con la Est. Río Lluta en Alcérreca

[3] Valor medio estimado del rango 0,02 y 6,9 l/s obtenido mediante la fórmula de Darcy

8.1.2.3 Subcuenca Socoroma – Río Lluta en Panamericana

Esta subcuenca tiene 1.133 km^2, y representa un tipo de intervención con énfasis en consumo agrícola. Las principales entradas son el caudal desde Socoroma, la precipitación y el retorno por riego, y como salidas la evapotranspiración, las extracciones superficiales, la salida superficial registrada en Lluta en Panamericana y la salida subterránea al mar. Las componentes del balance hídrico se describen en la Figura 8.5 y en la Tabla 8.6 se presentan los valores a nivel anual.

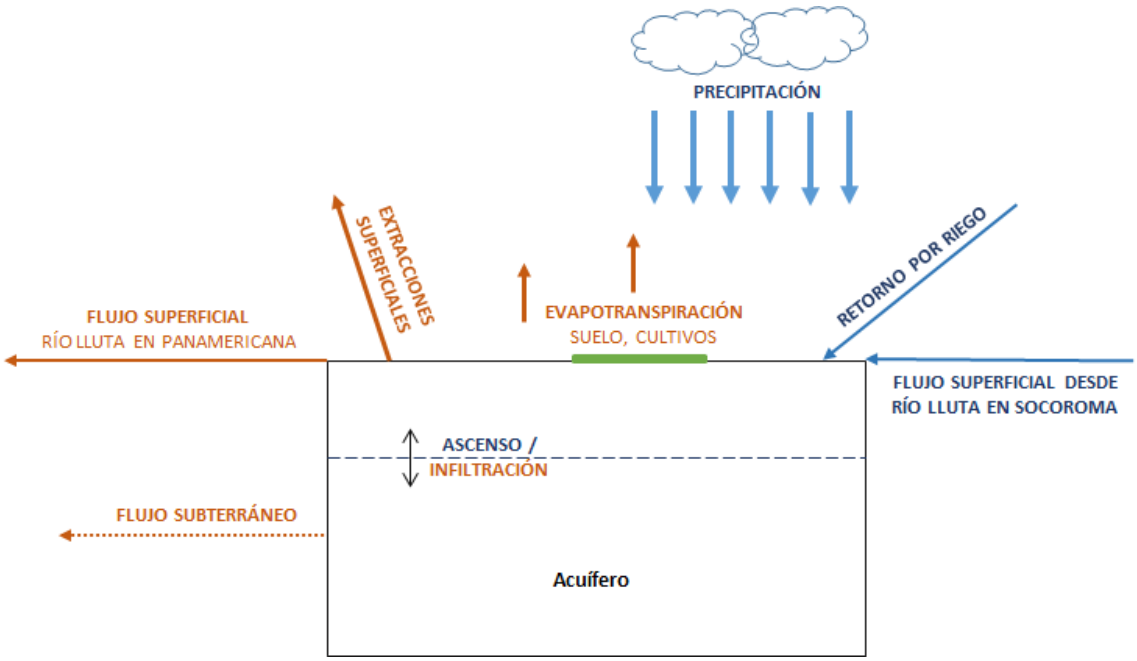


Figura 8.5 Esquema conceptual del balance hídrico en la subcuenca del río Lluta entre Socoroma y Panamericana. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8.6 Balance hídrico anual en la subcuenca río Lluta entre Socoroma y Panamericana. Fuente: Elaboración propia.

Sector: río Lluta hasta Panamericana desde Socoroma	Área [km^2]: 1.133
Componente del balance	[l/s]
Entradas [l/s]	
Precipitación	1.615
Retorno por riego[1]	340
Caudal superficial estimado por transposición	2.976
Caudal subterráneo estimado entrante	3,5
Salidas [l/s]	
Evapotranspiración[2]	1.615
Evaporación desde cuerpos de agua	23
Extracciones	1.042
Caudal superficial registrado en estación	1.266
Flujo subterráneo lateral saliente[3]	50
Caudal subterráneo estimado saliente[4]	23
Σ Entradas [l/s]	4.935
Σ Salidas [l/s]	4.018
Balance [l/s]	916
Disponibilidad hídrica [l/s] (Q sup+Q sub sale)	1.289

[1] Valor considerado como 40% de la demanda de riego

[2] Valor calculado a partir de la fórmula de Turc

[3] Valor estimado por SDT N° 214 -DGA (2011) considerando sólo el aporte del Lluta a la Concordia

[4] Valor estimado de la diferencia del flujo subterráneo lateral y el valor medio del rango 0,7 y 145 l/s obtenido mediante la fórmula de Darcy

Como se puede apreciar en la tabla, el balance anual resulta positivo en 916 l/s, sin embargo se señala que cada componente conlleva una incertidumbre, principalmente el cálculo del caudal superficial en Socoroma mediante transposición de áreas, lo que indica que en este sector es necesaria la instalación de una estación fluviométrica.

En esta subcuenca no se presentará el balance mensual debido a la incertidumbre dada por la falta de estación fluviométrica y que se ve reflejada en el balance anual.

8.1.2.4 Subcuenca Río Lluta entre Alcérreca y Panamericana

Debido a los resultados obtenidos en las subcuencas entre Alcérreca y Socoroma y Socoroma y Panamericana en que se genera una gran incertidumbre por la falta de

control fluviométrico en Socoroma, se calculará el balance hídrico entre Lluta en Alcérreca y Lluta en Panamericana para cerrar el balance.

Dicha subcuenca tiene un área de drenaje de 2.065 km^2. La principal entrada es la precipitación, el retorno por riego y el caudal superficial desde Alcérreca; y las principales salidas son la evapotranspiración, las extracciones superficiales y el flujo superficial. Las componentes del balance hídrico se describen en la Figura 8.6 y en la Tabla 8.7 se presentan los valores a nivel anual.

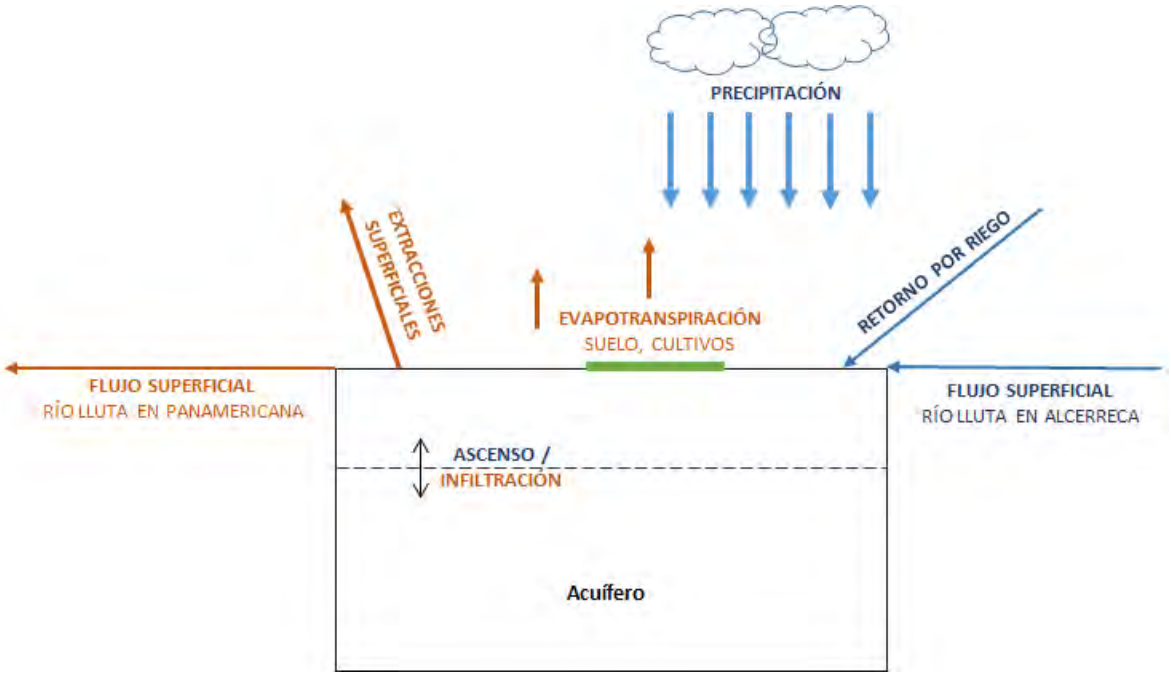


Figura 8.6 Esquema conceptual del balance hídrico en la subcuenca del río Lluta entre Alcérreca y Panamericana. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8.7 Balance hídrico anual en la subcuenca río Lluta entre Alcérreca y Panamericana. Fuente: Elaboración propia.

Sector: río Lluta hasta Panamericana (desde Alcérreca) Área [km^2]: 2.065

Componente del balance	[l/s]
Entradas [l/s]	
Precipitación	8.609
Retorno por riego	340
Caudal superficial registrado en estación	1.968
Caudal subterráneo estimado entrante	29
Salidas [l/s]	
Evapotranspiración[1]	7.802
Evaporación desde cuerpos de agua	32
Extracciones	1.100
Caudal superficial registrado en estación	1.266
Flujo subterráneo lateral saliente[2]	50
Caudal subterráneo estimado saliente[3]	23
Σ Entradas [l/s]	10.947
Σ Salidas [l/s]	10.273
Balance [l/s]	673
Disponibilidad hídrica [l/s] (Q sup+Q sub sale)	1.289

[1] Valor calculado a partir de la fórmula de Turc

[2] Valor estimado por SDT N° 214 -DGA (2011) considerando sólo el aporte del Lluta a la Concordia

[3] Valor estimado de la diferencia del flujo subterráneo lateral y el valor medio del rango 0,7 y 145 l/s obtenido mediante la fórmula de Darcy

En esta Tabla se presentan los valores de las distintas componentes del balance hídrico anual, el que resulta positivo en 673 l/s, sin embargo se señala que cada componente conlleva una incertidumbre, en que la definición de isoyetas de precipitación media anual y de la evapotranspiración estimada a partir de Turc aportarían la mayor incertidumbre.

Con el objetivo de disponer información acerca del comportamiento de la cuenca a nivel mensual, en la Tabla 8.8 se realiza un balance hídrico mensual, considerando una distribución de precipitaciones a partir de la estación meteorológica Putre.

Tabla 8.8. Componentes del balance hídrico en la subcuenca del río Lluta entre Alcérreca y río Lluta en Panamericana. Fuente: Elaboración propia.

Componentes del balance	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Entradas [l/s]												
Precipitación[1]	33.430	37.902	15.560	2.200	822	359	853	942	866	233	910	11.096
Retorno por riego[2]	546	353	124	154	155	172	184	208	359	514	603	714
Caudal superficial registrado en estación	3.469	4.885	3.217	1.764	1.400	1.456	1.460	1.376	1.208	1.084	1.036	1.260
Caudal subterráneo estimado entrante	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29
Salidas [l/s]												
Evapotranspiración[3]	30.298	343.50	14.102	1.994	745	325	773	854	785	211	825	10.057
Evaporación desde cuerpos de agua	39	38	36	32	28	26	25	27	31	35	37	37
Extracciones[4]	1.607	1.091	520	595	628	675	721	783	1.173	1.573	1.785	2.049
Caudal superficial sale[5]	2.788	4.232	3.184	1.154	716	808	842	556	234	168	138	376
Flujo subterráneo lateral estimado	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Caudal subterráneo estimado saliente	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23
Σ Entradas [l/s]	37.475	43.168	18.930	4.147	2.406	2.016	2.526	2.554	2.462	1.859	2.578	13.099
Σ Salidas [l/s]	34.805	39.784	179.14	3.848	2.191	1.906	2.425	2.293	2.296	2.060	2.858	12.592
Balance [l/s]	2.669	3.384	1.016	300	215	109	101	261	166	-200	-280	507
Disponibilidad hídrica [l/s]	2.811	4.255	3.207	1.177	739	831	865	579	257	191	161	399

[1] Valor anual estimado por isoyetas de precipitación y distribuido mensualmente acorde a la Est. Putre

[2] Valor considerado como 40% de la demanda de riego

[3] Valor anual estimado por el método de Turc y distribuido mensualmente acorde a la Est. Putre

[4] Valor estimado de acuerdo al estudio de la demanda capítulo 6

[5] Registro medio mensual de la Est. río Lluta en Panamericana

Se observa que a nivel mensual, durante los meses de octubre y noviembre, las salidas superan a las entradas. Por el contrario, en los meses de diciembre a septiembre ocurriría una mayor infiltración. La disponibilidad hídrica estaría dada por el caudal superficial registrado en la estación fluviométrica y el caudal subterráneo saliente al mar.

Finalmente, con el objetivo de comparar los valores obtenidos en este estudio con los presentados en otros informes para la misma cuenca, en la Tabla 8.9 se sintetiza dicha información con su respectiva referencia. Con relación al balance de la DGA (1987), existen diferencias en las componentes del balance hídrico, no se considera el retorno por riego ni las extracciones superficiales (industriales, mineras, particulares), sin embargo, coinciden en que el balance anual resulta positivo.

Tabla 8.9. Síntesis de los balances hídricos referentes en la cuenca del río Lluta. Fuente: Balance DGA (1987)

COMPONENTES DEL BALANCE HÍDRICO	DGA (1987)		
	R. Lluta en Alcérreca	R. Lluta en Tocontasi	R. Lluta en Panamericana
Superficie [km^2]	1.536	2.658	3.447
Precipitación	13.100	1.9500	19.700
Escorrentía	1.860	2.350	1.440
Evapotranspiración real	11.100	17.100	18.130
TOTAL ENTRADAS	13.100	19.500	19.700
TOTAL SALIDAS	12.960	19.450	19.570
BALANCE [l/s]	+140	+50	+130

8.1.3 Cuenca del Río San José

El balance hídrico en la cuenca del río San José se analizó en 2 subcuencas, que representan sectores con distinto tipo de intervención antrópica o que disponen de estación fluviométrica:

- San José en Ausipar

- San José Bajo

Se aplicó el principio de conservación de masa, suponiendo un sistema en equilibrio donde las entradas son iguales a las salidas. Los valores de las componentes principales fueron previamente descritos en los subcapítulos de Hidrometeorología y Fluviometría, escogiendo para cada subcuenca los registros de la estación representativa. A continuación se presentan esquemas con las principales componentes de entrada y salida, y posteriormente las tablas con los valores en cada subcuenca.

8.1.3.1 Subcuenca del río San José en Ausipar

Dicha subcuenca tiene un área de drenaje de 1.246 km^2. Las principales entradas son la precipitación y el caudal de transvase desde el canal Lauca; y las principales salidas son la evapotranspiración, las extracciones superficiales y el flujo superficial. Las componentes del balance hídrico se describen en la Figura 8.7 y en la Tabla 8.10 se presentan los valores a nivel anual.

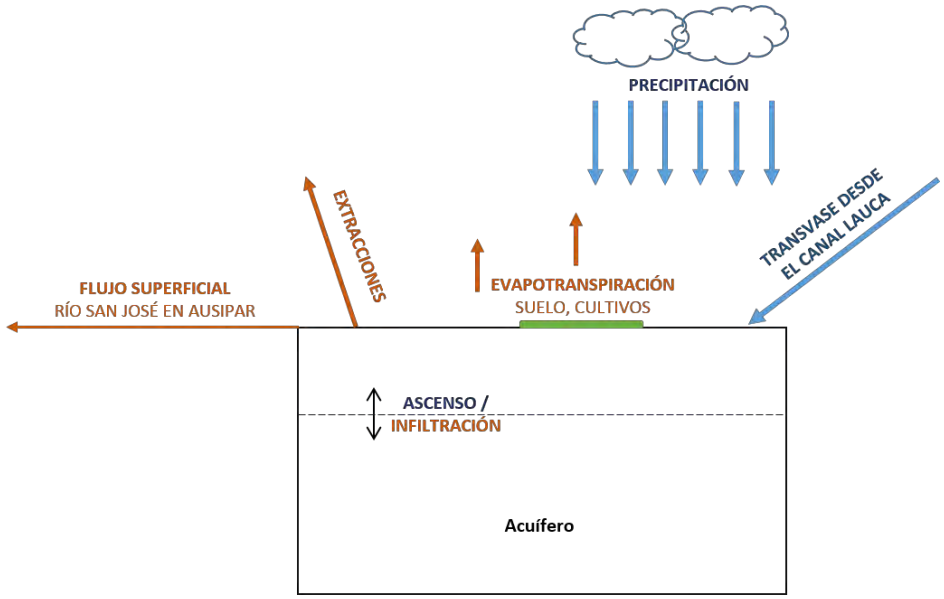


Figura 8.7. Esquema conceptual del balance hídrico en la subcuenca del río San José en Ausipar. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8.10 Balance hídrico anual en la subcuenca río San José en Ausipar. Fuente: Elaboración propia.

Sector: río San José hasta Ausipar	Área [km^2]: 1.246
Componente del balance	[l/s]
Entradas [l/s]	
Precipitación	6.101
Transvase desde el canal Lauca[1]	767
Salidas [l/s]	
Evapotranspiración[2]	5.650
Evaporación desde cuerpos de agua	48
Extracciones	18
Caudal superficial registrado en estación	1.124
Caudal subterráneo estimado saliente[3]	0
Σ Entradas [l/s]	6.868
Σ Salidas [l/s]	6.841
Balance [l/s]	27
Disponibilidad hídrica [l/s] (Q sup sale)	1.124

[1] Registro medio anual de la Est. Canal Lauca en Sifón no 1

[2] Valor calculado a partir de la fórmula de Turc

[3] Valor estimado como nulo al considerar que la estación fluviométrica registra el caudal total saliente

En esta Tabla se presentan los valores de las distintas componentes del balance hídrico anual, el que resulta positivo en 27 l/s, sin embargo se señala que cada componente conlleva una incertidumbre, en que la definición de isoyetas de precipitación media anual y de la evapotranspiración estimada a partir de Turc aportarían la mayor incertidumbre.

Con el objetivo de disponer información acerca del comportamiento de la cuenca a nivel mensual, en la Tabla 8.11 se realiza un balance hídrico mensual, considerando una distribución de precipitaciones a partir de la estación meteorológica Belén.

Tabla 8.11. Componentes del balance hídrico en la subcuenca del río San José en Ausipar. Fuente: Elaboración propia.

Componentes del balance	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Entradas [l/s]												
Precipitación[1]	24.766	26.346	12.915	401	274	325	588	1.261	180	197	358	6.817
Trasvase desde Canal Lauca	900	867	847	757	723	717	705	677	707	728	773	803
Salidas [l/s]												
Evapotranspiración[2]	22.935	24.398	11.960	372	253	301	544	1168	166	182	331	6.313
Evaporación desde cuerpos de agua	43	42	45	52	47	46	45	50	55	60	58	50
Extracciones[3]	24	17	17	13	13	11	13	15	20	25	25	27
Caudal superficial registrado en la estación[4]	1.095	2.255	2.082	995	982	1.150	950	877	786	770	768	782
Caudal subterráneo estimado saliente	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Σ Entradas [l/s]	25.666	27.213	13.762	1.158	997	1.042	1.293	1.938	887	925	1.131	7.620
Σ Salidas [l/s]	24.098	26.712	14.104	1.432	1.295	1.508	1.553	2.110	1.028	1.037	1.183	7.173
Balance [l/s]	1.568	501	-342	-274	-298	-466	-260	-172	-141	-112	-52	447
Disponibilidad hídrica [l/s]	1.095	2.255	2.082	995	982	1.150	950	877	786	770	768	782

[1] Según distribución del registro medio mensual del periodo 1985-2014 de la Est. Belén DCP

[2] Valor anual estimado por el método de Turc y distribuido mensualmente acorde a la Est. Belén DCP

[3] Valor estimado de acuerdo al estudio de la demanda capítulo 6

[4] Registro medio mensual de la Est. río San José en Ausipar

Se observa que a nivel mensual, durante los meses de marzo a noviembre, las salidas superan a las entradas. Por el contrario, en los meses de diciembre a febrero ocurriría una mayor infiltración, lo cual es acorde al periodo de mayor precipitación en las cuencas de la región. La disponibilidad hídrica estaría dada por el caudal superficial registrado en la estación fluviométrica.

8.1.3.2 Subcuenca del río San José Bajo

Dicha subcuenca tiene un área de drenaje de 1.858 km^2 y no dispone de control fluviométrico a la salida. Las principales entradas son la precipitación, el retorno debido a los excedentes del riego y el caudal superficial registrado en la estación fluviométrica San José en Ausipar; y las principales salidas son la evapotranspiración, las extracciones y el flujo superficial. Las componentes del balance hídrico se describen en la Figura 8.8 y en la Tabla 8.12 se presentan los valores a nivel anual.

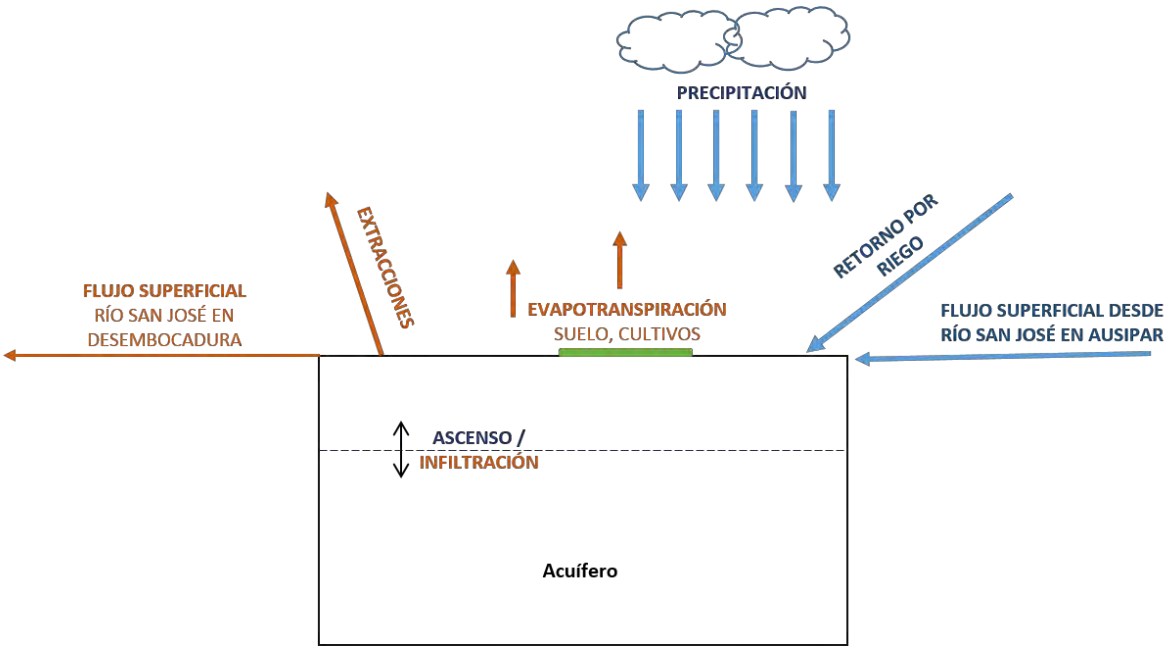


Figura 8.8. Esquema conceptual del balance hídrico en la subcuenca río San José Bajo. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8.12 Balance hídrico anual en la subcuenca río San José Bajo. Fuente: Elaboración propia.

