GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS
DIVISIÓN DE ESTUDIOS Y PLANIFICACIÓN

CARACTERIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA DE LA CUENCA DEL LOA ALTO, REGIÓN DE ANTOFAGASTA, CHILE

INFORME FINAL

REALIZADO POR:

MATRAZ CONSULTORES ASOCIADOS LIMITADA

S.I.T. N° 335

Santiago, Marzo 2014

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS

Ministro de Obras Públicas
Ingeniero Comercial Sr. Alberto Undurraga Vicuña

Director General de Aguas
Abogado Sr. Carlos Estévez Valencia

Jefe de División de Estudios y Planificación
Ingeniero Civil Sr. Adrián Lillo Zenteno

Inspector Fiscal
Ingeniero Civil Sr. Juan Carlos Salgado Gonzalez

MATRAZ CONSULTORES

Jefe de Proyecto
Mcs. Hidrogeólogo Nicolás Iturra Jáuregui

Equipo de Profesionales:
Especialista Hidrogeoquímica Emilio Custodio Gimena
Especialista SIG Lorena Navarro López
Apoyo de Terreno Narcís Martí Antón
Hidrogeóloga Junior Sonia Valdivielso Mijangos
Hidrogeólogo Junior Christian Montoro Paredes

ÍNDICE

ÍNDICE _____ **1**

ÍNDICE DE FIGURAS _____ **5**

ÍNDICE DE TABLAS _____ **15**

1 INTRODUCCIÓN _____ **23**

1.1 OBJETIVOS 24
1.2 LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA Y RELACIÓN ENTRE CUENCAS Y SUBCUENCAS 25
1.3 ALCANCE DEL ESTUDIO Y ACTIVIDADES. 28
1.4 METODOLOGÍA 29
1.4.1 RECOPILACIÓN Y ANÁLISIS DE ANTECEDENTES 29
1.4.2 CAMPAÑAS DE TERRENO 30
1.4.3 CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA 31
1.4.4 CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA 31
1.4.5 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA 32
1.4.6 CARACTERIZACIÓN HIDROQUÍMICA E ISOTÓPICA 32
1.4.7 MODELO CONCEPTUAL DEL ACUÍFERO 33
1.4.8 CONCLUSIONES 34

2 RECOPILACIÓN Y ANÁLISIS DE ANTECEDENTES _____ **35**

2.1 GEOLOGÍA 38
2.2 HIDROLOGÍA 50
2.3 HIDROGEOLOGÍA 53
2.4 HIDROQUÍMICA 67
2.5 BALANCE HÍDRICO 79

3 CAMPAÑAS DE TERRENO _____ **87**

3.1 DISEÑO Y PLANIFICACIÓN 87
3.1.1 ELECCIÓN DE PUNTOS 87
3.1.2 PROTOCOLO DE MUESTREO 88
3.1.3 LABORATORIOS 91
3.2 CAMPAÑA DE TERRENO OCTUBRE 2013 92
3.3 CAMPAÑA DE TERRENO DICIEMBRE 2013 98

4 CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA _____ **107**

4.1 GEOMORFOLOGÍA 107
4.2 SIERRA DEL MEDIO 112

4.3 DEPRESIÓN DEL RÍO LOA 117
4.4 CORDILLERA DE LOS ANDES 120

5 CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA 125

5.1 CONTEXTO HIDROCLIMÁTICO 125
5.2 ANÁLISIS DE VARIABLES METEOROLÓGICAS 127
5.2.1 PRECIPITACIONES MEDIAS 127
5.2.2 TEMPERATURAS MEDIAS 137
5.2.3 VARIACIÓN TEMPORAL DE LA TEMPERATURA 140
5.2.4 EVAPOTRANSPIRACIÓN Y EVAPORACIÓN 141
5.3 ANÁLISIS HIDROLÓGICO 142
5.3.1 CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS 142
5.3.2 BALANCE HIDROLÓGICO 152
5.4 RELACIÓN RÍO LOA – ACUÍFERO 165
5.4.1 ANÁLISIS CON DOS ESTACIONES FLUVIOMÉTRICAS (DGA) 166
5.4.2 ANÁLISIS CON AFOROS DE LA CAMPAÑA DE TERRENO “DICIEMBRE 2013” 172
5.4.3 ANÁLISIS CON AFOROS DEL PLAN DE ALERTA TEMPRANA DE PAMPA PUNO 183

6 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA 191

6.1 SALAR DE ALCONCHA 192
6.2 SALAR DE OLLAGÜE 197
6.3 SALAR DE CARCOTE 201
6.4 SALAR DE ASCOTÁN 204
6.5 PAMPA PUNO 211
6.6 SAN PEDRO 216
6.7 RÍO LOA 220
6.8 GENERACIÓN DE EQUIPOTENCIALES 228

7 CARACTERIZACION HIDROQUÍMICA E ISOTÓPICA 233

7.1 ANÁLISIS DE INFORMACIÓN PRE-EXISTENTE 233
7.1.1 CUENCA DEL SALAR DE ALCONCHA 234
7.1.2 CUENCA DEL SALAR DE CARCOTE 237
7.1.3 CUENCA DEL SALAR DE ASCOTÁN 240
7.1.4 CUENCA DE PAMPA PUNO 243
7.1.5 CUENCA DEL RÍO SAN PEDRO 246
7.1.6 CUENCA DEL RÍO LOA 249
7.1.7 CARACTERIZACIÓN HIDROQUÍMICA PRECIPITACIÓN 252
7.1.8 ISÓTOPOS ^{18}O Y ^{2}H 256
7.1.9 ISÓTOPOS ^{13}C 258

7.2 PARÁMETROS DE TERRENO 262
7.2.1 ANÁLISIS ESTADÍSTICO 266
7.2.2 DISTRIBUCIÓN DE LOS VALORES DE CE 273
7.2.3 PERFIL DE CE DEL RÍO LOA 277
7.3 ANÁLISIS HIDROQUÍMICO 279
7.3.1 ANÁLISIS ESTADÍSTICO 287
7.3.2 BALANCE IÓNICO 303
7.3.3 PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS 308
7.4 ANÁLISIS ISOTÓPICO - $\Delta^{18}O$, $\Delta^{2}H$ Y $\Delta^{13}C$ 320
7.4.1 ANÁLISIS ESTADÍSTICO 321
7.5 ANÁLISIS GRÁFICOS 326
7.5.1 DIAGRAMAS DE SCHOELLER 327
7.5.2 CORRELACIONES EN LA CONCENTRACIÓN 346
7.5.3 COMPOSICIÓN ISOTÓPICA DE LA MOLÉCULA DE AGUA 350
7.5.4 COMPOSICIÓN ISOTÓPICA DE CARBONO 13 363
7.6 CALIDAD AMBIENTAL DE LAS AGUAS 374
7.6.1 METALES PESADOS Y BORO 374
7.6.2 CLASIFICACIÓN CALIDAD AGUAS CONAMA 393
7.7 MODELO HIDROQUÍMICO CONCEPTUAL 398
8 MODELO CONCEPTUAL 401