Sector: río San José Bajo	Área [km^2]: 1.858
Componente del balance	[l/s]
Entradas [l/s]	
Precipitación	954
Retorno por riego[1]	503
Caudal superficial registrado en estación	1.124
Salidas [l/s]	
Evapotranspiración[2]	954
Evaporación desde cuerpos de agua	0
Extracciones	2.700
Caudal superficial de crecida[3]	149
Caudal subterráneo estimado saliente[4]	0
Σ Entradas [l/s]	2.581
Σ Salidas [l/s]	3.803
Balance [l/s]	-1.221
Disponibilidad hídrica [l/s] (Q sup sale)	0

[1] Valor considerado como 30% de la demanda de riego

[2] Valor calculado a partir de la fórmula de Turc

[3] Valor estimado considerando el volumen de una crecida media anual

[4] Valor estimado como nulo al considerar la cantidad de pozos de extracción en la parte baja

En la Tabla 8.12 se presentan los valores de las distintas componentes del balance hídrico, el que resulta negativo en más de 1.000 l/s lo que indica una sobreexplotación, sin embargo se señala que cada componente conlleva una incertidumbre.

Con el objetivo de disponer información acerca del comportamiento de la cuenca a nivel mensual, en la Tabla 8.13 se realiza un balance hídrico mensual, considerando una distribución de precipitaciones a partir de la estación meteorológica Codpa.

Tabla 8.13 Componentes del balance hídrico en la subcuenca río San José Bajo. Fuente: Elaboración propia.

Componentes del balance	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Entradas [l/s]												
Precipitación[1]	4.262	4.921	1.405	0	0	0	269	516	0	40	0	298
Caudal superficial registrado en estación[2]	1.095	2.255	2.082	995	982	1.150	950	877	786	770	768	782
Retorno por riego	793	629	782	614	413	307	368	419	700	1.004	995	1.016
Salidas [l/s]												
Evapotranspiración[3]	4.260	4.918	1.405	0	0	0	269	516	0	40	0	298
Evaporación desde cuerpos de agua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Extracciones[4]	3.033	2.587	3.004	2.544	1.996	1.708	1.873	2.013	2.782	3.612	3.588	3.644
Caudal superficial estimado[5]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Caudal subterráneo estimado saliente	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Σ Entradas [l/s]	6.150	7.804	4.269	1.609	1.394	1.457	1.587	1.812	1.487	1.815	1.764	2.096
Σ Salidas [l/s]	7.293	7.505	4.408	2.544	1.996	1.708	2.142	2.529	2.782	3.651	3.588	3.941
Balance [l/s]	-1.143	299	-139	-935	-601	-251	-555	-717	-1.295	-1.837	-1.824	-1.846

[1] Según distribución del registro medio mensual del periodo 1985-2014 de la Est. Codpa

[2] Registro medio mensual de la Est. río San José en Ausipar

[3] Valor anual estimado por el método de Turc y distribuido mensualmente acorde a la Est. Codpa

[4] Valor estimado de acuerdo al estudio de la demanda capítulo 6

[5] Valor estimado nulo al no evidenciarse flujo constante en el cauce y de no contar con mayores antecedentes

Se observa que a nivel mensual, únicamente durante el mes de febrero la entrada es superior a la salida, mientras que durante todo el resto del año las salidas superan a las entradas, incluyendo el periodo de mayor precipitación en las cuencas de la región (excluyendo febrero). En esta subcuenca no habría disponibilidad hídrica.

Finalmente, con el objetivo de comparar los valores obtenidos en este estudio con los presentados en otros informes para la misma cuenca, en la Tabla 8.14 se sintetiza dicha información con su respectiva referencia. Con relación al área definida para el balance, sólo la de DGA (1987) concuerda con este estudio. A pesar de que la magnitud de los valores del balance (R. San José antes B.T. Azapa) son distintos, se coincide en que dicha subcuenca está en déficit.

Tabla 8.14. Síntesis de los balances hídricos referentes en la cuenca del río San José. Fuente: Elaboración propia en base a antecedentes.

COMPONENTES DEL BALANCE HÍDRICO		DGA (1987)		JICA-DGA (1995)			CONIF-BF CORFO (1995)	Arrau-DGA (1997) Periodo 1988-1995	AC Ingenieros (2010)
		R. San José antes B.T. Azapa (i)	R. San José Total (ii)	1992	1993	1994			
ENTRADAS [l/s]									
Precipitación		5.840	7.670						
Caudal del canal Lauca		580							
Flujo subterráneo entrante (margen oriente)								146	198
Recarga desde la superficie	Percolación por canales, agua potable y crecidas							210	
	Percolación de riego y agua potable								210
	Infiltración de Lluvia y escorrentía								548
Caudal medio anual del río San José en Ausipar antes bocatoma				1.101	1.101	1.101	1.108		
SALIDAS [l/s]									
Captaciones de agua								892	
Extracciones desde el almacenamiento del acuífero								513	567
Flujo base de vertientes		1.280	0						199
Afloramientos subterráneos									174
Flujo subterráneo saliente									10
Evapotranspiración en zonas de riego		5.450	8.280				718		
Caudal promedio anual de crecidas que llegan al mar				149	149	149	149		
Consumos de agua: riego, agua potable, industrial y otros usos			300	1.278	1.248	1.447	711		
TOTAL ENTRADAS (+)		6.420	7.670	1.101	1.101	1.101	1.108	356	956
TOTAL SALIDAS (-)		6.730	8.580	1.427	1.397	1.596	1.578	379	950
BALANCE [l/s]		-310	-910	-326	-296	-495	-470	-23	6

(i) El balance incluye un caudal de entrada de 0,58 m3/s.

(ii) Se deben considerar otros consumos de 0,30 m3/s.

8.1.4 Cuenca de la Quebrada Chaca-Vítor

La cuenca tiene un área de drenaje de 2.769 km^2. Las principales entradas son la precipitación y el retorno por riego; y las principales salidas son la evapotranspiración

y las extracciones superficiales. Las componentes del balance hídrico se describen en la Figura 8.9 y en la Tabla 8.15 se presentan los valores a nivel anual.

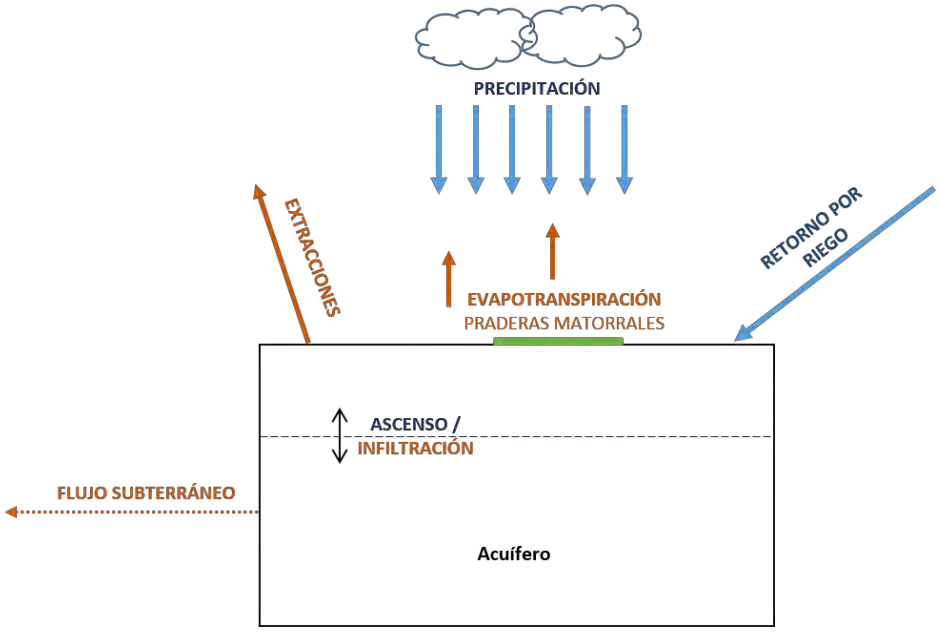


Figura 8.9 Esquema conceptual del balance hídrico en la cuenca de la Quebrada Chaca-Vítor. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8.15 Balance hídrico anual en la cuenca de la quebrada Chaca Vítor. Fuente: Elaboración propia.

Sector: Cuenca de la quebrada Chaca-Vítor	Área [km^2]: 2.769
Componente del balance	[l/s]
Entradas [l/s]	
Precipitación	2.985
Retorno por riego[1]	44
Salidas [l/s]	
Evapotranspiración[2]	2.836
Evaporación desde cuerpos de agua	5
Extracciones	153
Caudal superficial estimado saliente[3]	0
Caudal subterráneo estimado saliente[4]	3,7
Σ Entradas [l/s]	3.029
Σ Salidas [l/s]	2.998
Balance [l/s]	32
Disponibilidad hídrica [l/s] (Q sup sale + Q sub sale)	3,7

[1] Valor considerado como 30% de la demanda de riego

[2] Valor calculado a partir de la fórmula de Turc

[3] Valor estimado como nulo al no evidenciarse flujo constante en el cauce

[4] Valor medio estimado del rango 0,07 y 7,2 l/s obtenido mediante la fórmula de Darcy

En esta Tabla se presentan los valores de las distintas componentes del balance hídrico anual, el cual resulta positivo, al considerar un caudal subterráneo saliente de 3,7 l/s. Sin embargo se señala que cada componente conlleva una incertidumbre, en que la definición de isoyetas de precipitación media anual y de la evapotranspiración estimada a partir de Turc aportarían la mayor incertidumbre.

Con el objetivo de disponer información acerca del comportamiento de la cuenca a nivel mensual, en la Tabla 8.16 se realiza un balance hídrico mensual, considerando una distribución de precipitaciones a partir de la estación meteorológica Esquiña.

Tabla 8.16 Componentes del balance hídrico en la cuenca de la quebrada Chaca-Vítor. Fuente: Elaboración propia.

Componentes del balance	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Entradas [l/s]												
Precipitación[1]	9.268	16.938	6.924	554	0	5	551	824	206	3	13	1.531
Retorno por riego	71	66	59	35	17	13	16	18	36	60	65	76
Salidas [l/s]												
Evapotranspiración[2]	8.805	16.092	6.578	526	0	5	524	783	195	2	13	1.454
Evaporación desde cuerpos de agua	6	5	5	4	4	3	3	4	5	6	6	6
Extracciones[3]	242	225	202	122	62	49	59	68	126	206	222	259
Caudal superficial saliente	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Caudal subterráneo estimado saliente[4]	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7
Σ Entradas [l/s]	9.339	17.004	6.982	588	17	18	567	842	242	62	78	1.607
Σ Salidas [l/s]	9.057	16.326	6.789	655	70	61	589	859	330	218	244	1.723
Balance [l/s]	282	678	194	-67	-53	-43	-23	-16	-89	-156	-166	-117
Disponibilidad hídrica [l/s]	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7

[1] Según distribución del registro medio mensual del periodo 1985-2014 de la Estación Esquiña

[2] Valor anual estimado por el método de Turc y distribuido mensualmente acorde a la Estación Esquiña

[3] Valor mensual estimado en el Estudio de la Demanda, Capítulo 6

[4] Valor medio estimado del rango 0,07 y 7,2 l/s obtenido mediante la fórmula de Darcy, y distribuido constante al no contar con mayores antecedentes

Se observa que a nivel mensual, durante los meses de abril a diciembre, las salidas superan a las entradas. Por el contrario, en los otros meses ocurriría una mayor infiltración, lo cual es acorde al periodo de mayor precipitación en las cuencas de la región. La disponibilidad hídrica estaría dada por el caudal subterráneo estimado.

Finalmente, con el objetivo de comparar los valores obtenidos en este estudio con los presentados en otros informes para la misma cuenca, en la Tabla 8.17 se sintetiza dicha información con su respectiva referencia. Con relación al balance de la DGA (1987), existen diferencias en el área de la cuenca y por consiguiente los valores de las componentes del balance son distintos a los considerados en este estudio.

Tabla 8.17. Síntesis de los balances hídricos referentes en la cuenca de la quebrada Chaca Vítor. Fuente: Elaboración propia.

COMPONENTES DEL BALANCE HÍDRICO	DGA (1987) Entre R. San José y R. Camarones
Superficie [km^2]	2.740
Precipitación	3.510
Escorrentía	80
Evapotranspiración real	3.320
TOTAL ENTRADAS (+)	3.510
TOTAL SALIDAS (-)	3.400
BALANCE [l/s]	+110

8.1.5 Cuenca del Río Camarones

El balance hídrico en la cuenca del río Camarones se analizó en 2 subcuencas, que representan sectores con distinto tipo de intervención antrópica o que disponen de estación fluviométrica:

- Río Camarones en Chilpe
- Río Camarones entre Chilpe y Conanoxa

8.1.5.1 Río Camarones en Chilpe

Dicha subcuenca tiene un área de drenaje de 1.153 km^2, incluyendo el embalse Caritaya. Cabe mencionar que el embalse ejerce un control importante en los escurrimientos de la parte alta, en especial sobre el río Caritaya, uno de los principales afluentes del río Camarones. En el estudio de Con Potencial Consultores Spa (2016), se

presenta mayor detalle de los balances hídricos en la cuenca. Sin embargo, para efectos de este estudio, se aplicó el principio de conservación de masa, suponiendo un sistema en equilibrio donde las entradas son iguales a las salidas. Los valores de las componentes principales fueron previamente descritos en los subcapítulos de Hidrometeorología y Fluviometría, escogiendo los registros de la estación representativa. La principal entrada es la precipitación y el retorno por riego; y las principales salidas son la evapotranspiración, la evaporación desde la lámina del embalse, las extracciones y el flujo superficial.

Las componentes del balance hídrico se describen en la Figura 8.10 y en la Tabla 8.18 se presentan los valores a nivel anual.

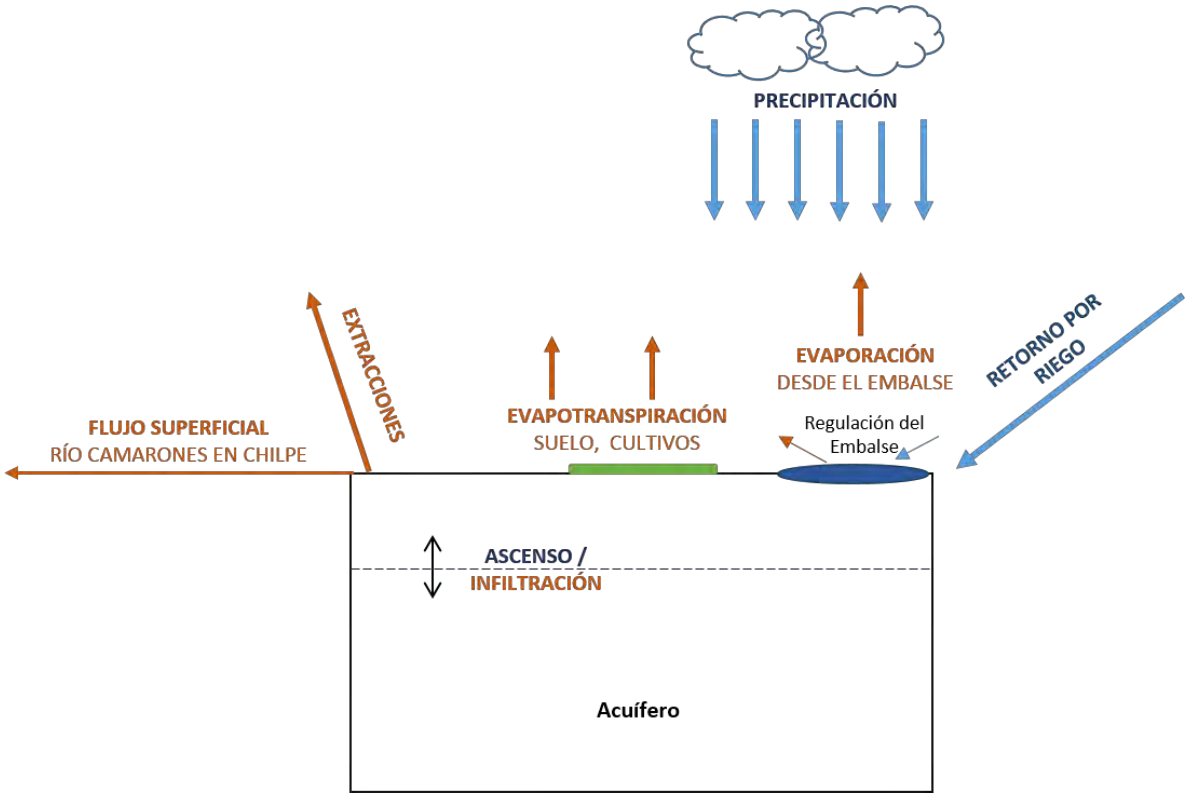


Figura 8.10. Esquema conceptual del balance hídrico en la subcuenca del río Camarones en Chilpe. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8.18 Balance hídrico anual en la subcuenca del río Camarones en Chilpe. Fuente: Elaboración propia.

Sector: río Camarones hasta Chilpe	Área [km^2]: 1.153
Componente del balance	[l/s]
Entradas [l/s]	
Precipitación	7.476
Retorno por riego[1]	355
Salidas [l/s]	
Evapotranspiración[2]	6.817
Evaporación desde cuerpos de agua	308
Extracciones	1.184
Caudal superficial registrado en estación[3]	1.122
Caudal subterráneo estimado saliente[4]	5,8
Σ Entradas [l/s]	7.831
Σ Salidas [l/s]	9.437
Balance [l/s]	-1.606
Disponibilidad hídrica [l/s] (Q sup+Q sub sale)	1.127

[1] Valor considerado como 30% de la demanda de riego

[2] Valor calculado a partir de la fórmula de Turc

[3] Registro medio anual de la Est. río Camarones en Chilpe

[4] Valor medio estimado del rango 0,01 y 12 l/s obtenido mediante la fórmula de Darcy

En esta Tabla se presentan los valores de las distintas componentes del balance hídrico anual, el que resulta negativo en más de 1.000 l/s. Este error de cierre es importante y puede explicarse en que cada componente conlleva una incertidumbre, fundamentalmente en este caso aquella relacionada a la definición de isoyetas de precipitación media anual y de la evapotranspiración estimada a partir de Turc.

Con el objetivo de disponer información acerca del comportamiento de la cuenca a nivel mensual, en la Tabla 8.19 se realiza un balance hídrico mensual, considerando una distribución de precipitaciones a partir de la estación meteorológica Esquiña.

Tabla 8.19. Componentes del balance hídrico en la subcuenca río Camarones en Chilpe. Fuente: Elaboración propia.

Componentes del balance	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Entradas [l/s]												
Precipitación[1]	23.209	42.417	17.338	1.386	0	13	1.380	2.063	515	6	33	3.833
Retorno por riego	456	390	396	305	239	204	230	264	359	444	458	512
Salidas [l/s]												
Evapotranspiración[2]	21.163	38.677	15.810	1264	0	12	1.258	1.882	470	6	30	3.495
Evaporación desde cuerpos de agua	369	339	321	276	238	212	227	278	339	387	407	398
Extracciones[3]	1.521	1.302	1.322	1.019	798	681	768	881	1.199	1.481	1.527	1.709
Caudal superficial saliente	1.940	1.920	1.580	920	840	740	840	760	740	1.020	1.100	1.060
Caudal subterráneo estimado saliente[4]	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8
Σ Entradas [l/s]	23.817	42.937	17.866	1.793	319	285	1.687	2.415	994	598	643	4.516
Σ Salidas [l/s]	25.000	42.238	19.033	3.479	1.877	1.645	3.094	3.800	2.747	2.894	3.064	6.662
Balance [l/s]	-1.177	699	-1.166	-1.685	-1.558	-1.360	-1.407	-1.385	-1.754	-2.296	-2.421	-2.146
Disponibilidad hídrica [l/s]	1.940	1.920	1.580	920	840	740	840	760	740	1.020	1.100	1.060

[1] Según distribución del registro medio mensual del periodo 1985-2014 de la Estación Esquiña

[2] Valor anual estimado por el método de Turc y distribuido mensualmente acorde a la Estación Esquiña

[3] Valor mensual estimado en el Estudio de la Demanda, Capítulo 6

[4] Valor medio estimado del rango 0,01 y 12 l/s obtenido mediante la fórmula de Darcy, y distribuido constante al no contar con mayores antecedentes

Se observa que a nivel mensual casi en la totalidad de los meses hay déficit excepto en el mes de febrero. La disponibilidad hídrica estaría dada por el caudal superficial registrado en la estación fluviométrica y el caudal subterráneo estimado.

8.1.5.2 Río Camarones entre Chilpe y Conanoxa

Las componentes del balance hídrico se describen en la Figura 8.11 y en la Tabla 8.20 se presentan los valores a nivel anual.

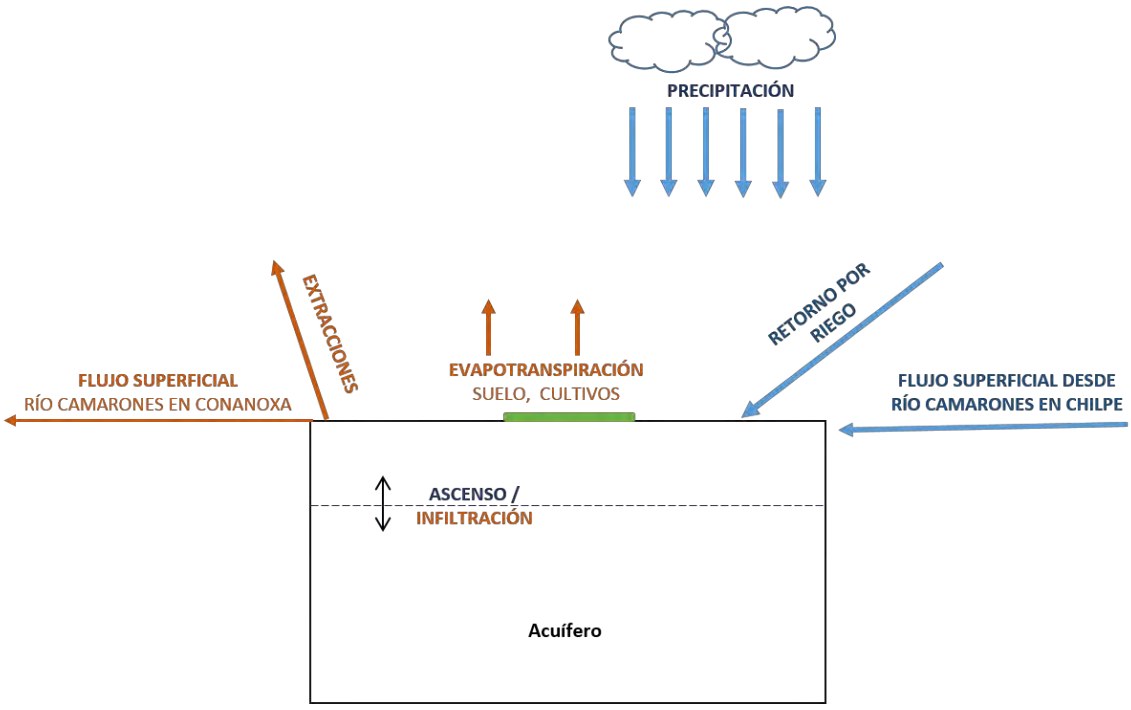


Figura 8.11. Esquema conceptual del balance hídrico en la subcuenca del río Camarones entre Chilpe y Conanoxa. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8.20 Balance hídrico anual en la subcuenca del río Camarones entre Chilpe y Conanoxa. Fuente: Elaboración propia.

Sector: río Camarones entre Chilpe y Conanoxa — Área [km^2]: 843

Componente del balance	[l/s]
Entradas [l/s]	
Precipitación	1.843
Retorno por riego[1]	268
Caudal superficial registrado en estación	1.122
Caudal subterráneo estimado entrante	5,8
Salidas [l/s]	
Evapotranspiración[2]	1.800
Evaporación desde cuerpos de agua	6,0
Extracciones	902
Caudal superficial registrado en estación[3]	560
Caudal subterráneo estimado saliente[4]	21
Σ Entradas [l/s]	3.239
Σ Salidas [l/s]	3.289
Balance [l/s]	-50
Disponibilidad hídrica [l/s] (Q sup+Q sub sale)	581

[1] Valor considerado como 30% de la demanda de riego

[2] Valor calculado a partir de la fórmula de Turc

[3] Registro medio anual de la Est. río Camarones en Conanoxa

[4] Valor medio estimado del rango 0,03 y 42 l/s obtenido mediante la fórmula de Darcy

En esta Tabla se presentan los valores de las distintas componentes del balance hídrico anual, el que resulta negativo en 50 l/s, considerado un caudal subterráneo saliente de 21 l/s. Este error de cierre es menor y puede explicarse en que cada componente conlleva una incertidumbre, fundamentalmente en este caso aquella relacionada a la definición de isoyetas de precipitación media anual y de la evapotranspiración estimada a partir de Turc.

Con el objetivo de disponer información acerca del comportamiento de la cuenca a nivel mensual, en la Tabla 8.21 se realiza un balance hídrico mensual, considerando una distribución de precipitaciones a partir de la estación meteorológica Esquiña.

Tabla 8.21. Componentes del balance hídrico en la subcuenca del río Camarones entre Chilpe y Conanoxa. Fuente: Elaboración propia.

Componentes del balance	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Entradas [l/s]												
Precipitación[1]	4.180	7.639	3.122	250	0	2	249	372	93	1	6	690
Retorno por riego	363	308	303	222	168	144	162	185	262	338	356	411
Caudal superficial registrado en la estación	1.940	1.920	1.580	920	840	740	840	760	740	1.020	1.100	1.060
Caudal subterráneo estimado entrante	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8
Salidas [l/s]												
Evapotranspiración[2]	4.082	7.461	3.050	244	0	2	243	363	91	1	6	674
Evaporación desde cuerpos de agua	7,2	6,6	6,3	5,4	4,6	4,1	4,4	5,4	6,6	7,5	7,9	7,7
Extracciones[3]	1.217	1.034	1.017	748	566	488	546	624	882	1.135	1.195	1.377
Caudal superficial saliente	908	1.119	1.304	471	490	519	469	356	271	246	238	329
Caudal subterráneo estimado saliente	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21
Σ Entradas [l/s]	6.488	9.872	5.011	1.398	1.013	892	1.256	1.322	1.101	1.365	1.468	2.167
Σ Salidas [l/s]	6.235	9.640	5.397	1.489	1.081	1.034	1.283	1.369	1.271	1.410	1.467	2.409
Balance [l/s]	253	232	-386	-91	-67	-142	-27	-47	-170	-45	1	-242
Disponibilidad hídrica [l/s]	929	1.140	1.325	492	510	540	490	377	292	267	258	350

[1] Según distribución del registro medio mensual del periodo 1985-2014 de la Estación Esquiña

[2] Valor anual estimado por el método de Turc y distribuido mensualmente acorde a la Estación Esquiña

[3] Valor mensual estimado en el Estudio de la Demanda, Capítulo 6

[4] Valor medio estimado del rango 0,03 y 42 l/s obtenido mediante la fórmula de Darcy, y distribuido constante al no contar con mayores antecedentes

Se observa que a nivel mensual, durante los meses de marzo a diciembre, las salidas superan a las entradas. Por el contrario, en los meses de enero y febrero ocurriría una mayor infiltración, lo cual es acorde al periodo de mayor precipitación en las cuencas de la región. La disponibilidad hídrica estaría dada por el caudal superficial registrado en la estación fluviométrica y el caudal subterráneo estimado.

Finalmente, con el objetivo de comparar los valores obtenidos en este estudio con los presentados en otros informes para la misma cuenca, en la Tabla 8.22 se sintetiza dicha información con su respectiva referencia. Con relación al balance de la DGA (1987), existen diferencias en las componentes consideradas, ya que las salidas se atribuyen sólo a la evapotranspiración y no se considera el efecto de regulación del embalse, así como la evaporación desde la lámina de agua.

Tabla 8.22. Síntesis de los balances hídricos referentes en la cuenca del río Camarones. Fuente: Elaboración propia.

COMPONENTES DEL BALANCE HÍDRICO	DGA (1987)		Geohidrología Consultores Ltda. (2014)	Con Potencial Consultores Spa (2016)
	R. Camarones en Conanoxa	R. Camarones cuenca Total	Subcuenca del Embalse Cariyata	Balance en el embalse Caritaya (Pexc 50%)
Superficie [km^2]	2.107	4.767	362	1,37
Precipitación	9.410	14.100	2.711	8
Afluente superficial				600
Escorrentía	520	590	152	450
Evapotranspiración real	8.810	13.390	2.304	
Evaporación desde embalse				84
Infiltración desde embalse				70
TOTAL ENTRADAS (+)	9.410	14.100	2.711	608
TOTAL SALIDAS (-)	9.330	13.980	2.456	604
BALANCE [l/s]	+80	+120	+255	+4

8.1.6 Cuenca de los Ríos Uchusuma y Caquena

El balance hídrico en la cuenca del río Caquena se analizó en 2 subcuencas, definidas a partir de la estación fluviométrica Caquena en Vertedero. Se aplicó el principio de conservación de masa, suponiendo un sistema en equilibrio donde las entradas son iguales a las salidas. Los valores de las componentes principales fueron previamente descritos en los subcapítulos de Hidrometeorología y Fluviometría, escogiendo los

registros de la estación representativa. A continuación se presentan esquemas con las principales componentes de entrada y salida, y posteriormente las tablas con los valores en las subcuencas.

8.1.6.1 Subcuenca del río Caquena en Vertedero

Dicha subcuenca tiene un área de drenaje de 452 km^2. La principal entrada es la precipitación y el retorno por la alta presencia de bofedales; y las principales salidas son la evapotranspiración, el flujo superficial y el flujo subterráneo. Las extracciones superficiales se atribuyen a actividades de subsistencia de grupos locales, por lo tanto se asume que el agua retorna a la cuenca. Las componentes del balance hídrico se describen en la Figura 8.12 y en la Tabla 8.23 se presentan los valores a nivel anual.

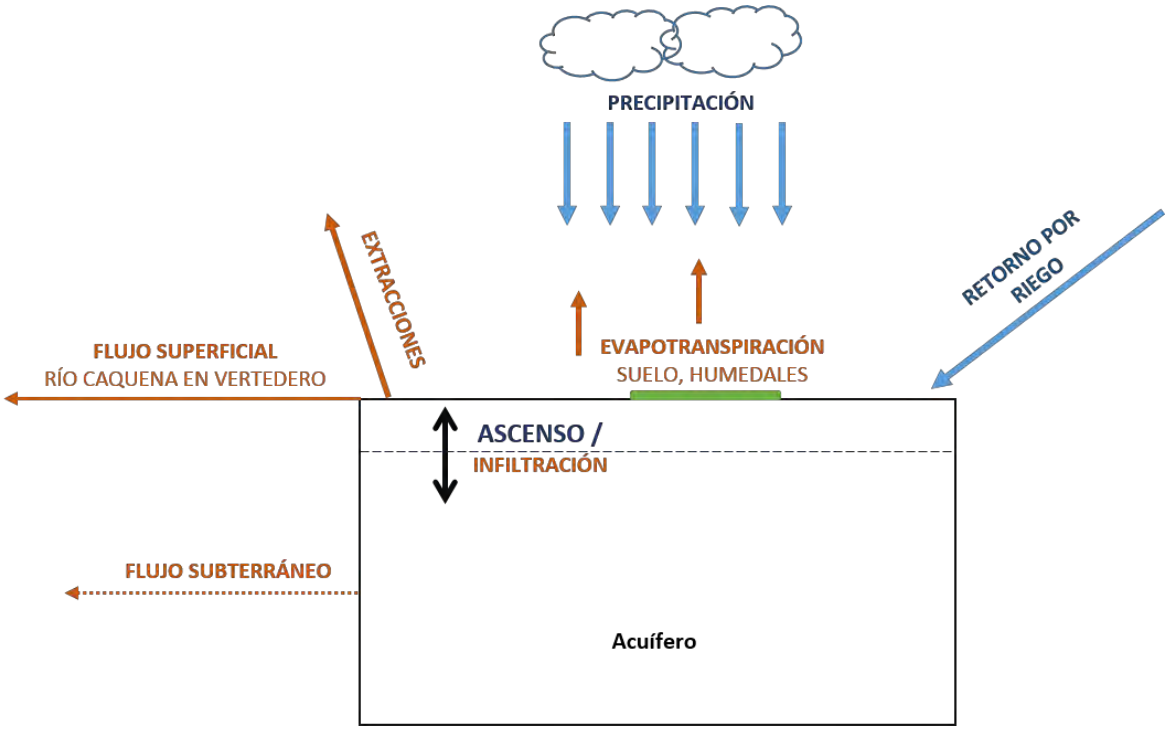


Figura 8.12. Esquema conceptual del balance hídrico en la subcuenca río Caquena en Vertedero. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8.23 Balance hídrico anual en la subcuenca río Caquena en Vertedero. Fuente: Elaboración propia.

Sector: río Caquena hasta Vertedero	Área [km^2]: 452
Componente del balance	[l/s]
Entradas [l/s]	
Precipitación	4.996
Retorno por riego[1]	203
Salidas [l/s]	
Evapotranspiración[2]	3.592
Evaporación de la lámina de agua	72
Extracciones	339
Caudal superficial registrado en estación[3]	1.220
Caudal subterráneo estimado saliente[4]	112
Σ Entradas [l/s]	5.199
Σ Salidas [l/s]	5.335
Balance [l/s]	-136
Disponibilidad hídrica [l/s] (Q sup+Q sub sale)	1.332

[1] Valor considerado como 60% de la demanda de riego

[2] Valor calculado a partir de la fórmula de Turc

[3] Registro medio anual de la Est. río Caquena en Vertedero

[4] Valor medio estimado del rango 3,5 y 222 l/s obtenido mediante la fórmula de Darcy

En esta Tabla se presentan los valores de las distintas componentes del balance hídrico, el que resulta negativo en 136 l/s. Este error de cierre no es importante y puede explicarse en que cada componente conlleva una incertidumbre, fundamentalmente aquella relacionada a la definición de isoyetas de precipitación media anual y de la evapotranspiración estimada a partir de Turc, estimación de consumos y del caudal subterráneo saliente.

Con el objetivo de disponer información acerca del comportamiento de la cuenca a nivel mensual, en la Tabla 8.24 se realiza un balance hídrico mensual, considerando una distribución de precipitaciones a partir de la estación meteorológica Esquiña.

Tabla 8.24. Componentes del balance hídrico en la subcuenca río Caquena en Vertedero. Fuente: Elaboración propia.

Componentes del balance	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Entradas [l/s]												
Precipitación[1]	25.335	22.272	17.135	2.500	209	259	538	340	105	394	1.861	10.934
Retorno por riego	77	5	108	227	197	212	243	280	269	315	302	190
Salidas [l/s]												
Evapotranspiración[2]	18.217	16.015	12.321	1.798	150	187	387	244	75	283	1.338	7.862
Evaporación desde cuerpos de agua	71	75	68	67	71	53	57	68	83	86	96	92
Extracciones[3]	129	8	181	378	329	354	405	468	449	525	504	316
Caudal superficial saliente	2.002	2.227	1.927	1.131	963	1.095	1.174	1.086	851	584	578	1.021
Caudal subterráneo estimado saliente[4]	112	112	112	112	112	112	112	112	112	112	112	112
Σ Entradas [l/s]	25.412	22.277	17.243	2.727	406	472	781	620	374	708	2.163	11.123
Σ Salidas [l/s]	20.530	18.437	14.609	3.485	1.625	1.801	2.135	1.977	1.570	1.589	2.628	9.403
Balance [l/s]	4.882	3.840	2.635	-758	-1.219	-1.329	-1.354	-1.357	-1.196	-881	-465	1.720
Disponibilidad hídrica [l/s]	2.113	2.339	2.039	1.243	1.075	1.207	1.286	1.197	963	695	690	1.133

[1] Según distribución del registro medio mensual del periodo 1985-2014 de la Estación Parinacota Ex Endesa

[2] Valor anual estimado por el método de Turc y distribuido mensualmente acorde a la Estación Parinacota Ex Endesa

[3] Valor mensual estimado en el Estudio de la Demanda, Capítulo 6

[4] Valor medio estimado del rango 3,5 y 222 l/s obtenido mediante la fórmula de Darcy, y distribuido constante al no contar con mayores antecedentes

Se observa que a nivel mensual, durante los meses de abril a noviembre, las salidas superan a las entradas. Por el contrario, en los meses de diciembre a marzo ocurriría una mayor infiltración, lo cual es acorde al periodo de mayor precipitación en las cuencas de la región. La disponibilidad hídrica estaría dada por el caudal superficial registrado en la estación fluviométrica y el caudal subterráneo estimado saliente.

8.1.6.2 Subcuenca del río Caquena bajo Vertedero

Esta subcuenca corresponde al área aportante al río Caquena desde territorio chileno en su vertiente izquierda. Tiene un área de drenaje de 868 km^2. La principal entrada es la precipitación, el retorno por la presencia de bofedales y el caudal superficial desde la estación Caquena en Vertedero; y las principales salidas son la evapotranspiración, el flujo superficial y el flujo subterráneo. Las componentes del balance hídrico se presentan en la Tabla 8.23.

Tabla 8.25 Balance hídrico anual en la subcuenca río Caquena bajo Vertedero. Fuente: Elaboración propia.

Sector: río Caquena bajo Vertedero	Área [km^2]: 868
Componente del balance	[l/s]
Entradas [l/s]	
Precipitación	9.354
Retorno por riego[1]	102
Caudal superficial registrado en estación	1.220
Caudal subterráneo estimado entrante	112
Salidas [l/s]	
Evapotranspiración[2]	7.243
Evaporación de la lámina de agua	14
Extracciones	170
Caudal superficial estimado saliente[3]	1.220
Caudal subterráneo estimado saliente[4]	1.406
Σ Entradas [l/s]	10.787
Σ Salidas [l/s]	10.053
Balance [l/s]	734
Disponibilidad hídrica [l/s] (Q sup+Q sub sale)	2.626

[1] Valor considerado como 60% de la demanda de riego

[2] Valor calculado a partir de la fórmula de Turc

[3] Valor estimado como el mismo caudal registrado en la Est. río Caquena en Vertedero

[4] Valor medio estimado del rango 35 y 2778 l/s obtenido mediante la fórmula de Darcy

En esta Tabla se presentan los valores de las distintas componentes del balance hídrico anual, el que resulta positivo con 734 l/s. Sin embargo, existe gran incertidumbre asociadas a los caudales superficial y subterráneo salientes, además de las otras componentes estimadas.

Con el objetivo de disponer información acerca del comportamiento de la cuenca a nivel mensual, en la Tabla 8.24 se realiza un balance hídrico mensual, considerando una distribución de precipitaciones a partir de la estación meteorológica Parinacota Ex Endesa. A falta de mayores antecedentes se ha considerado un caudal subterráneo estimado saliente constante durante todo el año.

Se observa que a nivel mensual, durante los meses de abril a noviembre, las salidas superan a las entradas. Por el contrario, en los meses de diciembre a marzo ocurriría una mayor infiltración, lo cual es acorde al periodo de mayor precipitación en las cuencas de la región. La disponibilidad hídrica estaría dada por los caudales estimados salientes, superficial y subterráneo.

Tabla 8.26. Componentes del balance hídrico en la subcuenca río Caquena bajo Vertedero. Fuente: Elaboración propia.

Componentes del balance	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Entradas [l/s]												
Precipitación[1]	35.063	30.825	23.715	3.461	289	359	745	470	145	545	2.575	15.132
Retorno por riego	39	2	54	113	99	106	121	140	135	157	151	95
Caudal superficial registrado en estación	2.002	2.227	1.927	1.131	963	1.095	1.174	1.086	851	584	578	1.021
Caudal subterráneo estimado entrante	112	112	112	112	112	112	112	112	112	112	112	112
Salidas [l/s]												
Evapotranspiración[2]	27.153	23.871	18.365	2.680	223	278	577	364	113	422	1.994	11.719
Evaporación desde cuerpos de agua	14	15	13	13	14	10	11	13	16	17	19	18
Extracciones[3]	65	4	91	189	165	177	203	234	225	262	252	158
Caudal superficial estimado saliente[4]	2.002	2.227	1.927	1.131	963	1.095	1.174	1.086	851	584	578	1.021
Caudal subterráneo estimado saliente[5]	1.406	1.406	1.406	1.406	1.406	1.406	1.406	1.406	1.406	1.406	1.406	1.406
Σ Entradas [l/s]	37.215	33.166	25.808	4.817	1.462	1.672	2.153	1.808	1.243	1.397	3.416	16.360
Σ Salidas [l/s]	30.639	27.523	21.802	5.419	2.771	2.967	3.371	3103	2.610	2.691	4.249	14.322
Balance [l/s]	6.576	5.643	4.006	-602	-1.309	-1.295	-1.219	-1295	-1.368	-1.293	-833	2.038
Disponibilidad hídrica [l/s]	3.408	3.633	3.333	2.537	2.369	2.501	2.580	2.492	2.257	1.990	1.984	2.427

[1] Según distribución del registro medio mensual del periodo 1985-2014 de la Estación Parinacota Ex Endesa

[2] Valor anual estimado por el método de Turc y distribuido mensualmente acorde a la Estación Parinacota Ex Endesa

[3] Valor mensual estimado en el Estudio de la Demanda, Capítulo 6

[4] Valor estimado como el mismo caudal registrado en la Est. río Caquena en Vertedero

[5] Valor medio estimado del rango 35 y 2778 l/s obtenido mediante la fórmula de Darcy y distribuido constante al no contar con mayores antecedentes

Finalmente, con el objetivo de comparar los valores obtenidos en este estudio con los presentados en otros informes para la misma cuenca, en la Tabla 8.27 se sintetiza dicha información con su respectiva referencia. Con relación al balance de la DGA (1987) existen diferencias en el área y componentes consideradas, por consiguiente los valores del balance son distintos.

Tabla 8.27. Síntesis de los balances hídricos referentes en la cuenca del río Caquena. Fuente: Balance DGA (1987)

COMPONENTES DEL BALANCE HÍDRICO	DGA (1987) Cuencas entre Perú-Bolivia y R. Lauca
Superficie [km^2]	1.268
Precipitación	13.500
Escorrentía	3.670
Evapotranspiración real	9.870
TOTAL ENTRADAS (+)	13.500
TOTAL SALIDAS (-)	13.540
BALANCE [l/s]	-40

8.1.7 Cuenca del Lago Chungara

El balance hídrico en la cuenca del Lago Chungara se analizó aplicando el principio de conservación de masa, suponiendo un sistema en equilibrio donde las entradas son iguales a las salidas. Los valores de las componentes principales fueron previamente descritos en los subcapítulos de Hidrometeorología y Fluviometría, escogiendo los registros de la estación representativa.

La cuenca total, incluyendo el lago, tiene un área de 276 km^2. El área del lago corresponde a aproximadamente 23 km^2. La principal entrada es la precipitación; y las principales salidas son la evapotranspiración, la evaporación desde los cuerpos de agua y el flujo subterráneo saliente hacia las Lagunas de Cotacotani, esta última analizada en el estudio de Herrera et al (2006). Las componentes del balance hídrico se describen en la Figura 8.13 y en la

Tabla 8.28 se presentan los valores a nivel anual.

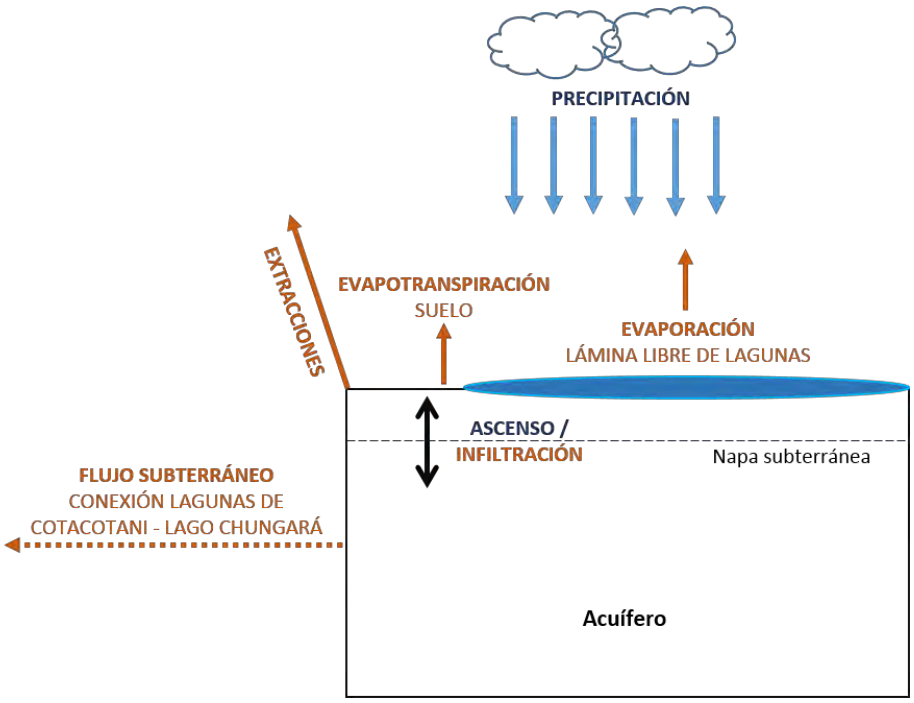


Figura 8.13 Esquema conceptual del balance hídrico en la cuenca del Lago Chungara. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8.28 Balance hídrico anual en la Cuenca del Lago Chungara. Fuente: Elaboración propia.

Sector: Cuenca del Lago Chungara	Área [km^2]: 276
Componente del balance	[l/s]
Entradas [l/s]	
Precipitación	3.106
Salidas [l/s]	
Evapotranspiración[1]	1.937
Evaporación desde cuerpos de agua[2]	878
Extracciones	2
Caudal subterráneo hacia Lagunas de Cotacotani[3]	250
Σ Entradas [l/s]	3.106
Σ Salidas [l/s]	3.067
Balance [l/s]	39
Disponibilidad hídrica [l/s] (Q sup sale)	0

[1] Valor calculado a partir de la fórmula de Turc

[2] Valor estimado por Risacher et al (1999)

[3] Valor estimado por Herrera et al (2006)

En esta Tabla se presentan los valores de las distintas componentes del balance hídrico anual, el que resulta positivo en 39 l/s. Este error de cierre se considera menor y puede explicarse en que cada componente conlleva una incertidumbre, fundamentalmente en este caso aquella relacionada a la definición de isoyetas de precipitación media anual y de la evapotranspiración estimada a partir de Turc.