8.1 SUBCUENCA DE ALCONCHA PERFIL AL1-AL2 409
8.2 SUBCUENCA DEL SALAR DE OLLAGÜE PERFIL O1–O2 412
8.3 SUBCUENCA DEL SALAR DE CARCOTE PERFIL C1-C2 415
8.4 SUBCUENCA DEL SALAR DE ASCOTÁN PERFIL AS1-AS2 418
8.5 SUBCUENCA DE PAMPA PUNO PERFIL PL1-PL2 420
8.6 SUBCUENCA DE SAN PEDRO PERFIL P1-P2 422
8.7 SUBCUENCA DEL RÍO LOA PERFIL L1-L2 425
8.8 CONEXIÓN ENTRE SUBCUENCAS 428
9 DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES 435

10 RECOMENDACIONES 439

10.1 ACTIVIDADES PRIORITARIAS 439
10.2 ACTIVIDADES SECUNDARIAS 440
11 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 443

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Localización de la cuenca del Loa Alto. Fuente: elaboración propia. 24

Figura 1-2. Subdivisión en subcuencas realizada por Matraz de la cuenca del Loa Alto. Fuente: elaboración propia. 27

Figura 2-1. Mapa geológico de la zona de estudio, escala 1:250.000. Fuente: modificado de Ramírez y Huete, 1981. 40

Figura 2-2. Sección Geoeléctrica Perfil San Pedro Nº2. Fuente: Geodatos, 1986. 41

Figura 2-3. Bloque diagrama esquemático, unidades geológicas subsuperficiales de la subcuenca de Ascotán. Fuente: CICA, 1998. 42

Figura 2-4. Columna estratigráfica Formación Tolar, levantado en quebrada Millo. Fuente: Tomlinson *et al*., 2001. 44

Figura 2-5. Perfil BB´ que muestra la geología de norte a sur del salar de Ollagüe. Fuente: DICTUC, 2005. 46

Figura 2-6. Cronoestratigrafía de la sección del norte de Chile, 21º y 24º sur. Fuente: May, et al., 2005. 47

Figura 2-7. Mapa geológico de la subcuenca del salar de Alconcha. Fuente: SGA, 2007. 49

Figura 2-8. Perfil geoeléctrico B-2. Fuente: Geodatos, 1985. 56

Figura 2-9. Sección geoeléctrica de la Pampa Apacheta Nº 2. Fuente: Geodatos, 1986. 57

Figura 2-10. Mapa piezométrico del salar de Carcote. Fuente: Mardones, 1977. 61

Figura 2-11. Modelo hidrogeológico del Salar de Ollagüe. Fuente: DICTUC, 2005. 62

Figura 2-12. Mapa piezométrico del salar de Alconcha. Fuente: SGA, 2007. 64

Figura 2-13. Diagramas composición isotópica del río Loa. Fuente: Aravena y Suzuki, 1990. 69

Figura 2-14. Gráfico que muestra la relación los valores isotópicos de $\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$ de la precipitación de la región de Antofagasta. Fuente: DGA, 2005. 74

Figura 2-15. Composición isotópica de ^{18}O y ^{2}H de las aguas subterráneas en el borde oriental del salar de Ascotán. Fuente: Villablanca, 2006. 75

Figura 2-16. Mapas de líneas de isoniveles de conductividad, sulfatos, cloruros y bicarbonatos. Fuente: SGA, 2007. 77

Figura 2-17. Figura de la izquierda muestra la relación entre los valores isotópicos de $\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$,la figura de la derecha la correlación entre el contenido isotópico y la altura de muestreo. Fuente: Villablanca, 2009. 79

Figura 2-18. Balance hídrico del salar de Alconcha. Fuente: Risacher *et al*., 1999. 81

Figura 3-1. Método de muestreo para los aforos de la campaña de diciembre de 2013. Fuente: elaboración propia. 91

Figura 3-2. Puntos de muestreo y rutas diarias realizadas durante la campaña de terreno de octubre de 2013. Fuente: elaboración propia. 94

Figura 3-3. Puntos de muestreo y rutas diarias realizadas durante la campaña de terreno de diciembre de 2013. Fuente: elaboración propia. 100

Figura 3-4. Mapa de ubicación de los puntos de aforo realizados en la campaña de terreno de diciembre de 2013. Fuente: elaboración propia. 104

Figura 4-1. Mapa geomorfológico de la zona de estudio. Fuente: elaboración propia. 109

Figura 4-2. Mapa geológico del Loa Alto. Fuente: Ramírez y Huete, 1981. 110

Figura 4-3. Perfiles geológicos de la zona de estudio, se indica su ubicación en el mapa geológico de la figura 4-2. Fuente: Ramírez y Huete, 1981. 111

Figura 4-4. Mapa de ubicación de la Sierra del Medio. Fuente: elaboración propia. 112

Figura 4-5. Esquema de la disposición y relación de las unidades geológicas desde el Paleozoico hasta el Mioceno. Fuente: Ramírez y Huete, 1981. 113

Figura 4-6. Columna estratigráfica Formación Sinchal. Fuente: Tomlinson *et al*., 2001. 116

Figura 4-7. Mapa de ubicación de la Depresión del río Loa. Fuente: elaboración propia. 117

Figura 4-8. Mapa con la distribución de la unidad de ignimbrita riolítica dacítica miocénica (Ignimbrita Ujina) y la ignimbrita pliocénica (Ignimbrita Carcote). Fuente: Tomlinson *et al*., 2001. 119

Figura 4-9. Mapa de ubicación de la Cordillera de los Andes. Fuente: elaboración propia. 120

Figura 4-10. Esquema de la disposición y relación de las unidades geológicas desde el Mioceno hasta la actualidad. Fuente: Ramírez y Huete, 1981. 122

Figura 5-1. Clasificación del clima en la Región de Antofagasta. Fuente: elaboración propia. 127

Figura 5-2. Modelo Digital de Precipitaciones Medias Anuales de la Cuenca del Loa Alto. Fuente: elaboración propia. 129