Con el objetivo de disponer información acerca del comportamiento de la cuenca a nivel mensual, en la Tabla 8.29 se realiza un balance hídrico mensual, considerando una distribución de precipitaciones a partir de la estación meteorológica Chungara Ajata.

Tabla 8.29. Componentes del balance hídrico en la Cuenca del Lago Chungara. Fuente: Elaboración propia.

Componentes del balance	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Entradas [l/s]												
Precipitación[1]	12.383	9.334	6.254	1.399	218	418	372	438	202	438	1.311	4.817
Salidas [l/s]												
Evapotranspiración[2]	7.723	5.821	3.901	873	136	261	232	273	126	273	817	3.005
Evaporación desde cuerpos de agua[3]	878	878	878	878	878	878	878	878	878	878	878	878
Extracciones[4]	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Caudal subterráneo hacia Lagunas de Cotacotani[5]	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250
Σ Entradas [l/s]	12.383	9.334	6.254	1.399	218	418	372	438	202	438	1.311	4.817
Σ Salidas [l/s]	8.853	6.951	5.031	2.002	1.266	1.391	1.362	1.403	1.256	1.403	1.947	4.134
Balance [l/s]	3.530	2.382	1.224	-603	-1.048	-972	-990	-965	-1.054	-965	-637	683

[1] Según distribución del registro medio mensual del periodo 1985-2014 de la Estación Chungara Ajata

[2] Valor anual estimado por el método de Turc y distribuido mensualmente acorde a la Estación Chungara Ajata

[3] Valor estimado por Risacher et al (1999) y distribuido constante al no contar con mayores antecedentes

[4] Valor mensual estimado en el Estudio de la Demanda, Capítulo 6

[5] Valor estimado por Herrera et al (2006) y distribuido constante al no contar con mayores antecedentes

Se observa que a nivel mensual, durante los meses de abril a noviembre, las salidas superan a las entradas. Por el contrario, en los meses de diciembre a marzo ocurriría una mayor infiltración, lo cual es acorde al periodo de mayor precipitación en las cuencas de la región. No existiría disponibilidad hídrica en la cuenca por ser un sistema cerrado.

Finalmente, con el objetivo de comparar los valores obtenidos en este estudio con los presentados en otros informes para la misma cuenca, en la Tabla 8.30 se sintetiza dicha información con su respectiva referencia. Con relación al balance de la DGA (1987), existen diferencias en las componentes consideradas, ya que todas las salidas se atribuyen a la evapotranspiración y evaporación desde la lámina de agua y no se considera la eventual conexión hidrológica con las Lagunas de Cotacotani. Sin embargo, el resultado del balance en Risacher et al (1999) es similar al obtenido en este estudio.

Tabla 8.30. Síntesis de los balances hídricos referentes en la cuenca del Lago Chungara. Fuente: Elaboración propia en base a antecedentes.

COMPONENTES DEL BALANCE HÍDRICO	DGA (1987)	Risacher et al (1999) Lago Chungara
ENTRADAS [l/s]		
Precipitación	2.780	241
Flujo superficial del río Chungara		669
Flujo superficial del estero Sopocolante		
Flujo superficial de vertiente Mal Paso y Ajata		
SALIDAS [l/s]		
Evapotranspiración	1.750	
Evaporación desde superficie de agua	700	878
TOTAL ENTRADAS (+)	2.780	910
TOTAL SALIDAS (-)	2.450	878
BALANCE [l/s]	+330	+32

8.1.8 Cuenca del Río Lauca

El balance hídrico en la cuenca del río Lauca se realizó en la estación Río Lauca en Japu. Los valores de las componentes principales fueron previamente descritos en los

subcapítulos de Hidrometeorología y Fluviometría, escogiendo los registros de la estación representativa.

La cuenca total tiene un área de 2.413 km^2. Las principales entradas son la precipitación, el flujo subterráneo de la conexión hidrológica Lagunas de Cotacotani-Lago Chungara, esta última analizada en distintos estudios (Herrera et al, 2006; Matraz, 2015) y el flujo subterráneo desde el Volcán Guallatire, analizado por Matraz (2015); y las principales salidas son la evapotranspiración, las extracciones superficiales, la evaporación desde la lámina de agua, el transvase del canal Lauca, el flujo superficial y el flujo subterráneo. Las componentes del balance hídrico se describen en la Figura 8.14 y en la Tabla 8.31 se presentan los valores a nivel anual.

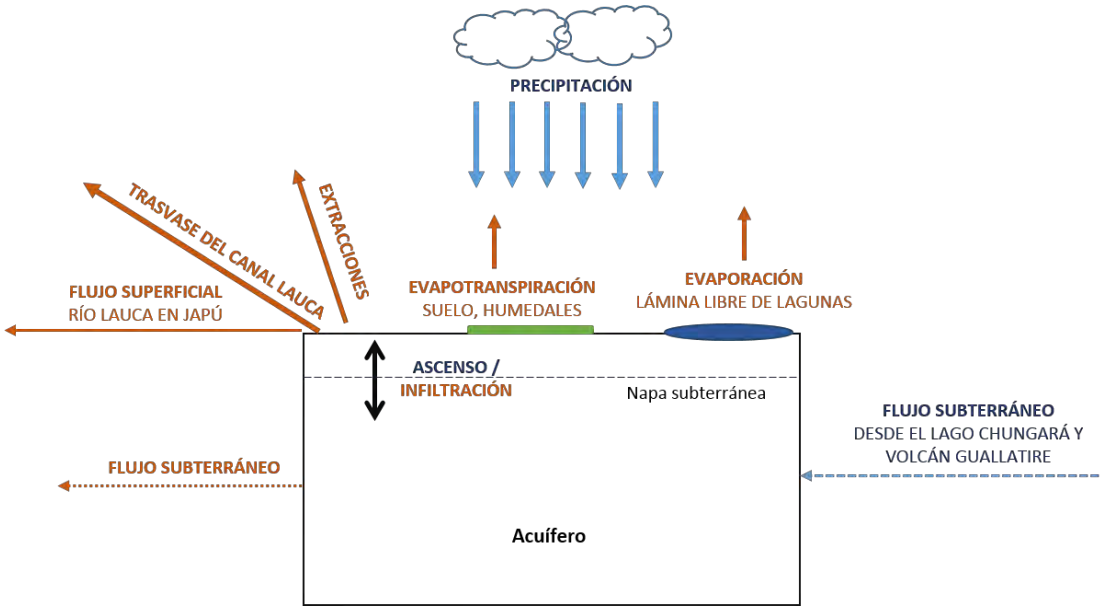


Figura 8.14 Esquema conceptual del balance hídrico en la cuenca del río Lauca en Japu. Fuente: Elaboración propia. Fuente: Elaboración propia.

En esta Tabla se presentan los valores de las distintas componentes del balance hídrico anual, el que resulta positivo con 494 l/s, considerando un caudal subterráneo saliente de 232 l/s. Sin embargo, aplicando el método de Darcy, el caudal subterráneo podría ser de 0,6 a 2463 l/s. Por lo tanto, si se considera que el caudal subterráneo saliente fuese cercano a 700 l/s, el sistema estaría en equilibrio como lo menciona Matraz (2015) al considerar un valor de 1.000 l/s. Además cabe mencionar que existe incertidumbre asociada al cálculo de las distintas componentes.

Tabla 8.31 Balance hídrico anual en la Cuenca del río Lauca en Japu. Fuente: Elaboración propia.

Sector: Cuenca del río Lauca en Japu	Área [km^2]: 2.413
Componente del balance	[l/s]
Entradas [l/s]	
Precipitación[1]	22.454
Retorno por riego	203
Caudal subterráneo desde el Lago Chungara[2]	250
Caudal subterráneo desde el Volcán Guallatire[3]	396
Salidas [l/s]	
Evapotranspiración[4]	18.511
Evaporación desde cuerpos de agua[5]	420
Extracciones	343
Extracciones del canal Lauca[6]	767
Caudal superficial registrado en estación[7]	2.537
Caudal subterráneo estimado saliente[8]	232
Σ Entradas [l/s]	23.303
Σ Salidas [l/s]	22.810
Balance [l/s]	494
Disponibilidad hídrica [l/s] (Q sup sale)	2.769

[1] Valor estimado por Matraz (2015)

[2] Valor estimado por Herrera (2006) y Matraz (2015)

[3] Valor estimado por Matraz (2015)

[4] Valor anual estimado por el método de Turc

[5] Valor estimado de acuerdo al Balance Hídrico DGA (1987)

[6] Registro medio anual de la Est. Canal Lauca en sifón N. 1

[7] Registro medio anual de la Est. Río Lauca en Japu

[8] Valor medio estimado del rango 0,6 y 2463 l/s obtenido mediante la fórmula de Darcy

Con el objetivo de disponer información acerca del comportamiento de la cuenca a nivel mensual, en la Tabla 8.32 se realiza un balance hídrico mensual, considerando una distribución de precipitaciones a partir de la estación meteorológica Chucuyo Retén.

Tabla 8.32. Componentes del balance hídrico en la Cuenca del río Lauca en Japu. Fuente: Elaboración propia.

Componentes del balance	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Entradas [l/s]												
Precipitación[1]	91.644	69.173	41.414	8.521	1.181	666	5.087	2.157	1.103	1.295	5.215	29.996
Retorno por riego[2]	77	5	108	227	197	212	243	280	269	315	302	190
Caudal subterráneo desde el Lago Chungara	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250
Caudal subterráneo desde el Volcán Guallatire	351	252	239	347	379	335	301	321	450	557	636	579
Salidas [l/s]												
Evapotranspiración[3]	74.966	56.585	33.878	6.971	966	545	4.161	1.764	903	1.059	4.266	24.537
Evaporación desde cuerpos de agua	420	420	420	420	420	420	420	420	420	420	420	420
Extracciones[4]	133	12	185	382	333	358	409	471	453	528	508	320
Extracciones del canal Lauca[5]	900	867	847	757	723	717	705	677	707	728	773	803
Caudal superficial registrado en estación[6]	3.499	5.546	4.681	2.605	1.900	1.882	1.977	1.871	1.676	1.548	1.551	1.687
Caudal subterráneo estimado saliente[7]	232	232	232	232	232	232	232	232	232	232	232	232
Σ Entradas [l/s]	92.322	69.679	42.011	9.345	2.007	1.464	5.880	3.008	2.073	2.416	6.404	31.014
Σ Salidas [l/s]	80.150	63.661	40.242	11.367	4.574	4.154	7.903	5.435	4.391	4.515	7.750	27.999
Balance [l/s]	12.172	6.018	1.769	-2.022	-2.567	-2.690	-2.023	-2.427	-2.318	-2.099	-1.346	3.016

[1] Según distribución del registro medio mensual del periodo 1985-2014 de la Estación Chucuyo Retén

[2] Valor considerado como 60% de la demanda de riego

[3] Valor anual estimado por el método de Turc y distribuido mensualmente acorde a la Estación Chucuyo Retén

[4] Valor mensual estimado en el Estudio de la Demanda, Capítulo 6

[5] Valor de caudal medio mensual para la Est. Río Lauca en Sifón N.1 entre los años 1985 - 2014

[6] Valor de caudal medio mensual para la Est. Río Lauca en Japu entre los años 1985 – 2011

[7] Valor medio estimado del rango 0,6 y 2463 l/s obtenido mediante la fórmula de Darcy y distribuido constante al no contar con mayores antecedentes

Se observa que a nivel mensual, durante los meses de abril a noviembre, las salidas superan a las entradas. Por el contrario, en los meses de diciembre a marzo ocurriría una mayor infiltración, lo cual es acorde al periodo de mayor precipitación en las cuencas de la región. La disponibilidad hídrica en la cuenca estaría dada por el caudal medio mensual registrado en la estación Río Lauca en Japu, además del flujo subterráneo.

Finalmente, con el objetivo de comparar los valores obtenidos en este estudio con los presentados en otros informes para la misma cuenca, en la Tabla 8.33 se sintetiza dicha información con su respectiva referencia. Con relación al balance de la DGA (1987), existen diferencias en las componentes consideradas, sobre todo las relacionadas con las entradas y salidas subterráneas, sin embargo coinciden al plantear que el sistema está en balance positivo. Por otro lado, en relación al balance de Matraz (2015), los valores son similares a los obtenidos en este estudio.

Tabla 8.33. Síntesis de los balances hídricos referentes en la cuenca del río Lauca. Fuente: Elaboración propia en base a antecedentes.

COMPONENTES DEL BALANCE HÍDRICO	DGA (1987) *		Matraz (2015)
	R. Lauca en Estancia El Lago	R. Lauca en Japu	
ENTRADAS [l/s]			
Precipitación	3.660	19.000	22.454
Flujo subterráneo entrante desde el lago Chungara			250
Flujo subterráneo entrante desde el volcán Guallatire			396
SALIDAS [l/s]			
Evapotranspiración	2.350	15.300	18.511
Evaporación desde superficie de agua	420	420	
Derivaciones de agua superficial. El canal Lauca como el principal		750	764
Extracciones desde el almacenamiento del acuífero			
Flujo subterráneo saliente			1.078
Flujo superficial saliente	140	2.460	2.653
TOTAL ENTRADAS (+)	3.660	19.000	23.100
TOTAL SALIDAS (-)	2.910	18.930	23.006
BALANCE [l/s]	+750	+70	+94

* El balance incluye caudal de transvase de 0,75 m^3/s

8.1.9 Cuenca del Salar de Surire

El balance hídrico en la cuenca del Salar de Surire se analizó aplicando el principio de conservación de masa, suponiendo un sistema en equilibrio donde las entradas son iguales a las salidas. Los valores de las componentes principales fueron previamente descritos en los subcapítulos de Hidrometeorología y Fluviometría, escogiendo los registros de la estación representativa.

La cuenca total incluyendo el salar tiene un área de 552 km^2, mientras que la superficie del salar se ha estimado en aproximadamente 62 km^2. La principal entrada es la precipitación; y las principales salidas son la evapotranspiración y la evaporación desde la lámina de agua. Las componentes del balance hídrico se describen en la Figura 8.15 y en la Tabla 8.34 se presentan los valores a nivel anual.

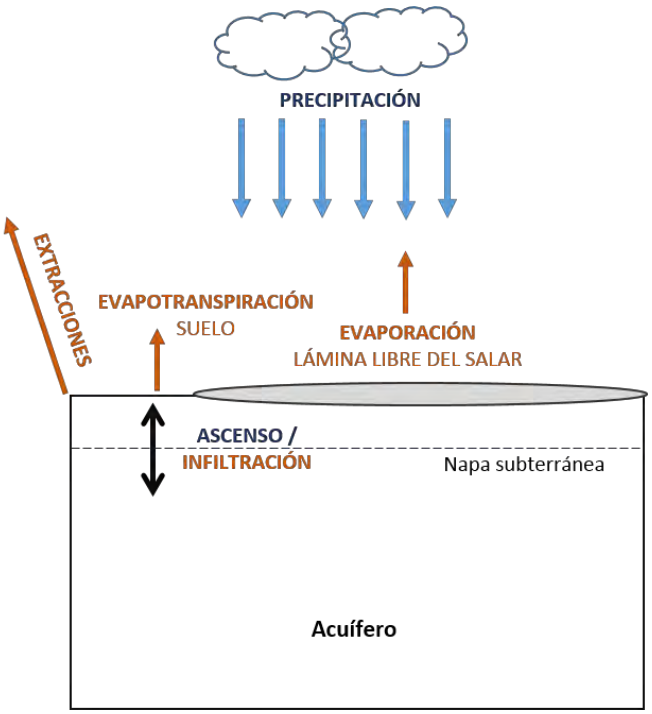


Figura 8.15. Esquema conceptual del balance hídrico en la cuenca del Salar de Surire. Fuente: Elaboración propia

Tabla 8.34 Balance hídrico anual en la Cuenca del Salar de Surire. Fuente: Elaboración propia

Sector: Cuenca del Salar de Surire	Área [km^2]: 552
Componente del balance	[l/s]
Entradas [l/s]	
Precipitación	5.724
Salidas [l/s]	
Evapotranspiración[1]	3.878
Evaporación desde cuerpos de agua[2]	1.840
Extracciones[3]	2
Σ Entradas [l/s]	5.724
Σ Salidas [l/s]	5.719
Balance [l/s]	5
Disponibilidad hídrica [l/s]	0

[1] Valor calculado a partir de la fórmula de Turc

[2] Valor estimado por DGA (1987)

[3] Valor mensual estimado en el Estudio de la Demanda, Capítulo 6

En esta Tabla se presentan los valores de las distintas componentes del balance hídrico anual, el que resulta positivo en 5 l/s. Esta diferencia, es despreciable y podría indicarse que la cuenca está en equilibrio. Sin embargo, cabe mencionar que cada componente conlleva una incertidumbre, fundamentalmente aquella relacionada a la definición de isoyetas de precipitación media anual y de la evapotranspiración estimada a partir de Turc.

Con el objetivo de disponer información acerca del comportamiento de la cuenca a nivel mensual, en la Tabla 8.35 se realiza un balance hídrico mensual, considerando una distribución de precipitaciones a partir de la estación meteorológica Chilcaya.

Tabla 8.35. Componentes del balance hídrico en la Cuenca del Salar de Surire. Fuente: Elaboración propia.

Componentes del balance	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Entradas [l/s]												
Precipitación[1]	23.404	20.151	12.810	2.978	290	112	556	226	68	157	981	7.747
Salidas [l/s]												
Evapotranspiración[2]	15.856	13.652	8.678	2.017	196	76	377	153	46	106	665	5.248
Evaporación desde cuerpos de agua	1.840	1.840	1.840	1.840	1.840	1.840	1.840	1.840	1.840	1.840	1.840	1.840
Extracciones	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Σ Entradas [l/s]	23.404	20.151	12.810	2.978	290	112	556	226	68	157	981	7.747
Σ Salidas [l/s]	17.697	15.493	10.520	3.859	2.038	1.917	2.218	1.995	1.888	1.948	2.507	7.090
Balance [l/s]	5.707	4.658	2.290	-881	-1.748	-1.806	-1.662	-1.769	-1.820	-1.791	-1.525	657

[1] Según distribución media mensual del periodo 1985-2014 de la Estación Chilcaya

[2] Valor anual estimado por el método de Turc y distribuido mensualmente acorde a la Estación Chilcaya

Se observa que a nivel mensual, durante los meses de abril a noviembre, las salidas superan a las entradas. Por el contrario, en los meses de diciembre a marzo ocurriría una mayor infiltración, lo cual es acorde al periodo de mayor precipitación en las cuencas de la región. No existiría disponibilidad hídrica en la cuenca por ser un sistema cerrado.

Finalmente, con el objetivo de comparar los valores obtenidos en este estudio con los presentados en otros informes para la misma cuenca, en la Tabla 8.36 se sintetiza dicha información con su respectiva referencia. Con relación al balance de la DGA (1987), coincide con el planteamiento de este estudio al mencionar que la cuenca estaría en equilibrio.

Tabla 8.36. Síntesis de los balances hídricos referentes en la cuenca del Salar de Surire. Fuente: Elaboración propia.

COMPONENTES DEL BALANCE HÍDRICO	Grilli y Vidal (1984)	DGA (1987)
Superficie [km^2]	363 (cuenca afluente) 174 (salar)	537
Precipitación en la cuenca		4.270
Precipitación sobre el salar	1.180	
Escorrentía afluente al salar	660	
Escorrentía efluente		0
Evapotranspiración real		2.430
Evaporación desde salar	1.840	1.840
TOTAL ENTRADAS (+)	1.840	4.270
TOTAL SALIDAS (-)	1.840	4.270
BALANCE [l/s]	0	0

8.1.10 Acuífero Cuenca del Río Lluta

Se ha considerado como unidad acuífera el sector bajo de la cuenca del río Lluta, bajo la estación Río Lluta en Tocontasi. Las principales salidas en el sistema son la recarga desde el río, el retorno por riego y el flujo subterráneo del sector alto. Las salidas del acuífero corresponden a las extracciones subterráneas, al flujo subterráneo hacia la cuenca de la quebrada La Concordia y el eventual flujo subterráneo hacia el mar.

Para estimar la recarga desde el río, se ha considerado la diferencia entre los caudales registrados en las estaciones Río Lluta en Tocontasi y Río Lluta en Panamericana, menos el caudal de las extracciones superficiales y la evaporación desde la lámina de agua. Dado que el registro de la estación Río Lluta en Tocontasi está incompleto, se ha optado por considerar el caso más desfavorable, que corresponde a utilizar los caudales del año 2004.

Tanto las extracciones superficiales como subterráneas han sido consideradas desde Socoroma, debido a la disponibilidad de información. Las extracciones superficiales en este tramo corresponden al consumo agrícola y pecuario, y las subterráneas al consumo de agua potable.

En la Tabla 8.37 se presenta la estimación anual de la recarga desde el río, el cual corresponde a 174 l/s. Mientras que en la Tabla 8.38 se presenta el balance anual del acuífero, el cual entrega un valor de 89 l/s, lo cual indica que el sistema se encuentra en equilibrio. Sin embargo se señala que cada componente conlleva una incertidumbre.

Tabla 8.37 Estimación recarga desde el río en el acuífero río Lluta bajo
Fuente: Elaboración propia.

Componente del balance	[l/s]
Entradas [l/s]	
Caudal superficial registrado en estación Río Lluta en Tocontasi	2.319
Salidas [l/s]	
Extracción superficial	856
Evaporación desde lámina de agua	23
Caudal superficial registrado en estación Río Lluta en Panamericana	1.266
Recarga desde el río [l/s]	174

Tabla 8.38 Balance Acuífero río Lluta bajo. Fuente: Elaboración propia.

Componente del balance	[l/s]
Entradas [l/s]	
Recarga desde el río	174
Retorno por riego[1]	170
Caudal subterráneo estimado entrante	3,5
Salidas [l/s]	
Extracciones subterráneas	185
Flujo subterráneo lateral estimado hacia La Concordia	50
Caudal subterráneo estimado saliente	23
Σ Entradas [l/s]	348
Σ Salidas [l/s]	258
Balance [l/s]	89

[1] Valor considerado como 20% de la demanda de riego

A nivel mensual, los resultados de la recarga desde el río se presentan en la Tabla 8.39, mientras que para el balance del acuífero se incluyen en la Tabla 8.40. De acuerdo a los resultados obtenidos, se observa que la recarga desde el río al acuífero ocurre mayormente durante el mes de febrero. Los meses que resultan cero, indican que se produce un aporte desde el acuífero hacia el sistema superficial. A su vez, en el balance del acuífero río Lluja Bajo se observa que en los meses de febrero y marzo las entradas son mayores a las salidas, coincidiendo con el periodo de mayores precipitaciones, sin embargo, en el 67% del año (8 meses) las salidas superan a las entradas.

Tabla 8.39 Estimación Mensual recarga desde el río en el acuífero río Lluta bajo. Fuente: Elaboración propia.

Componente del balance	*ENE*	*FEB*	*MAR*	*ABR*	*MAY*	*JUN*	*JUL*	*AGO*	*SEP*	*OCT*	*NOV*	*DIC*
Entradas [l/s]												
Caudal superficial registrado en estación Río Lluta en Tocontasi	2.880	10.060	3.803	1.200	1.150	1.320	1.840	1.620	980	890	940	940
Salidas [l/s]												
Extracción superficial	1.365	881	310	386	386	429	460	519	897	1.284	1.507	1.785
Evaporación desde lámina de agua	6,3	6,1	5,5	4,5	3,9	3,4	3,3	3,6	4,1	4,8	5,3	5,6
Caudal superficial registrado en estación Río Lluta en Panamericana	2.788	4.232	3.184	1.154	716	808	842	556	234	168	138	376
Recarga desde el río [l/s]	0	4.940	304	0	44	79	534	542	15	0	0	0

Tabla 8.40 Balance Mensual acuífero río Lluta bajo. Fuente: Elaboración propia.

Componente del balance	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Entradas [l/s]												
Recarga desde el río	0	4.940	304	0	44	79	534	542	15	0	0	0
Retorno por riego	273	176	62	77	77	86	92	104	179	257	301	357
Caudal subterráneo estimado entrante	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
Salidas [l/s]												
Extracciones subterráneas	277	191	89	102	102	110	116	126	194	263	302	352
Flujo subterráneo lateral estimado	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Caudal subterráneo estimado saliente	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23
Σ Entradas [l/s]	276	5.120	369	81	125	169	630	649	198	260	305	361
Σ Salidas [l/s]	350	264	162	176	176	183	189	199	267	335	375	425
Balance [l/s]	-73	4.857	207	-95	-51	-15	441	450	-69	-75	-70	-64

8.1.11 Acuífero Cuenca del Río San José

Se ha considerado como unidad acuífera el sector bajo de la cuenca del río San José, bajo la estación Río San José en Ausipar. Las principales entradas del sistema son la recarga desde el río y el retorno por riego. Las salidas desde el acuífero corresponden únicamente a las extracciones subterráneas.

Para estimar la recarga desde el río, se ha considerado la diferencia entre los caudales registrados en las estaciones Río San José en Ausipar y el caudal de descarga al mar, la cual es distinta de cero únicamente durante las crecidas del invierno altiplánico (valor estimado de acuerdo a la bibliografía). A su vez, se restó el caudal correspondiente al Canal Azapa, considerando que este canal capta la mayor parte del agua del canal de trasvase Lauca.

En la Tabla 8.41 se presenta la estimación anual de la recarga desde el río, el cual corresponde a 208 l/s. Mientras que en la Tabla 8.42 se presenta el balance anual del acuífero, obteniéndose un valor negativo mayor a los 1.000 l/s, lo cual indica la sobreexplotación del acuífero. Sin embargo se señala que cada componente conlleva una incertidumbre.

Tabla 8.41 Estimación recarga desde el río en el acuífero río San José bajo. Fuente: Elaboración propia.

Componente del balance	[l/s]
Entradas [l/s]	
Caudal superficial registrado en estación Río San José en Ausipar	1.124
Salidas [l/s]	
Extracción superficial (canal Azapa)	767
Caudal de crecida estimado	149
Recarga desde el río [l/s]	208

Tabla 8.42 Balance Acuífero del río San José bajo. Fuente: Elaboración propia.

Componente del balance	[l/s]
Entradas [l/s]	
Recarga desde el río	208
Retorno por riego[1]	366
Caudal subterráneo estimado entrante	0
Salidas [l/s]	
Extracciones subterráneas	1.705
Caudal subterráneo estimado saliente	0
Σ Entradas [l/s]	575
Σ Salidas [l/s]	1.705
Balance [l/s]	-1130

[1] Valor considerado como 20% de la demanda de riego

A nivel mensual, los resultados de recarga desde el río se presentan en la Tabla 8.43, mientras que los del balance se incluyen en la Tabla 8.44. Se ha optado por dividir en dos meses (febrero y marzo) los caudales asociadas a las crecidas del invierno altiplánico, de acuerdo a los antecedentes registrados en la estación San José en Ausipar. Se observa que el valor del balance del acuífero es negativo durante todo el año, por lo que no existe recarga efectiva del acuífero, sino más bien es el acuífero que aporta al sistema superficial, habría un desbalance. Este hecho es posible notarlo con la disminución continua de los niveles del acuífero.

Tabla 8.43 Estimación Mensual de la recarga desde el río en el acuífero río San José bajo. Fuente: Elaboración propia.

Componente del balance	*ENE*	*FEB*	*MAR*	*ABR*	*MAY*	*JUN*	*JUL*	*AGO*	*SEP*	*OCT*	*NOV*	*DIC*
Entradas [l/s]												
Caudal superficial registrado en estación Río San José en Ausipar	1.095	2.255	2.082	995	982	1.150	950	877	786	770	768	782
Salidas [l/s]												
Extracción superficial (canal Azapa)	900	867	847	757	723	717	705	677	707	728	773	803
Caudal de Crecida estimado	0	922	922	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Recarga desde el río [l/s]	195	466	313	238	259	433	245	200	79	42	0	0

Tabla 8.44 Balance Mensual Acuífero río San José bajo. Fuente: Elaboración propia.

Componente del balance	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Entradas [l/s]												
Recarga desde el río	195	466	313	238	259	433	245	200	79	42	0	0
Retorno por riego	396	315	391	307	206	154	184	209	350	502	498	508
Caudal subterráneo estimado entrante	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Salidas [l/s]												
Extracciones subterráneas	1.877	1.501	1.903	1.572	1.104	847	1.010	1.166	1.840	2.578	2.511	2.533
Caudal subterráneo estimado saliente	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Σ Entradas [l/s]	592	780	704	545	465	587	429	410	430	545	498	508
Σ Salidas [l/s]	1.877	1.501	1.903	1.572	1.104	847	1.010	1.166	1.840	2.578	2.511	2.533
Balance [l/s]	-1.285	-721	-1.199	-1.027	-639	-260	-581	-756	-1.410	-2.034	-2.013	-2.025

8.1.12 Acuífero de la Quebrada Chaca-Vítor

Se ha considerado como unidad acuífera el sector bajo de la cuenca de la Quebrada Chaca Vítor, bajo la estación Río Codpa en Cala Cala. Las principales entradas al sistemas son la recarga desde el río, el retorno por riego y el flujo subterráneo del sector alto. Las salidas desde el acuífero corresponden a las extracciones subterráneas y al flujo subterráneo hacia el mar.

Para estimar la recarga desde el río, se ha considerado la diferencia entre los caudales registrados en las estaciones Río Codpa en Cala Cala y la descarga al mar, menos el caudal correspondiente a las extracciones superficiales, estimadas en un 70% del consumo total, en base a los antecedentes recopilados.

En la Tabla 8.45 se presenta la estimación anual de la recarga desde el río, el cual corresponde a 20 l/s. Mientras que en la Tabla 8.46 se presenta el balance anual del acuífero, obteniéndose que está en equilibrio. Sin embargo se señala que cada componente conlleva una incertidumbre.

Tabla 8.45 Estimación recarga desde el río en el acuífero quebrada Chaca Vítor. Fuente: Elaboración propia.

Componente del balance	[l/s]
Entradas [l/s]	
Caudal superficial registrado en estación Río Codpa en Cala Cala	125
Salidas [l/s]	
Extracciones superficiales	105
Caudal superficial estimado saliente	0
Recarga desde el río [l/s]	20

Tabla 8.46 Balance Acuífero de la quebrada Chaca-Vítor. Fuente: Elaboración propia.

Componente del balance	[l/s]
Entradas [l/s]	
Recarga desde el río	20
Retorno por riego[1]	29
Caudal subterráneo estimado entrante	2,7
Salidas [l/s]	
Extracciones subterráneas	48
Caudal subterráneo estimado saliente	3,7
Σ Entradas [l/s]	52
Σ Salidas [l/s]	52
Balance [l/s]	0

[1] Valor considerado como 20% de la demanda de riego

A nivel mensual, los resultados de recarga desde el río se presentan en la Tabla 8.47, mientras que para el balance se incluyen en la Tabla 8.48. De acuerdo a los resultados obtenidos, se observa que la recarga desde el río ocurre mayormente en los meses de enero y febrero. Con relación al balance del acuífero, éste estaría en desbalance el 67% del año (8 meses), sin embargo en los meses de enero, febrero, mayo y junio las entradas superan a las salidas.

Tabla 8.47 Estimación Mensual recarga desde el río en el acuífero de la quebrada Chava Vítor. Fuente: Elaboración propia.

Componente del balance	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Entradas [l/s]												
Caudal superficial registrado en estación Río Codpa en Cala Cala	385	322	100	67	73	87	43	32	18	17	43	125
Salidas [l/s]												
Extracciones superficiales	167	155	139	84	43	34	40	47	87	142	153	178
Caudal superficial estimado saliente	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Recarga desde el río [l/s]	218	167	0	0	30	53	3	0	0	0	0	0

Tabla 8.48 Balance Mensual acuífero de la quebrada Chaca-Vítor. Fuente: Elaboración propia.

Componente del balance	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Entradas [l/s]												
Recarga desde el río	218	167	0	0	30	53	3	0	0	0	0	0
Retorno por riego	47	44	39	23	11	9	10	12	24	40	43	51
Caudal subterráneo estimado entrante	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7
Salidas [l/s]												
Extracciones subterráneas	75	69	63	38	21	17	20	22	40	64	68	80
Caudal subterráneo estimado saliente	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7
Σ Entradas [l/s]	268	213	42	26	44	64	16	15	27	43	46	53
Σ Salidas [l/s]	78	73	66	42	24	20	23	26	43	67	72	83
Balance [l/s]	190	140	-24	-16	20	44	-7	-11	-17	-25	-26	-30

8.2 Balance Legal

El balance legal corresponde al cálculo de la oferta menos los derechos de aprovechamientos otorgados bajo los distintos procedimientos, tanto como para las solicitudes de constitución (ND) como las de regularización (NR) de derecho de aprovechamiento de aguas. Por lo tanto, la estimación de la oferta se ha obtenido de la hidrología de cada una de las cuencas así como de la hidrogeología de cada uno de los acuíferos. Y los ND y NR se han obtenido del análisis de la sistematización de los derechos de aprovechamiento de aguas.

8.2.1 Cuenca de la Quebrada de La Concordia

En la Tabla 8.49 se incluyen los valores mensuales calculados de la cuenca.

Tabla 8.49 Balance legal de la cuenca de la Quebrada de La Concordia. Fuente: Elaboración propia.

Componente del balance	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Entradas [l/s]												
Precipitación	2.396	2.717	1.115	158	59	26	61	68	62	17	65	795
Flujo subterráneo lateral	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Salidas [l/s]												
Evapotranspiración	2.383	2.702	1.109	157	59	26	61	67	62	17	65	791
Demanda legal	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Caudal superficial estimado saliente	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Caudal subterráneo estimado saliente	47	47	47	47	47	47	47	47	47	47	47	47
Σ Entradas [l/s]	2.496	2.817	1.215	258	159	126	161	168	162	117	165	895
Σ Salidas [l/s]	2.530	2.849	1.256	303	205	172	207	214	2085	163	212	938
Balance [l/s]	-34	-32	-41	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-47	-46	-42

8.2.2 Cuenca del Río Lluta

En la Tabla 8.50 se incluyen los valores mensuales calculados de la cuenca.

Tabla 8.50 Balance legal de la cuenca del Río Lluta. Fuente: Elaboración propia.

Componente del balance	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Entradas [l/s]												
Precipitación	85.130	88.976	43.643	7.323	1.742	1.863	3.768	2.614	1.236	1.312	3.802	29.732
Retorno por riego	1.009	665	573	636	553	552	612	703	923	1.190	1.289	1.345
Salidas [l/s]												
Evapotranspiración	71.161	74.718	36.298	6.043	1.472	1.514	3.077	2.175	1.078	1.064	3.111	24.786
Evaporación desde cuerpos de agua	71	69	69	70	62	59	58	64	71	79	80	75
Demanda Legal	9.240	9.240	9.240	9.240	9.240	9.240	9.240	9.240	9.240	9.240	9.240	9.240
Caudal superficial registrado en estación	2.788	4.232	3.184	1.154	716	808	842	556	234	168	138	376
Flujo subterráneo lateral estimado	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Caudal subterráneo estimado saliente	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23
Σ Entradas [l/s]	86.139	89.640	44.216	7.959	2.294	2.415	4.380	3.317	2.159	2.502	5.091	31.078
Σ Salidas [l/s]	83.332	88.332	48.863	16.579	11.562	11.693	13.289	12.107	10.695	10.623	12.641	34.549
Balance [l/s]	2.807	1.307	-4.648	-8.621	-9.269	-9.279	-8.910	-8.792	-8.536	-8.122	-7.550	-3.472

8.2.3 Cuenca del Río San José

En la Tabla 8.51 se incluyen los valores mensuales calculados de la cuenca.

Tabla 8.51 Balance legal de la cuenca del Río San José. Fuente: elaboración propia.

Componente del balance	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Entradas [l/s]												
Precipitación	29.027	31.266	14.320	401	274	325	857	1.777	180	237	358	7.115
Transvase desde el canal Lauca	900	867	847	757	723	717	705	677	707	728	773	803
Retorno por riego	594	472	586	460	309	230	276	314	525	753	747	762
Salidas [l/s]												
Evapotranspiración	27.194	29.316	13.364	372	253	301	813	1684	166	222	331	6611
Evaporación desde cuerpos de agua	43	42	45	52	47	46	45	50	55	60	58	50
Demanda Legal	3.780	3.780	3.780	3.780	3.780	3.780	3.780	3.780	3.780	3.780	3.780	3.780
Caudal superficial estimado saliente	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Caudal subterráneo estimado saliente	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Σ Entradas [l/s]	30.521	32.605	15.753	1.618	1.306	1.272	1.838	2.768	1.412	1.718	1.877	8.680
Σ Salidas [l/s]	30.963	33.084	17.135	4.149	4.026	4.073	4.585	5.460	3.947	4.008	4.115	10.387
Balance [l/s]	-496	-533	-1.436	-2.585	-2.774	-2.855	-2.801	-2.746	-2.589	-2.344	-2.292	-1.761

8.2.4 Cuenca de la Quebrada Chaca-Vítor

En la Tabla 8.52 se incluyen los valores mensuales calculados de la cuenca.

Tabla 8.52 Balance legal de la cuenca de la Quebrada Chaca-Vítor. Fuente: Elaboración propia.

Componente del balance	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Entradas [l/s]												
Precipitación	9.268	16.938	6.924	554	0	5	551	824	206	3	13	1.531
Retorno por riego	71	66	59	35	17	13	16	18	36	60	65	76
Salidas [l/s]												
Evapotranspiración	8.805	16.092	6.578	526	0	5	524	783	195	2	13	1.454
Evaporación de la lámina de agua	6	5	5	4	4	3	3	4	5	6	6	6
Demanda Legal	2.903	2.903	2.903	2.903	2.903	2.903	2.903	2.903	2.903	2.903	2.903	2.903
Caudal superficial registrado en estación	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Caudal subterráneo estimado saliente	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7
Σ Entradas [l/s]	9.339	17.004	6.982	588	17	18	567	842	242	62	78	1.607
Σ Salidas [l/s]	11.732	19.019	9.504	3.452	2.925	2.930	3.449	3.709	3.122	2.930	2.940	4.382
Balance [l/s]	-2.379	-2.000	-2.507	-2.849	-2.894	-2.897	-2.867	-2.851	-2.866	-2.853	-2.848	-2.760

8.2.5 Cuenca del Río Camarones

En la Tabla 8.53 se incluyen los valores mensuales calculados de la cuenca.

Tabla 8.53 Balance legal de la cuenca del Río Camarones. Fuente: Elaboración propia.

Componente del balance	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Entradas [l/s]												
Precipitación	27.389	50.055	20.461	1.636	0	16	1.628	2.435	608	8	39	4.523
Retorno por riego	819	698	699	527	407	348	392	449	622	782	814	923
Salidas [l/s]												
Evapotranspiración	25.246	46.138	18.859	1.508	0	14	1.501	2.245	560	7	36	4.169
Evaporación desde cuerpos de agua	377	345	328	281	243	217	232	283	345	395	415	406
Demanda Legal	2.064	2.064	2.064	2.064	2.064	2.064	2.064	2.064	2.064	2.064	2.064	2.064
Caudal superficial registrado en estación	908	1119	1304	471	490	519	469	356	271	246	238	329
Caudal subterráneo estimado saliente	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21
Σ Entradas [l/s]	28.208	50.753	21.160	2.163	407	363	2.020	2.884	1.229	790	853	5.447
Σ Salidas [l/s]	28.585	49.657	22.546	4.315	2.787	2.804	4.256	4.939	3.231	2.702	2.743	6.959
Balance [l/s]	-408	1.067	-1.416	-2.181	-2.411	-2.471	-2.266	-2.085	-2.032	-1.942	-1.920	-1.542

8.2.6 Cuenca de los Ríos Uchusuma y Caquena

En la Tabla 8.54 se incluyen los valores mensuales calculados de la cuenca.

Tabla 8.54 Balance legal de la cuenca de los Ríos Uchusuma y Caquena. Fuente: Elaboración propia.

Componente del balance	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Entradas [l/s]												
Precipitación	60.398	53.098	40.850	5.961	497	618	1.283	810	250	938	4.436	26.066
Retorno por riego	116	7	162	340	296	318	364	420	404	472	454	284
Salidas [l/s]												
Evapotranspiración	45.370	39.886	30.686	4.478	373	465	964	608	188	705	3.332	19.581
Evaporación desde lámina de agua	84	90	81	79	85	64	68	81	99	103	115	110
Demanda Legal	1.193	1.193	1.193	1.193	1.193	1.193	1.193	1.193	1.193	1.193	1.193	1.193
Caudal superficial estimado saliente	2.002	2.227	1.927	1.131	963	1.095	1.174	1.086	851	584	578	1.021
Caudal subterráneo estimado saliente	1.406	1.406	1.406	1.406	1.406	1.406	1.406	1.406	1.406	1.406	1.406	1.406
Σ Entradas [l/s]	60.514	53.104	41.013	6.301	793	937	1.648	1.230	654	1.410	4.890	26.351
Σ Salidas [l/s]	50.055	44.802	35.293	8.287	4.021	4.222	4.805	4.374	3.737	3.990	6.624	23.311
Balance [l/s]	10.459	8.303	5.719	-1.986	-3.228	-3.286	-3.158	-3.144	-3.082	-2.580	-1.735	3.040

8.2.7 Cuenca del Lago Chungara

En la Tabla 8.55 se incluyen los valores mensuales calculados de la cuenca.

Tabla 8.55 Balance legal de la cuenca del Lago Chungara. Fuente: elaboración propia.

Componente del balance	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Entradas [l/s]												
Precipitación	12.383	9.334	6.254	1.399	218	418	372	438	202	438	1.311	4.817
Salidas [l/s]												
Evapotranspiración	7.723	5.821	3.901	873	136	261	232	273	126	273	817	3.005
Evaporación desde lámina de agua	878	878	878	878	878	878	878	878	878	878	878	878
Demanda Legal	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58
Caudal subterráneo hacia Lagunas de Cotacotani	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250
Σ Entradas [l/s]	12.383	9.334	6.254	1.399	218	418	372	438	202	438	1.311	4.817
Σ Salidas [l/s]	8.909	7.007	5.087	2.058	1.322	1.447	1.418	1.459	1.312	1.459	2.003	4.190
Balance [l/s]	3.474	2.326	1.168	-659	-1.104	-1.028	-1.046	-1.021	-1.110	-1.021	-693	627

8.2.8 Cuenca del Río Lauca

En la Tabla 8.56 se incluyen los valores mensuales calculados de la cuenca.

Tabla 8.56 Balance legal de la cuenca del Río Lauca Fuente: elaboración propia.

Componente del balance	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Entradas [l/s]												
Precipitación	91.644	69.173	41.414	8.521	1.181	666	5.087	2.157	1.103	1.295	5.215	29.996
Caudal subterráneo desde el Lago Chungará	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250
Caudal subterráneo desde el Volcán Guallatire	351	252	239	347	379	335	301	321	450	557	636	579
Retorno por riego	77	5	108	227	197	212	243	280	269	315	302	190
Salidas [l/s]												
Evapotranspiración	74.966	56.585	33.878	6.971	966	545	4.161	1.764	903	1.059	4.266	24.537
Evaporación desde lámina de agua	420	420	420	420	420	420	420	420	420	420	420	420
Demanda Legal	2.989	2.989	2.989	2.989	2.989	2.989	2.989	2.989	2.989	2.989	2.989	2.989
Extracciones del canal Lauca	900	867	847	757	723	717	705	677	707	728	773	803
Caudal superficial registrado en estación	3.499	5.546	4.681	2.605	1.900	1.882	1.977	1.871	1.676	1.548	1.551	1.687
Caudal subterráneo estimado saliente	232	232	232	232	232	232	232	232	232	232	232	232
Σ Entradas [l/s]	92.322	69.679	42.011	9.345	2.007	1.464	5.880	3.008	2.073	2.416	6.404	31.014
Σ Salidas [l/s]	83.006	66.638	43.046	13.974	7.231	6.785	10.483	7.953	6.927	6.975	10.231	30.667
Balance [l/s]	9.316	3.041	-1.035	-4.629	-5.223	-5.321	-4.603	-4.945	-4.854	-4.559	-3.827	347

8.2.9 Cuenca del Salar de Surire

En la Tabla 8.57 se incluyen los valores mensuales calculados de la cuenca.

Tabla 8.57 Balance legal de la cuenca del Salar de Surire Fuente: elaboración propia.

Componente del balance	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Entradas [l/s]												
Precipitación	23.404	20.151	12.810	2.978	290	112	556	226	68	157	981	7.747
Salidas [l/s]												
Evapotranspiración	15.856	13.652	8.678	2.017	196	76	377	153	46	106	665	5.248
Evaporación desde el Salar	1.840	1.840	1.840	1.840	1.840	1.840	1.840	1.840	1.840	1.840	1.840	1.840
Demanda Legal	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
Σ Entradas [l/s]	23.404	20.151	12.810	2.978	290	112	556	226	68	157	981	7.747
Σ Salidas [l/s]	17.756	15.552	10.578	3.917	2.096	1.976	2.277	2.053	1.946	2.006	2.565	7.148
Balance [l/s]	5.649	4.600	2.232	-939	-1.807	-1.864	-1.721	-1.827	-1.878	-1.849	-1.583	599

9. **Taller Final de Presentación de Resultados**

Entre los días 26 y 27 de Octubre se realizaron 3 reuniones informativas con la comunidad y autoridades de la región de Arica y Parinacota en el marco del proceso de información a la comunidad (PAC) del proyecto "Estudio Integral de Soluciones a la Escasez Hídrica, región de Arica y Parinacota". Estas reuniones tenían por objetivo dar cuenta de los principales resultados de esta iniciativa, financiada por la Dirección Regional de Aguas y ejecutada por la Consultora Ingeniería y Consultoría en Aguas Superficiales y Subterráneas (ICASS).