Figura 5-3. Comparación entre isoyetas de precipitación media anual del informe de DGA (DGA, 1986) y los valores en las estaciones DGA. Fuente: elaboración propia. 132

Figura 5-4. Modelo Digital de Precipitaciones medias anuales obtenido a partir de las isoyetas del informe de DGA (DGA, 1986) (color azul). Las isoyetas se han ampliado en la frontera con Bolivia a partir de las isoyetas de DICTUC (DICTUC, 2008) (color rojo). Fuente: elaboración propia. 133

Figura 5-5. Estaciones pluviométricas seleccionadas de la Dirección General de Aguas, para representar las precipitaciones medias mensuales. Fuente: elaboración propia..... 135

Figura 5-6. Representación de las precipitaciones medias mensuales de estaciones fluviométricas de la Dirección General de Aguas. Fuente: elaboración propia. 136

Figura 5-7. Localización de las estaciones meteorológicas DGA para caracterizar la temperatura y Modelo Digital de Temperaturas de la cuenca del Loa Alto. Fuente: elaboración propia. 138

Figura 5-8. Relación entre la temperatura y la altitud de las estaciones seleccionadas para el estudio de la temperatura en la cuenca del Loa Alto. Fuente: elaboración propia. 139

Figura 5-9. Variación de la temperatura media mensual de algunas estaciones de la zona de estudio. Fuente: elaboración propia. 140

Figura 5-10. Mapa de altitudes de la cuenca del Loa Alto. Fuente: elaboración propia..... 145

Figura 5-11. Mapa de clasificación del suelo en función de la pendiente de la cuenca del Loa Alto según la Guía de para descripción de suelos de la FAO (2009). Fuente: elaboración propia. 148

Figura 5-12. Mapa de la red hídrica de la cuenca del Loa Alto. Fuente: elaboración propia. 151

Figura 5-13. Mapa de la localización de estaciones de aforo de la Dirección General de Aguas en la subcuenca de San Pedro. Fuente: elaboración propia. 164

Figura 5-14. Localización de las estaciones fluviométricas de la DGA “Río Loa antes represa Lequena” y “Río Loa en Alcantarilla Nº 2”. Representación del rango de altitudes presente en las subcuencas generadas en estas estaciones. Fuente: elaboración propia. 167

Figura 5-15. Localización esquemática de las explotaciones de la empresa Aguas Antofagasta en la cuenca del Loa Alto. Fuente: elaboración propia. 169

Figura 5-16. Explotación de “Aguas Antofagasta” en Captación Lequena, aguas arriba de la estación “Río Loa antes represa Lequena”,. Fuente: www.elnortero.cl 169

Figura 5-17. Explotación de “Aguas Antofagasta” en Captación Quinchamale, situada entre la estación fluviométrica de la DGA “Río Loa antes represa Lequena” y “Río Loa en Alcantarilla Nº2”. Fuente: elaboración propia. 170

Figura 5-18. Localización de los puntos de aforo seleccionados. Representación del rango de altitudes presente en las subcuencas generadas en estas estaciones. Fuente: elaboración propia. 174

Figura 5-19. Localización de la quebrada Paco Paco en la ubcuenca A-4 del cuenca del Loa Alto. Fuente: elaboración propia. 177

Figura 5-20. Perfil topográfico del río Loa en los puntos de aforo de la segunda campaña de terreno. Fuente: elaboración propia. 179

Figura 5-21. Relación del caudal producida por unidad de superficie. Se ha obtenido para el caudal acumulado por subcuencas (serie azul) y la aportación de caudal de cada subcuenca (serie roja). Fuente: elabroación propia. 181

Figura 5-22. Relación entre el caudal del río Loa y la superficie acumulada de la Cuenca del Loa Alto. Fuente: elaboración propia. 183

Figura 5-23. Perfil de caudal del río Loa. Fuente: elaboración propia. 186

Figura 5-24. Perfil de caudal del río Loa. Fuente: elaboración propia. 187

Figura 5-25. Relaciones río-acuífero del río Loa desde su nacimiento hasta su llegada al embalse Conchi. Fuente: elaboración propia. 189

Figura 6-1. Mapa del área de estudio (izquierda) y mapa del salar de Alconcha (derecha). Fuente: elaboración propia. 192

Figura. 6-2. Mapa piezométrico del Salar de Alconcha. Fuente: SGA, 2007. 194

Figura 6-3. Ubicación de los pozos en la subcuenca del Salar de Alconcha. Fuente: SGA, 2007 . . 196

Figura 6-4. Mapa del área de estudio (izquierda) y mapa del salar Ollagüe (derecha). Fuente: elaboración propia. 197

Figura 6-5. Modelo hidrogeológico del salar de Ollagüe. Fuente: DICTUC, 2005. 198

Figura 6-6. Mapa con la ubicación de los pozos y las isolíneas del salar de Ollagüe. Fuente: DICTUC, 2005. 199

Figura 6-7. Mapa del área de estudio (izquierda) y mapa del salar de Carcote (derecha). Fuente: elaboración propia. 201

Figura 6-8. Curvas isofreáticas del sector suroeste del salar de Carcote y ubicación de las unidades hidrogeológicas. Fuente: DICTUC, 2005. 203

Figura 6-9. Mapa del área de estudio (izquierda) y mapa detallado del salar de Ascotán (derecha). Fuente: elaboración propia. 204

Figura 6-10. Perfiles hidrogeológicos y su ubicación en la cuenca de Ascotán. Fuente: modificado de DICUC, 2005. 207

Figura 6-11. Mapa con las curvas isofreáticas y líneas de flujo de la cuenca de Ascotán. Fuente: modificado de DICTUC, 2005. 208

Figura 6-12. Mapa con isodescensos del sector Sureste del Salar de Ascotán. Fuente: Schlumberger, 2009. 209

Figura 6-13. Mapa del área de estudio (izquierda) y mapa detallado de Pampa Puno (derecha). Fuente: elaboración propia. 211

Figura 6-14. Columna estratigráfica del sondaje del pozo Puno-8B. Fuente: INGEOREC, 2001. ... 213

Figura 6-15. Ubicación y distribución de los pozos en Pampa Puno. Fuente: elaboración propia... 214

Figura 6-16. Mapa del área de estudio (izquierda) y mapa detallado de la subcuenca del río San Pedro (derecha). Fuente: elaboración propia. 216

Figura 6-17. Mapa de situación de los perfiles geofísicos en la cuenca de San Pedro y los perfiles San Pedro Nº2 y el B-2. Fuente: modificado de Geodatos, 1985. 218