9.1 Sobre la Participación de la Comunidad en esta instancia

Los procesos de Participación Comunitaria son esenciales para el logro de proyectos con pertinencia sociocultural, pero también que consideren las perspectivas y visiones que la comunidad sostiene respecto a su propio entorno sociocultural, biológico y medioambiental. Esto forma parte de diversos procesos ocurridos en toda Latinoamérica, ligados a la democratización del Estado, los que, entre otros resultados, han impactado fuertemente en la gestión gubernamental de los Estados latinoamericanos. Estas transformaciones de gestión han cristalizado en la creación y promoción de mecanismos para la participación de la sociedad civil, tanto en políticas y decisiones públicas, como en la gestión de diversos servicios o programas públicos[7].

Particularmente, el Estado de Chile establece que la Participación Ciudadana en las políticas públicas contribuye a la mejora de la gestión pública, al posibilitar la incorporación de la opinión ciudadana en las distintas etapas de ésta, lo que fortalece

7 Pérez Ordóñez, Demetrio, en "Manual de capacitación de la Ley de CDUR 2002" Programa de Participación y Democracia FLACSO Guatemala - Universidad Rafael Landivar. En Participación Ciudadana y Políticas Públicas. Una problematización acerca de la relación Estado y Sociedad Civil en América Latina en la última década. Alejandro Escobar L. http://mingaonline.uach.cl/scielo.php?pid=S0718-17952004000100007&script=sci_arttext

la democracia y permite que los resultados de las políticas estatales sean más efectivos y cercanos a las necesidades de las comunidades[8] . En esta línea, se trabajó en virtud del mecanismo "Acceso a la información relevante", en los talleres de presentación de proyecto y de resultados, de los 4 existentes señalados por la ley[9].

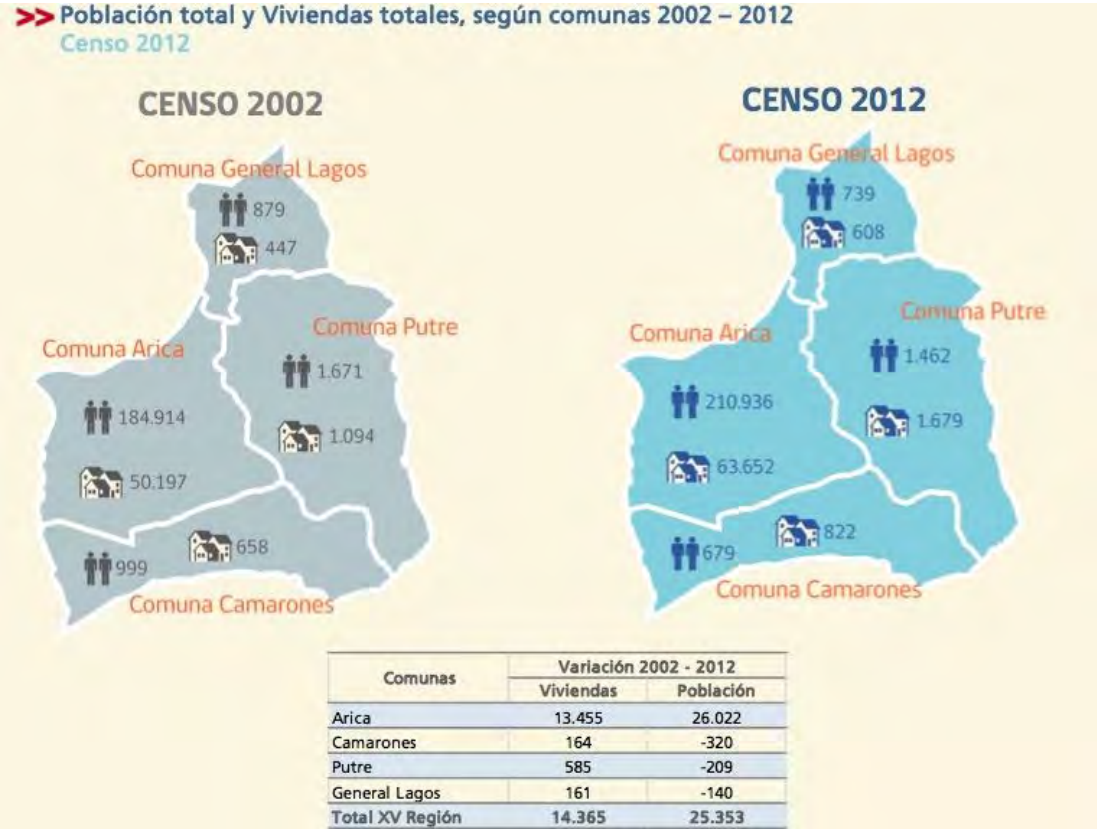
9.2 Proceso de Convocatoria y datos regionales disponibles

Para lograr una buena convocatoria es fundamental conocer quiénes conforman 'la comunidad' con la que nos encontraremos en esta región, es decir: ¿cuántas personas son?, ¿quiénes son estas personas?, ¿dónde están?, especialmente porque se solicita un cierto número de reuniones, talleres, entrevistas, encuestas y otras actividades que la considera permanentemente como elemento de validación del proceso desarrollado por el equipo técnico, las que deben ser realizadas a la luz de sus características generales.

Por esta necesidad, en la propuesta se elaboró un acercamiento a la comunidad de la región. Los datos demográficos indican que la población de la región alcanza las 213.816 personas (INE, 2012), concentrándose la mayoría en la comuna de Arica. En la Figura 9.1 muestra la distribución gráfica y la variación entre el Censo 2002 y el 2012.

[8] http://www.msgg.gob.cl/participacion-ciudadana/ http://www.msgg.gob.cl/participacion-ciudadana/

[9] http://www.leydetransparencia.cl/que-es-participacion-ciudadana

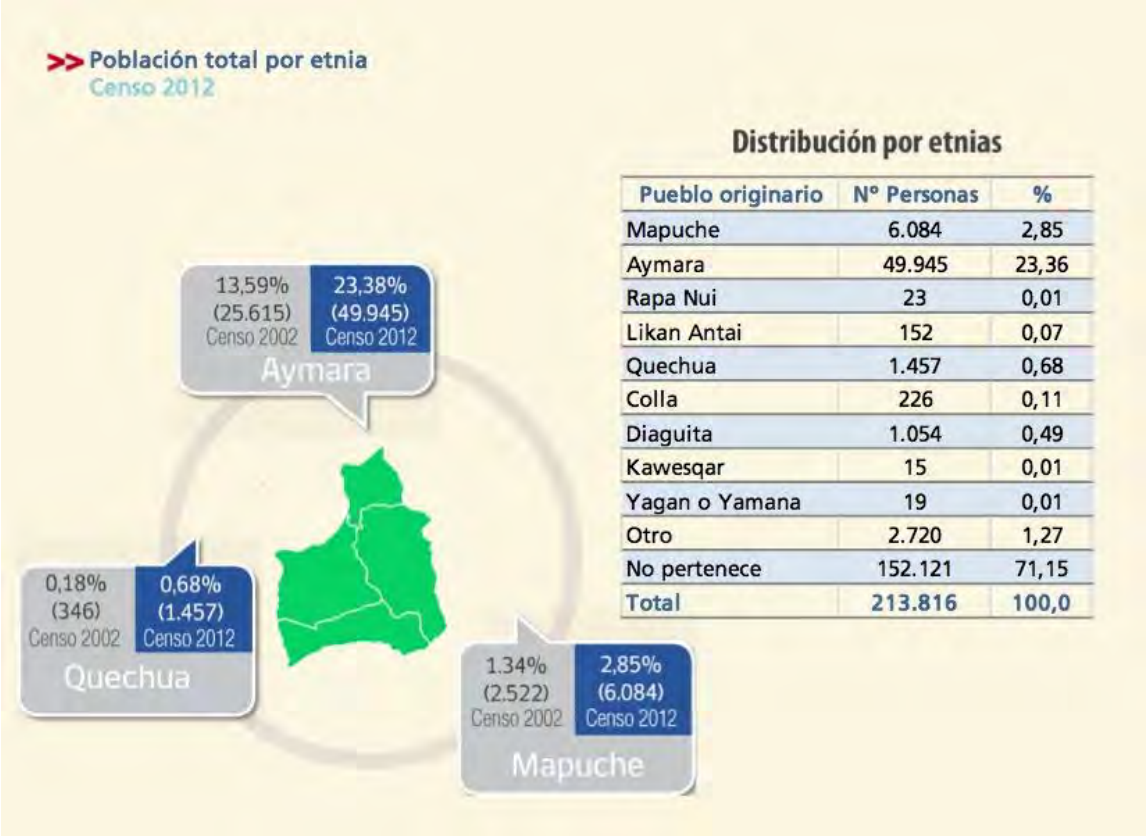


Comunas	Variación 2002 - 2012	
	Viviendas	Población
Arica	13.455	26.022
Camarones	164	-320
Putre	585	-209
General Lagos	161	-140
Total XV Región	14.365	25.353

Figura 9.1 Distribución gráfica y la variación entre el Censo 2002 y el 2012. Fuente: Síntesis de Resultados Región Arica y Parinacota. INE. 2012. http://www.inearicayparinacota.cl/archivos/files/pdf/Noticias/2013/04/presentacion%20sintesis%20censo%2002042013.pdf.

En las cifras regionales, el pueblo aymara presenta un 23,36% del total de población de la región. En relación a la población indígena total de la región, el porcentaje de adscripción al grupo aymara alcanza un 87,3% del total de grupos étnicos. De este modo, es posible decir que los aymaras representan la mayoría de población étnica en Arica y Parinacota[10]. En la Figura 9.2 se muestra gráficamente la distribución de las etnias existentes en la región de Arica y Parinacota

[10] Diagnóstico Propuesta Ejes Estratégicos Área Desarrollo Indígena Alto Andino Región de Arica y Parinacota en Base a Participación Dirigencial en Asambleas Territoriales Comunales. Kimsa Wara Consultores. 2010.



Distribución por etnias

Pueblo originario	N° Personas	%
Mapuche	6.084	2,85
Aymara	49.945	23,36
Rapa Nui	23	0,01
Likan Antai	152	0,07
Quechua	1.457	0,68
Colla	226	0,11
Diaguita	1.054	0,49
Kawesqar	15	0,01
Yagan o Yamana	19	0,01
Otro	2.720	1,27
No pertenece	152.121	71,15
Total	213.816	100,0

Figura 9.2 Distribución por etnias en la región de Arica y Parinacota. Fuente: Síntesis de Resultados Región Arica y Parinacota. INE. 2012. http://www.inearicayparinacota.cl/archivos/files/pdf/Noticias/2013/04/presentacion%20sintesis%20censo

Las formas organizacionales más utilizadas por la etnia aymara, las que generalmente operan en la ciudad de Arica, son las comunidades y las asociaciones indígenas. De acuerdo a Gutiérrez y Villacorta (2011) una comunidad es un grupo de personas que comparten una misma etnia, descienden de un mismo tronco familiar, con una jefatura tradicional, que tengan o hayan tenido tierras comunes y provengan de un mismo poblado o localidad. Por otra parte, y de acuerdo a la misma fuente, una Asociación es una agrupación voluntaria y tradicional, que debe contar con al menos 25 personas pertenecientes a una etnia, que comparten un interés común, por ejemplo: educación, cultura, actividades profesionales o productivas en común (Gutiérrez y Villacorta, 2011). En Arica y Parinacota se contó con listados completos de las Asociaciones y Comunidades Indígenas, cuyos números totales son los siguientes:

Tabla 9.1 Nº de Asociaciones y Comunidades Indígenas por comuna, región XV. Fuente: Gutiérrez y Villacorta, 2011, sobre Base de datos Conadi 2011.

Comuna	Asociaciones Indígenas	Comunidades Indígenas
Arica	101	6
Camarones	4	19
Putre	6	24
Gral. Lagos	4	15
Org. sin p/j vigente	39	7
TOTAL	154	71

Un aspecto importante en las convocatorias realizadas fue la invitación a estas Comunidades y Asociaciones Indígenas, así como la información de los Consejeros ADI en el territorio. Estos datos fueron aportados por la Corporación Nacional Indígena (CONADI). Asimismo, se invitó a las Juntas de Vecinos de toda la región (considerando que la comunidad regional no está compuesta sólo por indígenas), datos que fueron aportados por el Departamento Social del Ministerio de Desarrollo Social. Por tanto, se consideró tanto la comunidad indígena del territorio, sus representantes ADI y a la comunidad de la región, representada por las Juntas de Vecinos de cada localidad.

La metodología de convocatoria se debió ajustar, debido a que el proceso de cierre del proyecto se realizó en un período más corto del previsto inicialmente. Por ello, la convocatoria estuvo ligada fuertemente a la invitación de personas y organizaciones que previamente habían asistido a alguna de las reuniones de presentación de resultados, tanto de la primera parte (realizadas en octubre del año 2015), como las reuniones de presentación de la segunda parte de este estudio (realizados a inicios de octubre del 2016). Esta invitación fue realizada por mail, por teléfono y de forma presencial en el caso de Putre y algunos sectores de la ciudad de Arica. La invitación a servicios públicos se guió por el protocolo regional existente.

En la Figura 9.3 se citan los lugares y días en los que se realizaron las reuniones de presentación de resultados del proyecto.

Reunión de Putre. 26 de Octubre. Sala María Isabel Marcelo

Reunión de Arica. 27 de Octubre. Hotel del Valle.

Reunión de Poconchile. 27 de Octubre. Sede Junta de Vigilancia Lluta, en Arica.

Figura 9.3 Talleres de presentación de los resultados del proyecto. Fuente: elaboración propia.

10. **Conclusiones**

REVISIÓN DE ANTECEDENTES

De los 146 informes recopilados y analizados durante el estudio se ha podido concluir lo siguiente en cada cuenca:

La cuenca de la quebrada La Concordia presenta escasa información hidrológica, hidroquímica e hidrogeológica. No se han llevado a cabo estudios hidroquímicos donde se observe si existen variaciones estacionales ni un análisis isotópico para identificar las zonas de recarga del acuífero. Tampoco se ha realizado una prospección geofísica para identificar y caracterizar la geometría del acuífero existente en esta cuenca.

- Las cuencas del río Lluta, río San José y del río Camarones son las cuencas en las que se han llevado a cabo mayor número de estudios. En la cuenca del río Lluta y del río San José se han elaborado varios modelos numéricos de simulación. Y en la cuenca de Camarones se han realizado estudios hidrológicos e hidroquímicos, sin embargo, esta última no dispone de estudios hidrogeológicos.
- La cuenca de la quebrada Chaca-Vítor cuenta con un informe específico de la parte baja de la cuenca, exactamente del sector de Chaca y de la Caleta de Vítor. En estos sectores se tomaron muestras de agua para el análisis hidroquímico e isotópico y se realizó prospección geofísica, sin embargo, el sector medio y alto cuenta con escasa información. Es necesario estudiar la cuenca completa, en su conjunto.
- No se ha encontrado ningún informe específico de la cuenca de los ríos Uchusuma y Caquena, excepto algunos datos hidroquímicos muestreados en las estaciones de calidad de aguas por la DGA y ACA (1994) y de una tesis brasileña que toca la cuenca completa del río Uchusuma.
- La cuenca del lago Chungara ha sido estudiado hidroquímica e isotópicamente en repetidas ocasiones , cuyos estudios han evidenciado la conexión hidráulica entre el lago Chungara y las lagunas de Cotacotani.
- En la cuenca del río Lauca existe información hidrológica e hidroquímica muy completa y actual. A nivel hidrológico, se elaboró una caracterización y un

modelo conceptual. Hidroquímicamente se analizó la variación hidroquímica estacional y se estudiaron isotópicamente (^{18}O y deuterio), vertientes y cauces superficiales. Por otro lado, se efectuó una prospección geofísica que permitió la caracterización hidrogeológica, sin embargo, no existen datos de los parámetros hidráulicos de los acuíferos del sector sur de la cuenca.

- La cuenca del salar de Surire fue estudiada geológicamente por contener minerales de interés económico, como la ulexita. Por otro lado, también ha sido estudiada con detalle de hidroquímica e isotópicamente por Risacher *et al.* (1999). Es la cuenca altiplánica con mayor número de muestras analizadas isotópicamente, ^{18}O y deuterio. Sin embargo, no cuenta con estudios de caracterización hidrológica e hidrogeológica de los recusos hídricos presentes en ésta.

SISTEMATIZACIÓN DE LOS DERECHOS DE APROVECHAMIENTO DE AGUAS

Se realizó un levantamiento de los derechos de aprovechamiento de aguas desde los libros del Registro de Propiedad de Aguas del Conservador de Bienes Rices (CBR) de Arica. De éstos se levantaron 5.623 registros o inscripciones de personas naturales y jurídicas, de inscripciones individuales de los comuneros o accionistas que se encuentran legalmente inscritos hasta el año 2015. De la revisión de las inscripciones se pudo determinar que existen 889 derechos de aprovechamiento de aguas originarios (DAA). Así mismo se levantaron las inscripciones de las Comunidades de Aguas, así como de las Juntas de Vigilancia.

En el desarrollo de la sistematización de DAA se encontraron algunos problemas correspondientes a vicios en las transferencias que se traducen en la duplicidad de derechos producto de que lo transferido excede al caudal del derecho otorgado originalmente. Adicionalmente, se ha visualizado que existe una gran cantidad de casos en los que se requiere un perfeccionamiento del derecho con el fin de llegar al caudal, ya que es difícil o las condiciones en que se encuentra es imposible determinarlo.

Para poder administrar y visualizar de forma dinámica las redes de transferencias de títulos de derechos de aprovechamiento de agua (DAA), se ha preparado una "Plataforma de transferencia de DAA" que permita una fácil y rápida comprensión de estas y que posibilite el ingreso de nuevas transacciones o derechos, para lo cual se ha

utilizado la Teoría de Grafos, determinando la cadena de transferencias de un título vigente desde su origen.

DEMANDA DE AGUA

Las demandas actuales se han estimado por cuenca en base a la información existente y a la actualización de las áreas de cultivo que se ha realizado con imágenes satelitales. La demanda real de la región asciende a aproximadamente 8782 l/s, en el que la agricultura consume un 87% y la producción de agua potable un 10 %. Las demandas reales de agua demuestran que éstos han aumentado en cada una de las cuencas, específicamente en las cuencas de Lluta y San José, las cuales han presentado un crecimiento agrícola y poblacional importante.

MERCADO DEL AGUA

En cuanto al análisis planteado de los mercados de agua, tanto los modelos como los datos analizados muestran el potencial que los mercados presentan como instrumento de gestión de agua en momentos de escasez. Se aprecia como los precios de los derechos de agua reflejan los costos de escasez y por tanto generarían beneficios para las partes involucradas en la transacción. La comuna con mayores ingresos (Arica fundamentalmente) presenta mayor un número de transacciones y valores más elevados llegando hasta los 9 millones por acción. Las transacciones en acciones son las más comunes, y para tener conclusiones más robustas sobre su relación con la disponibilidad de agua, es necesario conocer su factor de transformación a caudal.

HIDROLOGÍA

En las zonas altas de la región se presenta una pluviometría importante, precipitandola mayor cantidad de agua durante el invierno altiplánico. Las precipitaciones se producen de manera puntual, sin que los eventos ocurran necesariamente en forma simultánea. Sin embargo, en el resto de la región las precipitaciones son bajas a nulas, propias de la zona más árida del mundo y parte del desierto de Atacama.

Dadas las temperaturas y radiaciones altas, la región cuenta con altos valores de evaporación y evapotranspiración, lo que considera grandes salidas de agua desde cada una de las cuencas. Esto cobra especial relevancia debido a que las mediciones

de estos parámetros son insuficientes, generando una gran incertidumbre para la determinación de los balances hídricos de las cuencas.

En términos de escorrentía, los caudales responden a los eventos generados en las partes altas de las cuencas, teniendo en general una gran variación, llegando a caudales nulos en los períodos de invierno. De las cuencas que tienen salida al océano Pacífico, la única que presenta una escorrentía permanente es la cuenca de Lluta, ya que es la única cuenca que se desarrolla desde cordillera a mar.

Los caudales de los eventos extremos que se presentan durante el invierno altiplánico no cuentan con regulación alguna, a execepción del embalse Caritaya en el rio camarones, descargando grandes cantidades de agua hacia el mar o hacia el interior. Sitación que puede ser vista como parte de la gestión de los recursos hídricos.

Durante el presente estudio se han realizado 4 campañas de aforos en los distintos cauces de la región, lo que ha permitido complementar y contrastar los caudales de las pocas estaciones fluviométricas presentes.

HIDROGEOLOGÍA

En la región de Arica y Parinacota se han realizado estudios hidrogeológicos de un modo localizado en los sectores de los valles de cada cuenca y en la parte alta del río Lauca. Por este motivo, la Unidad Hidrogeológica I compuesta por depósitos fluviales y aluviales se han estudiado en la parte baja de los valles mediante estudios geofísicos, sondajes y pruebas de bombeo debido a la necesidad de agua para el riego de los cultivos. Sin embargo, el resto de unidades hidrogeológicas no han sido caracterizadas anteriormente por lo que en el presente estudio se han definido las unidades hidrogeológicas a partir principalmente del mapa geológico de la región de Arica (1:250.000) y de Visviri (1:100.000), mapa hidrogeológico de Chile (1:1.000.000), imágenes satelitales y visitas a terreno.

Los parámetros hidráulicos de la Unidad Hidrogeológica I se obtuvieron de las pruebas de bombeo efectuadas en determinados valles y se ha extrapolado a las cuencas donde no se han realizado ensayos hidráulicos para estimar parámetros. Generalmente los parámetros hidráulicos del resto de unidades hidrogeológicas se han basado en los valores otorgados a materiales geológicos similares definidos en la bibliografía existente.

En la cuenca de la quebrada La Concordia, del río Lluta y del río San José se han analizado la evolución histórica de los niveles piezométricos de la Unidad Hidrogeológica I gracias al registro de niveles que monitorea la DGA, sin embargo este análisis no se pudo realizar en el resto de las cuencas por falta de información. De los antecedentes se han obtenido mapas piezométricos, en el que la cuenca con mayor extensión de isopiezas y líneas de flujo corresponde a la cuenca del río Lauca, mientras que en las cuencas que drenan al océano Pacífico se había elaborado la piezometría únicamente de los valles. Por lo tanto, en el presente estudio se ha actualizado según el grado de información disponible las piezometrías preexistentes y se ha elaborado nuevas isopiezas a partir de imágenes satelitales, niveles de pozos, vertientes y mapas topográficos, sobre todo en la parte alta de las cuencas.

Por otro lado, de acuerdo a los informes revisados existen incongruencias o falta de información relacionada con las captaciones utilizadas para la caracterización hidrogeológica de las cuencas. Sobre la exactitud de la ubicación de las captaciones analizadas, generalmente no indican que sistema de referencia corresponde a las coordenadas de las captaciones donde se ha monitoreado el nivel piezométrico, realizado pruebas de bombeo y/u obtenido la estratigrafía del sondaje, entre otros, lo cual implica una incertidumbre en la ubicación de las captaciones. Relacionado a la piezometría y análisis de la evolución histórica de los niveles piezométricos en las captaciones, en ocasiones no se indica la cota topográfica de la captación, la información de la altura del brocal, si la medición del nivel es la profundidad desde el punto de medición o la altura del nivel sobre el nivel del mar, entre otros. Por otro lado, en escasas captaciones se obtuvo la información completa de la ubicación, descripción de la columna estratigráfica, las características de la habilitación del pozo y las pruebas de bombeo realizadas en la captación para caracterizar con mayor detalle las unidades hidrogeológicas.

Por lo tanto, desde el punto de vista hidrogeológico es necesario investigar con mayor detalle las unidades que pueden aportan recursos hídricos subterráneos mediante métodos directos, es decir, pruebas de bombeo, construcción de piezómetros, prospecciones geofísicas, entre otros.

HIDROQUÍMICA E ISÓTOPOS

Durante el presente estudio se han realizado 4 campañas de muestreo hidroquímico e isotópico (^{18}O y deuterio) a las masas de agua superficial y subterranea de la región, lo que ha permitido contar con más de 400 análisis de hidroquímica y 300 de isótopos, que han servido para caracterizar la calidad de las aguas de la región.

El análisis de calidad de las aguas superficiales y subterráneas de la región de Arica y Parinacota concluye en términos generales que no son aptas para el consumo humano por exceder principalmente los límites de arsénico, cloruros, entre otros elementos que indica la norma NCh 409, además en numerosas muestras superan el nivel de boro establecido en la norma para riego NCh 1.333. Sin embargo, igualmente existen fuentes puntuales en cada una de las cuencas que si cumplen las norma NCh 409.

Las aguas subterráneas muestreadas en el acuífero próximo a la costa de la cuenca de la quebrada La Concordia son frescas, alcalinas, cloruradas sódicas y, generalmente, poco mineralizadas.

El río Lluta recibe contaminantes naturales provenientes de dos fuentes, por un lado el río Azufre aporta aguas ácidas y ricas en arsénico, boro, azufre y metales como hierro, manganeso y zinc y, aguas abajo, el río Colpitas suministra aguas alcalinas y con alto contenido de boro. El sector del valle del río Lluta está influenciado por los efectos de los suelos salinos dados por la alta concentración de nitrato de sodio y otros compuestos en la cuenca, además el alto contenido de nitratos en las aguas subterráneas del valle del río Lluta se debe a la intensificación de las prácticas agrícolas y ganaderas y la sobreexplotación que sufre el acuífero, el que empeora la calidad de las aguas subterráneas.

Las aguas de la cuenca del río San José manifiestan un proceso de mezcla de aguas de diferentes orígenes en el acuífero del valle de Azapa, en el que algunas aguas proceden de la cuenca del río Lauca y otras de las quebradas precordilleranas de la propia cuenca. Las aguas subterráneas del acuífero detrítico del valle de Azapa están afectadas por la intrusión marina que produjo la sobreexplotación del acuífero y por el aumento de la extensión de riego de los campos de cultivo que provocan el lavado de suelos salinos y del cultivo intensivo en el valle de Azapa durante las últimas décadas.

Las aguas de la cuenca de la quebrada Chaca-Vítor son sulfatadas sódicas o cálcicas, siendo más mineralizadas las aguas del acuífero del valle que las aguas superficiales. En la cabecera de la cuenca, en la quebrada Achacagua, destacan las aguas ácidas y sulfatadas cálcico-sódicas, que proceden de los cerros Familiani y Margarita y reflejan la alteración hidrotermal que existe en estos cerros volcánicos.

Las aguas superficiales del río Camarones son cloruradas sódicas y va aumentando el grado de mineralización de las aguas desde la estación de aforo Chilpe hacia la desembocadura al océano Pacífico. El río Camarones recibe aguas frescas y sulfatadas cálcicas del río Ajatama y aguas cloruradas sódicas del río Caritaya y de las lagunas de Amuyo. Las lagunas de Amuyo presentan estas facies cloruradas sódicas y este alto contenido en elementos mayores por su origen hidrotermal.

Las aguas superficiales de la cuenca de los ríos Uchusuma y Caquena presentan una composición hidroquímica variada. Las aguas del río Caquena en el pueblo Caquena son aguas alcalinas, sulfato-bicarbonatadas magnésico-sódicas, pero van evolucionando a largo del cauce a cloruradas sódicas. El río Putani presenta aguas frescas, alcalinas sulfatadas cálcicas y con un alto contenido en arsénico. Por otro lado, la quebrada Coipacoipani nace de la confluencia de numerosas quebradas cuyas facies varían desde aguas frescas sulfatadas cálcicas a bicarbonatadas sódicas, aunque la propia quebrada Coipacoipani presenta una alta conductividad eléctrica y aguas cloruradas sódicas.

En la cuenca del lago Chungara, las aguas de las vertientes que alimentan al lago son aguas frescas, bicarbonatadas cálcica-sódicas y poco mineralizadas, el río Chungara porta aguas sulfatada-bicarbonatada magnésico-cálcicas y las aguas del lago Chungara son sulfatada-magnésicas o sulfatada-bicarbonatada magnésico-sódicas.

La cuenca del río Lauca se caracteriza por el sistema de lagunas y ciénagas en el sector norte de la cuenca. Las superficiales en la bocatoma del río Lauca son aguas alcalinas sulfatadas-bicarbonatadas magnésicas, con una conductividad eléctrica que varía entre 700-500 µS/cm y concentraciones relativamente altas de elementos mayores, que refleja que su origen son las lagunas de Cotacotani y las ciénagas de Parinacota. Aguas abajo de la bocatoma, el río Lauca recibe el aporte de las aguas alcalinas, frescas y bicarbonatadas magnésico-sódicas del acuífero semiconfinado. Las aguas del río Guallatire son neutras-alcalinas y sulfatadas cálcico-magnésicas.

Las aguas de la cuenca del salar de Surire presenten una amplia variación en la composición hidroquímica. La muestra de agua superficial tomada en el borde occidental, refugio de la Conaf, corresponde a aguas frescas, bicarbonatadas cálcicas y muy poco mineralizadas, aptas para el consumo humano. La quebrada Huaijata (o Surire) son aguas bicarbonatadas sódico-magnésicas que evolucionan a bicarbonatadas –cloruradas cálcico-magnésicas más mineralizadas, efecto del bofedal que atraviesa. Por otro lado, las muestras ubicadas en el borde norte, oriente y sureste del salar de Surire son cloruradas sódicas y más mineralizadas que el resto de aguas analizadas, reflejo de la circulación por depósitos salinos. Existe una fuente hidrotermal en la parte sureste de la cuenca.

BALANCES

Los balances son preliminares con un alto grado de incertidumbre asociados a la estimación de los diferentes parámetros. Sin embargo es posible afirmar que los acuíferos del valle de Lluta y especialmente el de Azapa presentan un alto déficit hídrico, mientras que en las cuencas altiplánicas se dispone de una mayor cantidad de recursos hídricos.

11. **Recomendaciones**

La revisión y análisis de la información ha permitido definir las áreas que poseen escasa información y las actividades que proporcionan mayor conocimiento sobre la disponibilidad hídrica existente en la región de Arica y Parinacota. A continuación se proponen y recomiendan una serie de trabajos de terreno antes de realizar los estudios:

- Instalación de lisímetros en las cuencas cerradas y abiertas del altiplano.
    - Estos permitirían obtener la evapotranspiración y se calibrarían con las mediciones de domos.
    - Cada estación de lisímetro debiera contar con un pluviómetro, un piezómetro, y un lisímetro de carga constante.
    - Se proponen instalar primero en las cuencas cerradas de Surire y Chungara, y luego en las abiertas de Uchusuma y Caquena, Lauca y Lluta Alto. El número depende de la extensión de la cuenca, pero estimativamente, se recomienda instalar 3 estaciones en Surire, 1 en Chungara, 3 en Uchusuma y Caquena, 4 en Lauca y 3 en Lluta.
    - Estas estaciones debieran contar con autonomía de batería y panel solar, un datalogger suficiente que pueda registrar los datos durante al menos 30 días y la transmisión en forma satelital a un receptor de la DGA.

- Instalación de estaciones meteorológicas en las zonas de escasez de información meteorológica.
    - Esto se ha detectado en las zonas altas de las cuencas de la quebrada Chaca-Vítor y del río Camarones, y en al menos dos puntos de la cuenca de la quebrada de La Concordia.
    - Cada estación debiera medir los parámetros de temperatura, humedad relativa, dirección y velocidad del viento, radiación y precipitación.

  - Estas estaciones debieran contar con autonomía de batería y panel solar, un datalogger suficiente que pueda registrar los datos durante al menos 30 días y la transmisión en forma satelital a un receptor de la DGA.

- Instalación de estaciones fluviométricas en las zonas de escasez de información fluviométrica.
  - Esto se ha detectado en las cuencas del lago Chungara y salar de Surire.
  - Las anteriores cuencas deberían contar con al menos una estación fluviométrica que registrara el caudal del río Chungara y Surire al aporte a los lagos respectivos.
  - Estas estaciones debieran contar con autonomía de batería y panel solar, un datalogger suficiente que pueda registrar los datos durante al menos 30 días y la transmisión en forma satelital a un receptor de la DGA.

- Instalación de estaciones de calidad de agua.
  - Los cursos de agua superficial y las aguas subterráneas de la región presentan muy pocas estaciones de calidad, las cuales se deben complementar en zonas con baja o nula información de calidad.
  - Este es el caso de los cauces superficiales del río San José en Tignamar, Alto Chaca-Vítor, río Macusa y río Surire, y de los acuíferos de La Concordia, Azapa, Chaca-Vítor Alto y Bajo, Camarones Alto, Uchusuma y Caquena, Lauca y Surire.
  - Estas estaciones debieran contar con autonomía de batería y panel solar, un datalogger suficiente que pueda registrar los datos durante al menos 30 días y la transmisión en forma satelital a un receptor de la DGA.
  - Se recomienda implementar esta red de monitoreo en pozos de propiedad de la DGA, de manera de evitar la vulnerabilidad.
  - Este monitoreo de registro continuo permitirá alimentar los Planes de Alerta Temprana de los acuíferos en cuestión.

- Instalación de domos.
    - Permitiría cuantificar la evaporación y/o evapotranspiración que se produce en las cuencas altiplánicas.
    - La prioridad corresponde a las cuencas altiplánicas de Surire, Chungara, Uchusuma y Caquena, y Lauca.
    - Las ubicaciones recomendables corresponden a las zonas donde se ubican las lagunas y bofedales.

- Realización de prospección geofísica.
    - La prospección geofísica permitiría conocer el nivel piezométrico y la geometría de los acuíferos. De este modo, con mayor precisión se podrían dimensionar los acuíferos y cuantificar el flujo pasante que existe en los acuíferos ubicados en las cuencas de los ríos Uchusuma y Caquena, Lauca y de las zonas altas del Lluta, Chaca-Vítor y Camarones.
    - Se recomienda realizar TEM y NanoTEM en profundidades de exploración entre 50 m y 400 m para caracterizar la estratigrafía, niveles piezométricos y basamento (en caso de que se alcance), y gravimetría para identificar la ubicación del basamento.

- Construcción de pozos de bombeo, desarrollo de pruebas de bombeo y piezómetros.
    - Existe un alto grado de incertidumbre en los valores de los parámetros hidráulicos de las unidades hidrogeológicas en las zonas altas de las cuencas que drenan al Pacífico y de las cuencas altiplánicas por lo que sería necesario construir pozos y realizar pruebas de bombeo. Además, sería recomendable perforar piezómetros entorno al pozo de bombeo para poder obtener los coeficientes de almacenamiento y para analizar las variaciones del nivel piezométrico durante las pruebas de gasto variable y de gasto constante y pruebas de recuperación de nivel para obtener rangos acotados de conductividad hidráulica y coeficiente de almacenamiento del acuífero.

- Se propone esta actividad en las unidades con alta importancia hidrogeológica de las cuencas de los ríos Uchusuma y Caquena, Lauca y de las zonas altas del Lluta, San José, Chaca-Vítor y Camarones.
- Se recomienda perforar un pozo de bombeo y un pozo de observación en las dos unidades de importancia hidrogeológicas de estas zonas, es decir, en la unidad sedimentaria y en la roca fracturada.
- Se recomienda realizar una prueba de gasto variable, una de gasto constante y una recuperación con una duración de al menos 1,5 veces el tiempo de bombeo.

- Construcción de pozos de exploración con testigo continuo.
  - El objetivo de la perforación de un pozo de exploración de testigo continuo es definir la estratigrafía, litología y calibrar la información obtenida en la prospección geofísica. De este modo se podrá caracterizar con mayor precisión las unidades acuíferas de las zonas altas en las que no existen antecedentes y definir con mayor exactitud la disponibilidad de recursos subterráneo.
  - Se propone esta actividad en las unidades con alta importancia hidrogeológica de las cuencas de los ríos Uchusuma y Caquena, Lauca y en las zonas altas del Lluta, San José, Chaca-Vítor y Camarones.
  - Una vez que se saquen los testigos, éstos deben ser descritos por un geólogo con un formato de logeo geológico-hidrogeológico.
  - Se recomienda guardar los testigos en cajas de madera o cartón en bodegas de la DGA, de manera que sirvan para nuevos estudios.

- Catastrar captaciones.
  - La DGA realiza el registro de niveles piezométricos en una red de pozos, para ello sería necesario tomar las coordenadas exacta e indicar el sistema de referencia en el que se toma.
  - Estas se debieran priorizar en los dos acuíferos más importants de la región, es decir, en el Valle de Lluta y Azapa. En los pozos en que se registran los niveles de los acuíferos superficial y profundo.

- Campaña de monitoreo de niveles.
    - En los valles que se explotan los recursos subterráneos sería necesario efectuar la medición del nivel piezométrico para elaborar una piezometría detallada donde se definan los conos de recarga y de descarga del nivel asociado a las zonas de infiltración de riego y de extracción respectivamente. Por otro lado, permitiría definir los tramos de río afluente o efluente según la relación con el acuífero del valle del río Lluta y de Azapa.
    - Las campañas de las mediciones se deberían realizar cada 5 años. Sin embargo, se debería contar con una red de monitoreo de registro continuo, cuyos pozos deberían contar con transductores de nivel y transmisión del dato vía GPRS (celular) a un punto de captura de la DGA.
    - Se recomienda implementar esta red de monitoreo en pozos de propiedad de la DGA, de manera de evitar la vulnerabilidad.
    - Este monitoreo de registro continuo permitirá alimentar los Planes de Alerta Temprana de los acuíferos en cuestión.

Se recomienda preliminarmente, una vez ejecutados los trabajos de terreno anteriores o contar con suficiente información, realizar los siguientes estudios a modo preliminar:

- Determinación periódica de la demanda por percepción remota
- Determinación de la evapotranspiración en cada uno de los ecopisos de la región
- Continuación del monitoreo, mediante la implementación de estaciones meteorológicas y fluviométricas
- Análisis de los mecanismos de evaporación en cada uno de los ecopisos de la región
- Definición de los parámetros hidráulicos locales (zona norte) para aplicar algún método de precipitación escorrentía de eventos máximos en cuencas de la región. Aplicación a una cuenca con drenaje hacia el océano Pacífico y a una altiplánica.

- Análisis del cambio climático en la región y cómo se manifiesta
- Análisis de los ciclos de sequía en la región
- Caracterización hidrogeológica en detalle de algunos acuíferos identificados pero no cuantificados, como los de Uchusuma, Caquena, Azapa Alto, Chaca-Vítor Alto y Camarones Alto.
- Estudios de tratamiento de aguas para el mejoramiento de los recursos de agua aplicables a cada una de las fuentes, específicamente a los ríos Azufre, Colpitas y Caritaya para uso agrícola o minero.
- Análisis del transporte de solutos de las fuentes de contaminación
- Modelación numérica de flujo de los acuíferos de Lluta y Azapa como instrumentos de gestión.

El objetivo de la siguiente parte del estudio ha sido revisar la información existente, caracterizar la demanda y la oferta, para poder conocer los balances preliminares y las brechas de información hídrica de la región, cuyas conclusiones y recomendaciones lo han planteado. Sin embargo, la segunda parte definirá las brechas y líneas de acción, así como el catastro de infraestructura hídrica existente y de los estudios y proyectos programados para la gestión de los recursos hídricos de la región. No obstante, a modo preliminar, se recomiendan diferentes alternativas para solucionar la actual situación del recurso hídrico en la Región, por ejemplo:

- Embalse de Livilcar: se ubicaría en la parte alta del valle de Azapa esta obra de regulación de los recursos hídricos del río San José, el que aseguraría un volumen permanente de agua en el valle de Azapa. Estas aguas embalsarían las precipitaciones que se producen en el sector alto de la cuenca y las aguas desviadas del río Lauca. Sin embargo, estas aguas presentan una mala calidad por el alto contenido de hierro, arsénico, manganeso, entre otros. De todos modos se evaluará si es viable tratar estas aguas antes de distribuirlas para el riego o consumo humano. Además, para el llenado del embalse es necesario contar con el interés de las comunidades de agua de Azapa.
- Desviar el río Azufre: el río Azufre nace de la vertiente hidrotermal Aguas Calientes, la cual es una fuente de aguas ácidas (pH 2) y presenta un alto contenido de metales y compuestos inorgánicos como aluminio, arsénico, boro, bromuro, cadmio, cloruros, fluoruros, fosfatos, hierro, manganeso, mercurio, nitratos, plomo, sulfatos, sílice y zinc, entre otros. Para solucionar la

problemática de la calidad de las aguas, en la década de los años 60 se desvió aproximadamente un cuarto del caudal del río Azufre mediante un canal hacia "pretiles" o estanques de evaporación, según la estimación de INGENDESA (1993). En esta solución se recomienda tratar las aguas y disponer nuevamente en el cauce.

- Desviar el río Colpitas: el río Colpitas es la segunda fuente de contaminación natural que aporta aguas básicas al río Lluta, el que cuenta con un alto contenido en arsénico, hierro, litio, boro, entre otros, y el que se podría evaluar desviarlo para evitar la contaminación del río Lluta. En esta solución se recomienda tratar las aguas y disponer nuevamente en el cauce.
- Recarga artificial de acuíferos: el acuífero del valle de Azapa presenta problemas de sobreexplotación por lo que una alternativa podría ser la recarga artificial del acuífero. Esta recarga se podría lograr mediante lagunas de infiltración con el caudal disponible durante las crecidas del río San José o mediante la inyección de las aguas residuales de Arica a través de pozos aplicándoles previamente un tratamiento adecuado para mejorar la calidad de las aguas.
- Instalación de barreras de goma: permitiría retener parcialmente el agua de las crecidas del río San José y así generar lagunas artificiales que favorezcan la infiltración
- Tratamiento de las aguas para descontaminar los recursos hídricos: las aguas de la región suelen presentar algún tipo de contaminación natural o antrópica, principalmente el río Lluta y su acuífero y el acuífero del valle de Azapa. Se deberían evaluar que tecnologías existen hoy en día que permita eliminar elementos contaminantes de las aguas, estimar a que costo, y que uso se daría a esta agua descontaminada, entre otros.
- Descontaminar las aguas del embalse de Caritaya: las fuentes hidrotermales existentes en las lagunas de Amuyo aportan al río Caritaya un elevado nivel de arsénico, boro y sales disueltas. Según los antecedentes existentes en la cuenca, estas aguas condicionan y empobrece la calidad de las aguas del río Camarones.
- Descontaminación del río Colpitas: el río Colpitas constituye la segunda mayor fuente de contaminantes naturales de la cuenca del río Lluta debido a la existencia de una boratera que está afectada por una fuente hidrotermal. Las aguas de las borateras provenientes desde la fuente hidrotermal están

compuestas por productos de disolución de los minerales propios de las borateras. Boro, calcio y sodio corresponden a la ulexita mientras que el resto de sodio y cloruro pertenecen a la halita. Por último, el arsénico, hierro, litio, zinc disuelto proceden de las aguas termales.

- Descontaminación del río Azufre. La fuente hidrotermal Aguas Calientes es la mayor fuente natural de contaminante que se ubica en la cuenca del río Lluta. Estas aguas afectan y condicionan la calidad de las aguas del río Lluta.
- Tratamiento de las aguas residuales de la ciudad de Arica y de algunos pueblos. Las aguas residuales de la ciudad de Arica se descargan al mar, pudiendo realizarse un tratamiento secundario y regar cultivos en los valles de Azapa y Lluta.
- Transvase de agua desde la cuenca de los ríos Uchusuma y Caquena a la cuenca del río Lluta: la alternativa de desviar el río Caquena fue propuesta por Niemeyer en el año 1968, ya que su composición hidroquímica es de mejor calidad que las aguas del río Lluta. Posteriormente, INGENDESA (1993), a partir del registro del monitoreo químico realizado desde 1956 hasta 1989 en 16 puntos de muestreo, modela el desplazamiento de la concentración de sulfatos, cloruros, arsénico, conductividad eléctrica, boro, entre otros, presentes en las aguas del río Lluta desde su cabecera hasta la estación de cierre en Tocontasi. En éste se presenta la simulación del contenido de cloruros en 4 casos: (1) acción nula o situación actual, simulación con los valores históricos, (2) desviar el río Azufre totalmente, (3) desviar hacia el río Lluta el río Caquena parcialmente, un caudal máximo de 1,07 m^3/s, (4) las dos acciones anteriores. Los resultados se resumen en la siguiente tabla.
- Aumentar el caudal de transvase de agua del río Lauca a la cuenca del río San José. Actualmente el río Lauca se desvía en su nacimiento mediante el canal Lauca hacia la central hidroeléctrica de Chapiquiña y luego alimenta al río San José. Se debiera analizar y evaluar si es viable la alternativa de aumentar el volumen transferido de una cuenca a otra.
- Trasvase de agua cuenca del río Lluta al valle de Azapa: la alternativa de trasvase de agua desde la cuenca del valle de Lluta a la cuenca del valle de Azapa, proporciona recursos adicionales, pero su calidad no es apta para el consumo humano, contaminando aún más las aguas de la cuenca del valle de Azapa. Sin embargo, igualmente se debiera evaluar esta alternativa de cara a conocer sus beneficios y efectos.

- Explotación de los pozos en la cuenca de la quebrada La Concordia: el Estado mediante Decreto Nº 1026 del 24/10/1969, reservó un caudal de 200 L/s destinado a uso potable de la ciudad de Arica, a partir del rendimiento de los pozos de La Concordia durante su perforación y construcción. Sin embargo, esto nunca se pudo realizar y estos pozos se encuentran actualmente en manos del Estado y se hace uso para abastecimiento del aeropuerto y para algunas Concesiones de Uso Agrícola.
- Plantas desaladoras: actualmente existe un proyecto de instalar una planta desaladora en la región, sin embargo se podría evaluar la posibilidad de instalar una planta desaladora más en otro sector. Se estudiaría que tipo de tecnología de membrana (la ósmosis inversa, la nanofiltración y la electrodiálisis) sería la más adecuada desde el punto de vista técnico y económico. La tecnología de desalación más empleada actualmente es por medio de membranas, y en concreto mediante ósmosis inversa (OI). La ósmosis inversa consiste en aplicar una presión superior a la presión osmótica correspondiente, en el lado de la solución más concentrada, consiguiendo que la dirección del flujo del agua vaya del lado de la solución más concentrada a la solución más diluida.