Figura 6-18. Mapa del área de estudio (izquierda) y mapa detallado de la subcuenca del río San Pedro (derecha). Fuente: elaboración propia. 220

Figura 6-19. Ubicación del corte geofísico realizado en el río Loa antes de Lequena. Fuente: Aquaterra, 2011. 222

Figura 6-20. Corte geofísico realizado en el río Loa antes de Lequena. Fuente: Aquaterra, 2011. 223

Figura 6-21. Mapa de la ubicación de los perfiles TEM y el perfil L-3 TEM. Fuente: FCAB, 2003. .. 225

Figura 6-22. Mapa con los valores de los niveles estáticos. Fuente: modificado de FCAB, 2003. .. 227

Figura 6-23. Distribución y valores de los niveles de agua medidos en la primera campaña de terreno. Fuente: elaboración propia. 229

Figura 6-24. Distribución y valores de los niveles de agua medidos en la segunda campaña de terreno. Fuente: elaboración propia. 230

Figura 7-1. Diagrama de Piper de las muestras de la cuenca del Salar de Alconcha. Fuente: modificado de Risacher *et al*., 1990 y SGA, 2007. 235

Figura 7-2. Mapa de distribución de diagramas de Stiff de las muestras de la cuenca del Salar de Alconcha. Fuente: modificado de Risacher *et al*., 1990 y SGA, 2007. 236

Figura 7-3. Diagrama de Piper de las muestras del salar de Carcote. Fuente: modificado de Risacher *et al.,* 1990. 238

Figura 7-4. Mapa de distribución de diagramas de Stiff de las muestras del salar de Carcote. Fuente: modificado de Risacher *et al*., 1990. 239

Figura 7-5. Diagrama de Piper de las muestras del Salar de Ascotán. Fuente: modificado de Risacher *et al.,* 1990. 241

Figura 7-6. Mapa de distribución de diagramas de Stiff de las muestras del Salar de Ascotán. Fuente: modificado de Risacher *et al.*, 1990. 243

Figura 7-7. Diagrama de Piper de las muestras de Pampa Puno. Fuente: modificado de GP, 2007. 244

Figura 7-8. Mapa de distribución de los diagramas de Stiff de las muestras de pozos Pampa Puno. Fuente: modificado de GP, 2007. 245

Figura 7-9. Diagrama de Piper de las muestras de San Pedro. Fuente: modificado de Aravena y Suzuki, 1990. 247

Figura 7-10. Mapa de distribución de diagramas de Stiff de las muestras del San Pedro. Fuente: modificado de Aravena y Suzuki, 1990. 248

Figura 7-11. Diagrama de Piper de las muestras del río Loa. Fuente: modificado de Aravena y Suzuki, 1990 y FCAB, 2003. 250

Figura 7-12. Mapa de distribución de diagramas de Stiff de las muestras del río Loa. Fuente: modificado de Aravena y Suzuki, 1990 y FCAB, 2003. 251

Figura 7-13 Diagrama de Schöeller-Berkaloff de la composición química de las muestras. Fuente: elaboración propia. 255

Figura 7-14. Gráfico $\delta^{2}H$ y $\delta^{18}O$ de los datos compilados. Fuente: elaboración propia. 257

Figura 7-15. Gráfico de composición isotópica de $\delta^{13}C$ y $\delta^{18}O$. Fuente: modificado de Mardones, 1998. 259

Figura 7-16. Gráfico de la relación $\delta^{13}C$ y la profundidad en el salar de Ascotán. Fuente: modificado de Mardones, 1998. 260

Figura 7-17. Gráfico de la relación $\delta^{13}C$ y Alcalinidad en muestras de agua superficiales. Fuente: modificado de Aravena y Suzuki, 1990. 261

Figura 7-18. Evolución de la composición de $\delta^{13}C$ a lo largo del río Loa. Fuente: modificado de Aravena y Suzuki, 1990. 262

Figura 7-19. Sonda multiparamétrica HI-9828. Fuente: elaboración propia. 263

Figura 7-20. Diferencia entre la Temperatura del agua media (Tagua) y la Temperatura media del aire (Taire) en cada subcuenca. Fuente: elaboración propia. 270

Figura 7-21. Mapa de valores de CE tomados en la primera campaña de terreno, octubre de 2013. Fuente: elaboración propia. 274

Figura 7-22 Mapa de valores de CE tomados en la segunda campaña de terreno, diciembre de 2013. Fuente: elaboración propia. 276

Figura 7-23: Perfil de conductividades del rio Loa en la primera y la segunda campaña. Fuente: elaboración propia. 278

Figura 7-24. Variación del índice de saturación de la calcita (SI) en el río Loa y en sus aportes en forma de tributarios o vertientes próximas en octubre de 2013. Fuente: elaboración propia. 312

Figura 7-25. Clasificación de las aguas de riego en función de la Relación de Absorción de Sodio (RAS) y conductividad eléctrividad (CE) en las diferentes subcuencas a partir de los resultados químicos de octubre de 2013. Fuente: elaboración propia. 314

Figura 7-26. Variación del índice de saturación (SI) de la calcita en el río Loa y en sus aportes en forma de tributarios o vertientes próximas en diciembre de 2013. Fuente: elaboración propia. ... 317

Figura 7-27. Clasificación de las aguas de riego en función de la Relación de Absorción de Sodio (RAS) y conductividad eléctrividad (CE) en las diferentes subcuencas a partir de los resultados químicos de diciembre de 2013. Fuente: elaboración propia. 319

Figura 7-28. Diagrama Schoeller-Berkaloff de la subcuenca del salar de Alconcha. Fuente: elaboración propia. 329

Figura 7-29 Diagrama Schoeller-Berkaloff de la subcuenca del salar de Ollagüe. Fuente: elaboración propia. 331

Figura 7-30. Diagrama Schoeller-Berkaloff de la subcuenca del salar de Carcote. Fuente: elaboración propia. 333

Figura 7-31. Diagrama Schoeller-Berkaloff de la subcuenca del salar de Ascotán. Fuente: elaboración propia. 335

Figura 7-32 Diagrama Schoeller-Berkaloff de la subcuenca de San Pedro. Fuente: elaboración propia. 337

Figura 7-33. Diagrama Schoeller-Berkaloff de las vertienes del este de la subcuenca del Loa. Fuente: elaboración propia. 339

Figura 7-34 Diagrama Schoeller-Berkaloff de las vertientes del sector oeste de la subcuenca del Loa. Fuente: elaboración propia. 341

Figura 7-35 Diagrama Schoeller-Berkaloff del tramo del río Loa desde su nacimiento hasta la represa Lequena. Fuente: elaboración propia. 343

Figura 7-36. Diagrama Schoeller-Berkaloff del tramo del río Loa desde la represa Lequena hasta Chiu Chiu. Fuente: elaboración propia. 345

Figura 7-37. Relación SO_4^{2-}/Cl^- de las muestras de la campaña de octubre de 2013. Fuente: elaboración propia. 347

Figura 7-38. Concentración de Si en función de la temperatura de las muestras de la campaña de diciembre-octubre de 2013. Fuente: elaboración propia. 349

Figura 7-39. Esquema de evolución de composición isotópica de un frente de precipitación. Fuente: elaboración propia. 351

Figura 7-40. Composición isotópica de la molécula del agua de las 60 muestras tomadas en la primera campaña de terreno de Octubre de 2013. Fuente: elaboración propia. 354

Figura 7-41. Composición isotópica de la molécula del agua de las 60 muestras tomadas en la primera campaña de terreno de Diciembre de 2013. Fuente: elaboración propia. 357

Figura 7-42. Distribución de las composiciones isotópicas de las muestras de octubre de 2013. Fuente: elaboración propia. 359

Figura 7-43. Relación entre la $\delta^{18}O$ de las muestras tomadas en la primera campaña de terreno y la altitud. Fuente: elaboración propia. 362

Figura 7-44. Relación entre la $\delta^{2}H$ de las muestras tomadas en la primera campaña de terreno y la altitud. Fuente: elaboración propia. 363

Figura 7-45. Valores y rangos de $\delta^{13}C$ en diferentes componentes. Fuente: modificado de Clark, I. y Fritz, P., 1997. 364

Figura 7-46. Relación $\delta^{13}C$-Cl de las muestras tomadas en la primera campaña de terreno, octubre 2013. Fuente: elaboración propia. 366

Figura 7-47. Relación $\delta^{13}C$-TAC de las muestras tomadas en la primera campaña de terreno, octubre 2013. Fuente: elaboración propia. 368

Figura 7-48. Mapa distribución de los valores de $\delta^{13}C$ (VPDB) de las muestras tomadas en la primera campaña de octubre de 2013. Fuente: elaboración propia. 370

Figura 7-49. Variación de $\delta^{13}C$ (eje principal), cloruros, el TAC y el calcio a lo largo del río Loa. Fuente: elaboración propia. 373

Figura 7-50.- Mapa que muestra la concentración de Fe en los puntos de muestreo de la primera campaña de terreno (octubre, 2013). Los puntos están diferenciados en función si son vertientes, aguas superficiales y pozos. Los colores en verde indican que la concentración de Fe cumple el límite establecido en la *NCh 409/1 of.2005,* los colores naranja y rojo superan dicho valor. Fuente: elaboración propia. 376

Figura 7-51. Mapa que muestra la concentración de As en los puntos de muestreo de la primera campaña de terreno (octubre 2013). Los puntos están diferenciados en función si son vertientes, aguas superficiales y pozos. Los colores en verde indican que la concentración de As cumple el límite establecido en la *NCh 409/1 of.2005,* los colores naranja y rojo superan dicho valor. Fuente: elaboración propia. 379

Figura 7-52. Mapa que muestra la concentración de Al en los puntos de muestreo de la primera campaña de terreno (octubre 2013). Los puntos están diferenciados en función si son vertientes, aguas superficiales y pozos. Los colores en verde indican que la concentración de Al cumple el límite

establecido en la *OMS (2008),* los colores naranja y rojo superan dicho valor. Fuente: elaboración propia. 381

Figura 7-53. Mapa que muestra la concentración de B en los puntos de muestreo de la primera campaña de terreno (octubre, 2013). Los puntos están diferenciados en función si son vertientes, aguas superficiales y pozos. Los colores en verde indican que la concentración de B cumple el límite establecido en la *OMS, 2008,* los colores naranja y rojo superan dicho valor. Fuente: elaboración propia. 383

Figura 7-54. Mapa que muestra la concentración de Fe en los puntos de muestreo de la segunda campaña de terreno (diciembre, 2013). Los puntos están diferenciados en función si son vertientes, aguas superficiales y pozos. Los colores en verde indican que la concentración de Fe cumple el límite establecido en la *NCh 409/1 of.2005,* los colores naranja y rojo superan dicho valor. Fuente: elaboración propia. 385

Figura 7-55. Mapa que muestra la concentración de As en los puntos de muestreo de la segunda campaña de terreno (diciembre, 2013). Los puntos están diferenciados en función si son vertientes, aguas superficiales y pozos. Los colores en verde indican que la concentración de As cumple el límite establecido en la *NCh 409/1 of.2005,* los colores naranja y rojo superan dicho valor. Fuente: elaboración propia. 388

Figura 7-56. Mapa que muestra la concentración de Al en los puntos de muestreo de la segunda campaña de terreno (diciembre, 2013). Los puntos están diferenciados en función si son vertientes, aguas superficiales y pozos. Los colores en verde indican que la concentración de Al cumple el límite establecido en la *OMS, 2008,* los colores naranja y rojo superan dicho valor. Fuente: elaboración propia. 390

Figura 7-57. Mapa que muestra la concentración de B en los puntos de muestreo de la segunda campaña de terreno (diciembre, 2013). Los puntos están diferenciados en función si son vertientes, aguas superficiales y pozos. Los colores en verde indican que la concentración de B cumple el límite establecido en la *OMS, 2008,* los colores naranja y rojo superan dicho valor. Fuente: elaboración propia. 392

Figura 8-1. Fases para la obtención del modelo conceptual y conclusiones. Fuente: elaboración propia. 401

Figura 8-2. Dominios hidrogeológicos y sistemas de fallas principales. Fuente: elaboración propia. 403

Figura 8-3. Esquema explicativo del modelo del flujo A que se producen en la zona de estudio. Fuente: elaboración propia. 405

Figura 8-4. Esquema explicativo del modelo del flujo B que se producen en la zona de estudio. Fuente: elaboración propia. 406

Figura 8-5. Mapa de la zona de estudio con la ubicación de los perfiles esquemáticos realizados. Fuente: elaboración propia. 408

Figura 8-6. Modelo Conceptual Preliminar de la subcuenca de Alconcha. El esquema muestra una exageración vertical de acuerdo a las proporciones del perfil. Fuente: elaboración propia. 411

Figura 8-7. Modelo Conceptual Preliminar del salar de Ollagüe. El esquema muestra una exageración vertical de acuerdo a las proporciones del perfil. Fuente: elaboración propia. 414