  En esta alternativa se deberá evaluar y estudiar la ubicación de la planta, protección de la zona costera/protección marina con respecto al retiro y descarga de agua, contaminación del aire debido a la producción y el consumo energético, lixiviados y desecho de lodos, sistema de distribución, costos, beneficios, beneficiarios, usos del agua, estudio de la demanda actual, entre otro muchos.
- Mejoramiento en las infraestructuras existentes: Efectuar un mejoramiento en las condiciones de los canales existentes para disminuir las pérdidas por infiltración de estos, específicamente en la red de canales de la cuenca del río Lluta y Chaca-Vítor.
- Explotación de nuevos acuíferos: se debe realizar un estudio detallado de los antecedentes con el fin de identificar acuíferos que tengan un alto coeficiente de almacenamiento y buena calidad de las aguas, este es el caso de los acuíferos de Uchusuma y Caquena, Lauca y Camarones Alto.

12. **Referencias**

AC ING. (2009). Definición de estrategias de manejo sustentable para el acuífero de Azapa, XV Región. Resumen ejecutivo. S.I.T. N°201.

AC ING. y AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS LTDA. (1997). Monitoreo de las cuencas de los valles de Azapa y Lluta. Arica-I región

AC ING. y AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (1998). Plan director para la gestión de los recursos hídricos enq la cuenca del río San José.

AC ING. y AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (2002). Estudios básicos de los recursos hídricos valles Lluta, Azapa, Vítor y Camarones, primera región.

AC ING. y AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (2006). Análisis y determinación de caudales de reserva para abastecimiento de la población y usos de interés nacional. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Santiago, Chile. S.I.T. N°116.

AC ING. y AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (2007). Levantamiento de derechos de agua afectos al pago de patente etapa III: Regiones I, II y III S.I.T. N°128.

AGUILERA, F. (2008). Origen y naturaleza de los fluidos en los sistemas volcánicos, geotermales y termales de baja entalpía de la zona volcánica central.

AGROLEY CONSULTORES (2015). Saneamiento y Regularización de Derechos de Agua en Arica y Parinacota. Comisión Nacional de Riego.

AHUMADA, M, FAUNDEZ, L. (2009). Guía descriptiva de los sistemas vegetacionales azonales hídricos terrestres de la ecorregión altiplánica.

ALBERS, C. (2012) Coberturas SIG para la enseñanza de la Geografía en Chile. www.rulamahue.cl/mapoteca. Universidad de La Frontera. Temuco.

ALEVY, J.E., CRISTI, O., MELO, O. (2012). Right-to-Choose Auctions: A Field Study of Water Markets in the Limari Valley of Chile, Agric. Resour. Econ. Rev. 39.

AMBAR, ALAMOS Y PERALTA (2000). Análisis hidrogeológico de la explotación del acuífero y efecto en los bofedales del altiplano ariqueño.

AMEC (2014). Estudio caracterización hidrogeológica de la cuenca del río Colpitas, XV Región.

ANDRADE GUTIERREZ – LUSAC (1999). Estudio reúso agrícola de las aguas servidas de Arica. Prefactibilidad.

APAZA, V. (2004). Estudo de aqüíferos volcano-sedimentares na sub-bacia hidrográfica do rio Uchusuma (zona de frontera Peru, Bolívia e Chile).

AQUACONSULT (2010). Informe 1: Caracterización hidrogeológica área proyecto Los Pumas

AQUATERRA (2011) Estimación de recargas en cuencas altiplánicas y precordilleranas de vertiente Pacífica.

ARANEDA *et al.* (1997). Estructura del basamento subterráneo en la ciudad de Arica.

ARAVENA *et al.* (1999). Isotopic composition and origin of the precipitation in Northern Chile.

ARRAU INGENIERIA (2013). Estudio básico diagnóstico de obras hidráulicas y fluviales quebrada de Camarones, región de Arica y Parinacota.

ARA y AMBAR (1996). Consultoría análisis ambiental del proyecto de explotación de pozos en parque nacional Lauca, I Región

AUTORIDAD NACIONAL DEL AGUA (2012). Atlas de recursos hídricos del Perú.

AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (1989). Modelo de simulación de las aguas subterráneas del valle de Azapa. Estudios básicos modelo de simulación. Anexos.

AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (1994a). Análisis redes de vigilancia calidad aguas terrestres estadística hidroquímica nacional. Etapa I.

AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (1994b). Minuta hidrogeológica pozos parque nacional Lauca sector río Lauca.

AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (1996). Estudio de aguas subterráneas sector río Lauca, I Región. Etapa I.

AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (1998a). Estudio prueba de larga duración valle del río Lluta, Arica, I Región.

AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (1998b). Estudio hidrogeológico quebrada de Escritos.

AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (1998c). Estudio hidrogeológico y modelo de simulación valle del río Lluta Arica, I Región.

AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (2001). Actualización de recursos hídricos para restablecimiento de derechos ancestrales indígenas I y II Regiones. Informe Final. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Santiago, Chile. S.I.T. N°73.

AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS (2007). Estimaciones de Demanda de Agua y Proyecciones Futuras. Zona I Norte. Regiones I a IV.

AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS y AC ING. (1995). Monitoreo cuenca valle de Azapa-Arica

AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS y AC ING. (2003). Diagnóstico del Riego y Drenaje en la Primera Región. Comisión Nacional de Riego.

BALIC, I. (2015). Modelación numérica de los efectos de la variabilidad climática sobre la utilización sustentable del acuífero de la cuenca del río San José, Arica.

BANCO CENTRAL (2016). Serie histórica de valores de Unidad de Fomento UF (http://si3.bcentral.cl/Indicadoressiete/secure/Serie.aspx?gcode=UF&param=RABmAFYAWQB3AGYAaQBuAEkALQAzADUAbgBNAGgAaAAkADUAVwBQAC4AbQBYADAARwBOAGUAYwBjACMAQQBaAHAARgBhAGcAUABTAGUAYwBsAEMAMQA0AE0AawBLAF8AdQBDACQASABzAG0AXwA2AHQAawBvAFcAZwBKAEwAegBzAF8AbgBMAHIAYgBDAC4ARQA3AFUAVwB4AFIAWQBhAEEAOABkAHkAZwAxAEEARAA=).

BENÍTEZ, A. (1974). Estudio hidrometeorológico de las cuencas del río Lauca y lago Chungara.

BF INGENIEROS CIVILES (1989). Investigación de eventos hidrometeorológicos extremos. Precipitaciones máximas en 24, 48 y 72 horas.

BF INGENIEROS CIVILES (1991a). Diagnóstico de pérdidas en canales de riego Lauca-Azapa.

BF INGENIEROS CIVILES (1991b). Actualización de la estadística meteorológica. Temperaturas diarias.

BF INGENIEROS CIVILES (1995). Estudio de factibilidad de un embalse y sistema de recarga de la napa en el Río San José.

BJORNLUND, H., ROSSINI, P. (2010). Climate Change, Water Scarcity and Water Markets-Implications for Farmer's Wealth and Farm Succession.

BOLETÍN 9538-09 (2014). Modifica Código de Aguas, para regular la concesión temporal de aprovechamiento de aguas, en trámitación.

CADE-IDEPE (2004). Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad, cuenca del río Lluta.

CAPTAGUA (1996). Construcción sondaje 6-A Costero Urbano.

CASTRO *et al.* (1993). Identificación y ubicación de áreas de vegas y bofedales de las regiones primera y segunda.

CEA (1999). Planta de lavado de Ulexita en el salar de Surire I Región.

CHARRIER *et al.* (2012). Cenozoic tectonic evolution in the Central Andes in northern Chile and west central Bolivia: implications for paleogeographic, magmatic and mountain building evolution. International Journal of Earth Science DOI 10.1007/s00531-012-0801-4.

CIREN (2013). Caracterización de humedales altoandinos para una gestión sustentable de las actividades productivas del sector norte del país.

CLAVERO, J. *et al.* (2012). Geología del volcán Parinacota, Región de Arica y Parinacota.

CON POTENCIAL (2016). Estudio diagnóstico de disponibilidad hídrica, cuenca del río Camarones.

CONADI (2009). Seminario: "Defensa de los derechos ancestrales sobre las aguas de las personas y comunidades indígenas".

CONIC-BF (1996). Análisis Operacional del Sistema Lauca-Azapa, I Región.

CONIC-BF (2000). Construcción barreras de goma río San José.

CONTRERAS, C. (2005). Régimen legal de las aguas del valle de Lluta.

CUSICANQUI, H. (1979). Estudio geoquímico del área termal de Surire, Provincia de Arica I Región.

CUSTODIO, E. y LLAMAS, M.R. (2001). Hidrología subterránea. 2ª Edición. Tomo I y II.

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS AMBIENTALES Y RECURSOS NATURALES RENOVABLES (2009). Gestión integrada de los recursos hídricos en Chile.DGA (1986). Mapa Hidrogeológico de Chile. Escala 1:2.500.000. Texto Explicativo. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Departamento de Hidrología, Subdepartamento de Estudios Hidrológicos, Santiago, Chile, Realizado por: Ingeniería y Planificación IPLA Ltda.

DGA (1987). Balance Hídrico de Chile. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Departamento de Hidrología, Subdepartamento de Estudios Hidrológicos, Santiago, Chile. Realizado por: Dirección General de Aguas.

DGA (1989). Mapa Hidrogeológico. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Departamento de Hidrología. Realizado por: Dirección General de Aguas.

DGA (1992). Situación de Recursos Hídricos I Región. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Departamento de Hidrología. Realizado por: Servicio Agricola y Ganadero, Dirección de Riego, Dirección General de Aguas.

DGA (1997) Estadísticas de caudales, estaciones fluviométricas. Hoya Lluta, Caquena, San José, Laguna Chunqará-Lauca, Quebrada Vítor. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Departamento de Hidrología. Realizado por: Dirección General de Aguas.

DGA (2003). Actualización delimitación de Acuíferos que alimentan vegas y bofedales, cuenca del río Caquena. Región de Tarapacá. S.D.T. nº162. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Departamento de Estudios y Planificación. Realizado por: Departamentos de Estudios y Planificación.

DGA (2010). Plan de acción estratégico para el desarrollo hídrico de la región de Arica y Parinacota. S.D.T. nº 306. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación. Santiago, Chile. Realizado por: División de Estudios y Planificación.

DGA (2011a). Evaluación de los recursos hídricos subterráneos en el sector acuífero de La Concordia. S.D.T. Nº 314. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Departamento de Administración de Recursos Hídricos. Santiago, Chile. Realizado por: Departamento de Administración de Recursos Hídricos. Santiago.

DGA (2011b). Evaluación de recursos incrementales aportados al valle de Azapa derivados de aguas subterráneas del acuífero del río Lauca S.D.T. 3015. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile. Realizado por: División de Estudios y Planificación

DGAS (2002). Evaluación y ordenamiento de los recursos hídricos en cuencas ríos Caplina y Uchusuma. Estudio Hidrológico.

DHV, INFOR, ICSA Y BF INGENIEROS CIVILES (1995). Estudio de factibilidad programa manejo de cuencas hidrográficas, cuenca río San José.

DÍAZ, G. *et al.* (1972). Recurso de agua y su aprovechamiento en el valle de Azapa. Anexos.

DICTUC (2008a). Evaluación preliminar de alternativas de mitigación de contaminantes en el río Lluta a partir de una caracterización de las fuentes de contaminación.

DICTUC (2008b). Propuesta de calidad objetivo y análisis general de impacto económico y social-cuenca río Lluta.

DICTUC (2009a). Estudio de calidad de aguas cuenca del río Lluta.

DICTUC. (2009b). Levantamiento hidrogeológico para el desarrollo de nuevas fuentes de agua en áreas prioritarias de la zona norte de Chile, regiones XV, I, II Y III.

DIRECCIÓN DE RIEGO (1996). Pruebas de bombeo pozos río Lauca, I Región.

DONOSO, G. (2006). Water markets: case study of Chile's 1981 Water Code, Ciencia e investigación agraria: revista latinoamericana de ciencias de la agricultura 33, 157-171.

EASTER, K.W., ROSEGRANT, M.W., DINAR, A. (1999). Formal and Informal Markets for Water: Institutions, Performance, and Constraints, The World Bank Research Observer 14, 99-116.

ENAP (1989). Geología altiplano de Arica.

ESSAT (1998). Declaración de impacto ambiental, proyecto aguas de descarte en el curso bajo del río Lluta.

ESSAT − UNAP (2001). Programa de Monitoreo Ambiental. Proyecto Ambiental de la Producción de Agua en Arica. Segundo Semestre.

FAO (2010). Gestión del riesgo de sequía y otros eventos climáticos extremos en Chile, http://www.fao.org/alc/file/media/pubs/2011/sequia_combarbala.pdf.

GARCÍA G. *et al.* (2004). Hoja Arica − Región de Tarapacá. Carta Geológica 1:250.000.

GARCÍA G y FUENTES E. (2012) Carta Cuya. Carta Geológica 1:100.000.

GARCÍA G *et al*. (2012) Cartas Visviri y Villa Industrial. Carta Geológica 1:100.000.

GARCÍA G *et al*. (2013) Carta Miñimiñi. Carta Geológica 1:100.000.

GARRICK, D., WHITTEN, S.M., COGGAN, A. (2013). Understanding the evolution and performance of water markets and allocation policy: A transaction costs analysis framework, Ecol. Econ. 88, 195-205.

GARRIDO, A. (2007). Water markets design and evidence from experimental economics, Environmental and Resource Economics 38, 311-330. doi: 10.1007/s10640-006-9077-0.

GCF INGENIEROS (2010). Metodología para la estimación de recarga de cuencas altiplánicas y precordilleranas de vertiente pacífica en el norte de Chile, XV, I II y III regiones.

GEOHIDROLOGÍA (2014). Diagnóstico de la subcuenca aportante al embalse Caritaya.

GIAVELLI I. A, (1989). Gravimetría, prospecto Altiplano de Arica.

GIL, M., GARRIDO, A., GÓMEZ-RAMOS, A. (2011). Economic analysis of drought risk: An application for irrigated agriculture in Spain, Agric. Water Manage. 98, 823-833.

GORE ARICA Y PARINACOTA (2009). Estrategia regional de desarrollo, Región de Arica y Parinacota.

GRILLI, A. (1986). Evaluación de la evaporación desde salares, utilizando trazadores naturales ambientales.

GRILLI, A. (1989). Recursos Hídricos en las Provincias de Arica y Parinacota.

GRILLI, A. y VIDAL, F. (1986). Evaporación desde salares: Metodología para evaluar los recursos hídricos renovables. Aplicación a las regiones I y II. Revista de la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica, Vol. 1, Año 1, No 2.

HADJIGEORGALIS, E., LILLYWHITE, J. (2004). The impact of institutional constraints on the Limarí River Valley water market, Water Resour. Res. 40, W055011-W0550111.

HADJIGEORGALIS, E. (2008). Distributional impacts of water markets on small farmers: Is there a safety net? Water Resourses. Res. 44.

HADJIGEORGALIS, E. (2009). A place for water markets: performance and challenges, Applied Economic Perspectives and Policy 31, 50-67.

HAUSER, A. (1997). Catastro y caracterización de las fuentes de aguas minerales y termales de Chile.

HEARNE, R., DONOSO, G. (2005). Water institutional reforms in Chile, Water Policy 7, 53–69.

HENRIQUEZ *et al.* (1976). Reconocimiento hidrogeológico del extremo norte de la provincia de Arica.

HERRERA, C *et al.* (2006). Relación de aguas superficiales y subterráneas en el área del lago Chungara y lagunas de Cotacotani, norte de Chile: un estudio isotópico.

HIDALGO, M. (2012). Evaluación de la eficiencia de riego por surcos en el cultivo del maíz (Zea mays L.) y su relación con la salinidad de los suelos en el valle de Lluta.

HOUSTON, J.E.,JR., WHITTLESEY, N.K. (1986). Modeling Agricultural Water Markets for Hydropower Production in the Pacific Northwest, Western Journal of Agricultural Economics 11, 221-231.

INDERCO (1980). Estudio de la red de drenaje del valle del río Lluta.

INERCO (2015). Declaración impacto ambiental proyecto fotovoltaico Los Manolos. Anexo 6: Caracterización del medio físico

INGENDESA (1993). Análisis de descontaminación y embalse en río Lluta. Volumen 3/4.

INGENDESA (2004). Estudio de Factibilidad de Embalses para los Valles de Lluta y Azapa.

INGESA (2006). Barrio industrial Chacalluta Zofri S.A. Evaluación de la vulnerabilidad del acuífero.

INH (2013). Mejoramiento sistema de gestión y control río Lluta. Resumen ejecutivo. Proyecto 11BPC-10034

INH (2014a). Caracterización de la cuenca del río San José para la implementación de un programa de recarga artificial de acuíferos.

INH (2014b) Caracterización de la Cuenca del río San José para la implementación de Programa de Recarga Artificial de Acuíferos. Proyecto Innova Corfo cód. 12BPC2-13504.

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICAS (INE) (2015). Serie histórica del IPC base 2008(http://www.ine.cl/canales/chile_estadistico/estadisticas_precios/ipc/1928_2005/series_anteriores.php).

INYGE (1991). Estudio análisis de los recursos de agua de la primera región de Tarapacá.

IPLA (1996). Análisis uso actual y futuro de los recursos hídricos de Chile.

IPLA Ingenieros Consultores (1986). Estudio del Mapa Hidrogeológico Nacional. Escalas 1:1.000.000 y 1:2.500.000. Ministerio de Obras Públicas. Dirección General de Aguas.

ITURRA, N. (2016) Hidrogeología del Sistema Hídrico Parinacota-Cotacotani, Altiplano de la XV Región de Arica y Parinacota (2016). Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geología.

JICA, PACIFIC CONSULTANTS INTERNATIONAL, TOKIO (1995). El estudio sobre el desarrollo de los recursos de agua en la parte norte de Chile.

JIMENEZ, G. (2013). Caracterización de la cuenca del río San José en Arica para la evaluación a nivel de perfil de un sistema de recarga artificial de acuíferos.

KARZULOVIC, J. (1981). Estudio geotécnico e hidrogeológico cuencas altiplánica laguna Chungara – laguna Cotacotani – río Lauca superior.

LÓPEZ *et al.* (2006). Hidroquímica del salar de Surire, Chile.

LOUCKS Y VAN BEEK (2005). Water resources systems planning and management

LUIS ARRAU (1997). Modelo de simulación hidrológico operacional Cuenca del Río San José.

LUIS ARRAU (2003). Plan maestro de aguas lluvias de Arica. Manejo de los cauces de los ríos Lluta y San José y sus desembocaduras.

LUO, B., MAQSOOD, I., YIN, Y., HUANG, G., COHEN, S. (2003). Adaption to Climate Change through Water Trading under Uncertainty- An Inexact Two-Stage Nonlinear Programming Approach, Journal of Environmental Informatics 2, 58-68.

MATRAZ (2015). Diagnóstico de disponibilidad hídrica en la cuenca del río Lauca, región de Arica y Parinacota.

MAYCO (2013). Balance hídrico en sectores acuíferos de mediana criticidad (Quebrada Chaca-Vítor).

MCCANN, L., EASTER, K.W. (2004). A framework for estimating the transaction costs of alternative mechanisms for water exchange and allocation, Water Resour. Res. 40.

MN INGENIEROS (2011). Diseño embalse Livilcar. Región de Arica y Parinacota.

MOP (2000). Instalación sistema de agua potable rural de Coronel Alcérreca.

MOP (2010). Región de Arica y Parinacota 2020. Obras públicas para el desarrollo.

MOP (2014). Taller internacional: Nuevas tendencias en sistemas legales para la gestión de recursos hídricos. 12 de noviembre, Ministerio de Obras Públicas, Santiago, Chile.

NIEMEYER, H. (1964). Ampliación de los recursos del río Lauca.

NIEMEYER, H. (1968). Valle del río Lluta.

PEÑA, F. (2009). Hidrogeología de la cuenca del río Caplina, Región Tacna.

PEÑA, SALAZAR, POLLASTRI (1995). Estudio del origen y procesos de salinización de las aguas subterráneas en el valle de Azapa. I región. Chile

PEREZ, F. (1990).Operación del Modelo de Simulación de Recursos Hídricos del Valle de Azapa. Análisis de Situaciones Hidrológicas Extremas y su impacto en los

Recursos Subterráneos. Ministerio de Obras Públicas. Dirección General de Aguas.

PULLEN, J.L., COLBY, B.G. (2008). Influence of Climate Variability on the Market Price of Water in the Gila-San Francisco Basin, J. Agric. Resour. Econ. 33, 473-487.

QUIBORAX (2009). Programa de seguimiento ambiental extracción de ulexita en el salar de Surire.

QUINTANA, E. (1989). Red nacional mínima de control de lagos primera región. Estudio de los lagos Chungara y Cotacotani.

REG (1991). Estudio de síntesis de catastros de usuarios de aguas e infraestructuras de aprovechamiento.

REG (1999). Diagnóstico situación actual de las organizaciones de usuarios de aguas a nivel nacional.

REG y KARZULOVIC, J. (1981). Plan maestro de acción inmediata para el sistema de riego del Valle de Azapa. Región de Tarapacá. Instancia Final.

RISACHER, F. *et al.* (1999). Geoquímica de aguas en cuencas cerradas I, II y III Regiones.

ROSEGRANT, M.W., GAZMURI, R. (1995). Reforming Water Allocation Policy Through Markets in Tradable Water Rights: Lessons from Chile, Mexico and California, Cuadernos de economía: Latin American Journal of Economics , 33-58.

ROSEGRANT, M.W., RINGLER, C., MCKINNEY, D.C., CAI, X., KELLER, A., DONOSO, G. (2000). Integrated economic-hydrologic water modeling at the basin scale: the Maipo river basin, Agricultural Economics 24, 33-46.

SALAS, R. (1975). Estudio geológico salar de Surire, Chile provincia de Arica, Chile.

SALAZAR *ET AL.* (2000). Análisis de requerimiento hídricos de vegas y bofedales en el norte de Chile.

SALETH, R.M., BRADEN, J.B., J. WAYLAND EHEART (1991). Bargaining Rules for a Thin Spot Water Market, Land Econ. 67, 326-339.

SGA (2011). Estudio impacto ambiental manganeso Los Pumas. Capítulo 2, línea base.

SMI (2008). Diagnóstico y diseño definitivo reparación embalse Caritaya provincia de Arica, I Región, contrato ES-REC-01

SUBDERE (2010). Planta desaladora de Arica

SUBDERE (2013). Guía, análisis y zonificación de cuencas hidrográficas para el ordenamiento territorial.

THOBANI, M. (1997). Formal Water Markets: Why, When, and How to Introduce Tradable Water Rights, The World Bank Research Observer 12, 161-179.

TORRES, A., ACEVEDO, E. (2008). El problema de salinidad en los recursos suelo y agua que afectan el riego y cultivos en los valles de Lluta y Azapa en el norte de Chile

TRIVELLI, M. y VALDIVIA, V. (2009). Alcances sobre flora y vegetación de la cordillera de los Andes.

UTA-DGA (2010a). Apoyo técnico para la mesa regional del agua en la región de Arica y Parinacota, y desarrollo de estrategias regionales del recurso hídrico.

UTA-DGA (2010b). Cuenca de Camarones: identificación y caracterización de fuentes que condicionan la calidad de las aguas superficiales: rol del tranque Caritaya.

VECTOR CHILE (2005). Estudio de impacto ambiental proyecto Chantacollo.

VERRUIJT A. (1968). A note on the Ghyben-Herzberg formula. Boletín International Association of Scientific Hydrology, XIII, 4-12/1968.