Figura 8-8. Modelo Conceptual Prelinar del salar de Carcote. El esquema muestra una exageración vertical de acuerdo a las proporciones del perfil. Fuente: elaboración propia. 417

Figura 8-9. Modelo Conceptual Preliminar del salar de Ascotán. El esquema muestra una exageración vertical de acuerdo a las proporciones del perfil. Fuente: elaboración propia. 419

Figura 8-10. Modelo Conceptual Preliminar de la conexión hidráulica subterránia Pampa Puno-Loa. El esquema muestra una exageración vertical de acuerdo a las proporciones del perfil. Fuente: elaboración propia. 421

Figura 8-11. Modelo Conceptual Preliminar de la subcuenca de San Pedro. El esquema muestra una exageración vertical de acuerdo a las proporciones del perfil. Fuente: elaboración propia. 424

Figura 8-12- Modelo Conceptual Preliminar de la subcuenca de río Loa, en Lasana. El esquema muestra una exageración vertical de acuerdo a las proporciones del perfil. Fuente: elaboración propia. 427

Figura 8-13. Potenciales conexiones hidráulicas subterráneas entre subcuencas. Fuente: elaboración propia. 429

Figura 8-14. Modelo Conceptual Preliminar de la conexión hidráulica subterránea entre Ascotán-Carcote. El esquema muestra una exageración vertical de acuerdo a las proporciones del perfil. Fuente: elaboración propia. 431

Figura 8-15- Modelo Conceptual Preliminar de la conexión hidráulica subterrània Ascotán-Loa. El esquema muestra una exageración vertical de acuerdo a las proporciones del perfil. Fuente: elaboración propia. 434

Figura 9-1. Redelimitación de las subcuencas propuesta por el presente estudio. Fuente: elaboración propia. 437

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1. Separación y caracterización de las diferentes subcuencas dentro de la cuenca del Loa Alto. Fuente: elaboración propia. 26

Tabla 1-2. Resumen de las actividades del proyecto y los resultados obtenidos en cada una de ellas. Fuente: elaboración propia. 28

Tabla 2-1. Parámetros hidráulicos cuenca del río San Pedro. Fuente: CORFO *et al.*, 1977. 54

Tabla 2-2. Valores del coeficiente de almacenamiento para condiciones de extracción a corto plazo. Fuente: Falcón, 1987. 58

Tabla 2-3. Valores del coeficiente de almacenamiento para condiciones de extracción a largo plazo. Fuente: Falcón, 1987. 58

Tabla 2-4. Resultados de transmisividad de las pruebas de bombeo de la campaña 1998-2000. Fuente: INGEOREC, 2001. 59

Tabla 2-5. Resumen de los parámetros hidráulicos de las unidades hidrogeológicas. Fuente: Schlumberger, 2009. 66

Tabla 2-6. Valores de valores $\delta^{18}O$, $\delta^{2}H$ y $\delta^{13}C$ de los pozos, vertientes y cursos superficiales de la cuenca del río Loa. Fuente: AGUA, 1985. 68

Tabla 2-7. Composición química del río Loa y del río San Pedro. Fuente: Aravena y Suzuki, 1990. 70

Tabla 2-8. Valores isotópicos de ^{13}C y ^{18}O del Salar de Ascotán. Fuente: Mardones, 1998. 71

Tabla 2-9. Puntos de muestreo en el salar de Carcote. Fuente: Risacher *et al.*, 1999. 72

Tabla 2-10. Valores de la composición química del muestreo en el pozo Puno-4B. Fuente: GP, 2008. 78

Tabla 2-11. Valores estimados de los caudales de entrada y salida de agua subterránea en el salar de Ascotán. Fuente: Mardones, 1998. 80

Tabla 2-12. Valores de las entradas, las salidas y el balance de los modelos conceptuales de las subcuencas del salar de Carcote y de Ascotán. Fuente: DICTUC, 2005. 83

Tabla 2-13. Valores de la recarga en la subcuenca del salar de Alconcha. Fuente: SGA, 2007. 84

Tabla 2-14. Resumen de las estimaciones de recarga en la toda la subcuenca de Ascotán. Fuente: Schlumberger, 2009. 84

Tabla 3-1. Especificaciones iniciales de la primera campaña de terreno. Fuente: elaboración propia. 92

Tabla 3-2. Resumen de muestras y mediciones tomadas de la campaña de terreno de octubre de 2013. Fuente: elaboración propia. 97

Tabla 3-3. Especificaciones iniciales de la campaña de terreno de diciembre de 2013. Fuente: elaboración propia. 98

Tabla 3-4. Resumen de muestras y mediciones tomadas de la campaña de terreno de diciembre de 2013. Fuente: elaboración propia. 103

Tabla 3-5. Características de los aforos de la campaña de diciembre de 2013. Fuente: elaboración propia. 105

Tabla 5-1. Bandas hipsométricas en la cuenca del Loa Alto y precipitación media anual asociada a cada rango de altitudes. Donde "$P_{Media\ anual}$" es precipitación media anual. Calculado a partir de las isoyetas de DICTUC (DICTUC, 2008). Fuente: elaboración propia. 130

Tabla 5-2. Bandas hipsométricas en la cuenca del Loa Alto y precipitación media anual asociada a cada rango de altitudes. Donde "$P_{Media\ anual}$" es precipitación media anual. Calculado a partir de las isoyetas del informe de DGA (DGA, 1986) y ampliado por la frontera con Bolivia a partir de las isoyetas de DICTUC (DICTUC, 2008). Fuente: elaboración propia. 134

Tabla 5-3. Precipitaciones medias mensuales de estaciones pluviométricas de la Dirección General de Aguas situadas dentro de la Cuenca del Loa Alto. Fuente: elaboración propia. 136

Tabla 5-4. Distribución de las precipitaciones durante los periodos de diciembre a marzo y de abril a noviembre. Fuente: elaboración propia. 137

Tabla 5-5. Nombre de las estaciones meteorológicas seleccionadas para determinar la temperatura media en la zona de estudio, coordenada UTM en el Sistema Geodésico Mundial (WGS) 1984, altitud y temperatura. Fuente: elaboración propia. 139

Tabla 5-6. Temperatura media mensual de las estaciones seleccionadas. Fuente: elaboración propia. 140

Tabla 5-7. Clasificación de cuencas en función del coeficiente de Gravelius. Fuente: modificado de Fuentes, 2004. 143

Tabla 5-8. Clasificación de las subcuencas en función del Coeficiente de Gravelius (K_G). Fuente: elaboración propia. 144

Tabla 5-9. Parámetros de relieve de la cuenca del Loa Alto: Altitud máxima, altitud mínima, relieve y altitud media. Fuente: elaboración propia. 146

Tabla 5-10. Clasificación del suelo en función de distintos gradientes de pendiente. Fuente: FAO, 2009. 147

Tabla 5-11. Pendiente media de la cuenca y subcuencas del Loa Alto. Fuente: elaboración propia. 149

Tabla 5-12. Clasificación de la red de drenaje de la cuenca del Loa Alto en función de su densidad. Fuente: elaboración propia. 150

Tabla 5-13. Superficie de cada subcuenca en cada rango de altitudes o banda hipsométrica (cada 200 metros). Fuente: elaboración propia. 153

Tabla 5-14. Precipitación media en cada subcuenca y rango de altitudes o banda hipsométrica (cada 200 metros) y en la salida del Loa Alto (suma de las subcuencas de San Pedro, Pampa Puno y resto del Loa Alto). Fuente: elaboración propia..... 154

Tabla 5-15. Evaporación producida desde la superficie de los salares en las subcuencas de la cuenca del Loa Alto. Donde “Sup” es superficie y “EV” es evaporación. Fuente: elaboración propia. 155

Tabla 5-16. Evapotranspiración natural o real en cada subcuenca de la cuenca del Loa Alto y en toda la cuenca. Fuente: elaboración propia. 156

Tabla 5-17. Escorrentía total en la cuenca del Loa Alto y en las subcuencas que la conforman. La correspondiente a la salida de la cuenca se obtiene mediante la suma de las subcuencas de San Pedro, Pampa Puno y resto del Loa. Donde: “P” es la precipitación; “EV” es la evaporación y “ETR” es la evapotranspiración natural o real, todos los parámetros en metros cúbicos por segundo. Fuente: elaboración propia. 158

Tabla 5-18. Salida del balance hidrológico de la subcuenca del salar de Alconcha, equivalente a la recarga. Comparación con otros autores. Fuente: elaboración propia. 159

Tabla 5-19. Salida del balance hidrológico de la subcuenca del salar de Ollagüe, equivalente a la recarga. Comparación con otros autores. Fuente: elaboración propia. 160

Tabla 5-20. Salida del balance hidrológico de la subcuenca del salar de Carcote, equivalente a la recarga. Comparación con otros autores. Fuente: elaboración propia. 161

Tabla 5-21. Salida del balance hidrológico de la subcuenca del salar de Ascotán, equivalente a la recarga. Fuente: elaboración propia..... 162

Tabla 5-22. Salida del balance hidrológico de la subcuenca del salar de Ascotán, equivalente a la recarga. Fuente: elaboración propia..... 162

Tabla 5-23. Salida del balance hidrológico de la subcuenca del salar de Ascotán, equivalente a la recarga. Fuente: elaboración propia..... 163

Tabla 5-24. Comparación entre la escorrentía total calculada y las estaciones de aforo en la subcuenca de San Pedro. Fuente: elaboración propia. 164

Tabla 5-25. Comparación escorrentía total calculada y las estaciones de aforo en la subcuenca de del Loa Alto. Fuente: elaboración propia. 165

Tabla 5-26. Resumen de las variables calculadas para el análisis de caudales de las subcuencas Lequena y Alcantarilla. Donde “S” es superficie, “P” es precipitación, “Q” es caudal y “L” es longitud. Fuente: elaboración propia. 171

Tabla 5-27. Relaciones entre las variables calculadas en las subcuencas Lequena y Alcantarilla. Donde “Q” es caudal, “P” es precipitación, “S” es superficie y “L” es longitud. Fuente: elaboración propia. 172

Tabla 5-28. Resumen de las variables calculadas para el análisis de caudales de las subcuencas obtenidas con los puntos de aforo seleccionados de la segunda campaña de terreno. Donde “S” es superficie, “P” es precipitación, “Q” es caudal y “L” es longitud. Fuente: elaboración propia. 175

Tabla 5-29. Clasificación de la pendiente de un cauce por intervalos. Fuente: Díaz y Ollero, 2005. 176

Tabla 5-30. Parámetros para el cálculo del perfil topográfico en los puntos de aforo de la segunda campaña en el río Loa y en la quebrada Paco Paco. Donde “Q_{RN}” es caudal en régimen natural. Fuente: elaboración propia. 178

Tabla 5-31. Relaciones entre las variables calculadas en las subcuencas obtenidas con los puntos de aforo seleccionados de la segunda campaña de terreno. Donde “Q” es caudal, “P” es precipitación, “S” es superficie y “L” es longitud. Fuente: elaboración propia. 180

Tabla 5-32. Correlación entre las variables calculadas en las subcuencas obtenidas con los puntos de aforo seleccionados de la segunda campaña de terreno. Donde “Q” es caudal, “P” es precipitación, “S” es superficie y “L” es longitud. Fuente: elaboración propia..... 182

Tabla 5-33. Datos aforos promedio entre 2005 y 2007 sin los meses de precipitaciones. Fuente: elaboración propia. 185

Tabla 6-1. Datos de las pruebas de Air Lift obtenidos del informe de Hargis and Montgomery (1982). Fuente: SGA, 2007. 195

Tabla 6-2. Valores de transmisividad de las unidades hidrogeológicas de la subcuenca del Salar de Alconcha. Fuente: SGA, 2007. 195

Tabla 6-3. Tabla de los valores de transmisividad y coeficiente de almacenamiento calculados en cada ensayo de bombeo. Fuente: DICTUC, 2005. 200

Tabla 6-4. Datos prueba de bombeo en las calicatas en Carcote. Fuente: DICTUC, 2005. 202

Tabla 6-5. Datos obtenidos en la segunda prueba de bombeo en las calicatas en Carcote. Fuente: DICTUC, 2005. 203

Tabla 6-6. Resumen con las constantes elásticas de los acuíferos de la cuenca del salar de Ascotán. Fuente: DICTUC, 2005..... 210

Tabla 6-7. Resultados de transmisividad de las pruebas de bombeo de la campaña 1998-2000. Fuente: INGEOREC, 2001. 215

Tabla 6-8. Parámetros hidráulicos cuenca del río San Pedro. Fuente: CORFO *et al.,* 1977. 219

Tabla 6-9. Valores de transmisividad obtenidos de las pruebas de bombeo. Fuente: FCAB, 2003. 226

Tabla 6-10. Tabla con el número de mediciones de nivel en cada subcuenca, en cada campaña. Fuente: elaboración propia. 228

Tabla 7-1 Composición química de las muestras de nieve. Fuente: Risacher *et al.,* 1999. 254

Tabla 7-2. Parámetros de terreno medidos en 63 muestras durante la primera campaña de terreno, octubre de 2013. Donde "T" es temperatura; "CE" es Conductividad Eléctrica; "SDT" son los Sólidos Disueltos Totales; "OD" es Oxígeno Disuelto. Fuente: elaboración propia. 264

Tabla 7-3. Parámetros de terreno medidos en 63 muestras durante la segunda campaña de terreno, diciembre de 2013. Donde "T" es temperatura; "CE" es Conductividad Eléctrica; "SDT" son los Sólidos Disueltos Totales; "OD" es Oxígeno Disuelto. Fuente: elaboración propia. 265

Tabla 7-4. Valores estadísticos de los parámetros "in situ" para un total de 63 muestras, medidos en la primera campaña de terreno, en octubre de 2013. Donde: "T" es temperatura; "CE" es Conductividad Eléctrica; "SDT" son los Sólidos Disueltos Totales; "OD" es Oxígeno Disuelto. Fuente: elaboración propia. 267

Tabla 7-5. Valores estadísticos por subcuencas de los parámetros "in situ" medidos en la campaña de terreno de octubre de 2013. Donde: "T" es temperatura; "CE" es Conductividad Eléctrica; "SDT" son los Sólidos Disueltos Totales; "OD" es Oxígeno Disuelto Fuente: elaboración propia. 268

Tabla 7-6. Valores estadísticos de los parámetros "in situ" medidos en la segunda campaña de terreno, en diciembre de 2013. Donde "T_{aire}" es temperatura media del aire obtenida del Modelo Digital de Temperaturas (Figura 5-7), "T" es temperatura; "CE" es Conductividad Eléctrica; "SDT" son los Sólidos Disueltos Totales; "OD" es Oxígeno Disuelto. Fuente: elaboración propia. 271

Tabla 7-7. Valores estadísticos por subcuencas de los parámetros "in situ" medidos en la primera campaña de terreno, en octubre de 2013. Donde "T_{aire}" es temperatura media del aire obtenida del Modelo Digital de Temperaturas (Figura 5-7), "T_{agua}" es temperatura media del agua medida con la sonda multiparamétrica; "CE" es Conductividad Eléctrica; "SDT" son los Sólidos Disueltos Totales; "OD" es Oxígeno Disuelto Fuente: elaboración propia. 272

Tabla 7-8. Listado de los valores de la composición química de las muestras de la campaña de octubre 2003. Donde "Tº" es temperatura en ºC; "ALC" es alcalinidad en mg $CaCO_3$/L; "CE" es conductividad eléctrica en µS/cm; y el resto de componentes es en mg/L. Fuente: laboratorio DICTUC. 282

Tabla 7-9. Listado de los valores de la composición química de las muestras dobles de la campaña de octubre 2013. Donde “ALC” es alcalinidad en mg $CaCO_3$/L; “CE” es conductividad eléctrica en µS/cm; y el resto de componentes es en mg/L. Fuente: laboratorio DICTUC 282

Tabla 7-10. Listado de los valores de la composición química de las muestras de la campaña de diciembre 2003. Donde “Tº” es temperatura en ºC; “ALC” es alcalinidad en mg $CaCO_3$/L; “CE” es conductividad eléctrica en µS/cm; y el resto de componentes es en mg/L. Fuente: laboratorio DICTUC. 285

Tabla 7-11 Listado de los valores de la composición química de las muestras dobles de la campaña de diciembre 2013. Donde “ALC” es alcalinidad en mg $CaCO_3$/L; “CE” es conductividad eléctrica en µS/cm; y el resto de componentes es en mg/L. Fuente: laboratorio DICTUC 286

Tabla 7-12. Valores estadísticos de los resultados del laboratorio de las muestras de la primera campaña de terreno, en octubre 2013. Donde “ALC” es alcalinidad en mg $CaCO_3$/L; “CE” es conductividad eléctrica en µS/cm; y el resto de componentes es en mg/L Fuente: elaboración propia. 290

Tabla 7-13. Valores estadísticos por subcuencas de los resultados del laboratorio de las muestras de la primera campaña de terreno, en octubre 2013 Donde “ALC” es alcalinidad en mg $CaCO_3$/L; “CE” es conductividad eléctrica en µS/cm; y el resto de componentes es en mg/L. Fuente: elaboración propia. 291

Tabla 7-14. Valores de los parámetros y las especies químicas obtenidas en el laboratorio de las muestras tomadas en la primera campaña de terreno, octubre 2013 y el error de cada parámetro y de la muestra. Donde “ALC” es alcalinidad en mg $CaCO_3$/L; “CE” es conductividad eléctrica en µS/cm; y el resto de componentes es en mg/L. Fuente: elaboración propia. 292

Tabla 7-15. Coeficiente de correlación de las variables de la composición hidroquímica de las muestras de la primera campaña de terreno de octubre 2013. Donde “ºC” es temperatura, “C.E.” es conductividad eléctrica, “OD” es oxígeno disuelto y “TAC” es la alcalinidad. Fuente: elaboración propia. 294

Tabla 7-16. Valores estadísticos de los resultados del laboratorio de las muestras de la segunda campaña de terreno, en diciembre 2013. Donde “ALC” es alcalinidad en mg $CaCO_3$/L; “CE” es conductividad eléctrica en µS/cm; y el resto de componentes es en mg/L Fuente: elaboración propia. 298

Tabla 7-17. Valores estadísticos por subcuencas de los resultados del laboratorio de las muestras de la segunda campaña de terreno, en diciembre 2013 Donde “ALC” es alcalinidad en mg $CaCO_3$/L; “CE” es conductividad eléctrica en µS/cm; y el resto de componentes es en mg/L. Fuente: elaboración propia. 299

Tabla 7-18. Valores de los parámetros y las especies químicas obtenidas en el laboratorio de las muestras tomadas en la primera campaña de terreno, octubre 2013 y el error de cada parámetro y de la muestra. Donde “ALC” es alcalinidad en $mCaCO_3/L$; “CE” es conductividad eléctrica en µS/cm; y el resto de componentes es en mg/L. Fuente: elaboración propia. 300

Tabla 7-19. Coeficiente de correlación de las variables de la composición hidroquímica de las muestras de la segunda campaña de terreno de diciembre 2013. Donde “ºC” es temperatura, “C.E.” es conductividad eléctrica, “OD” es oxígeno disuelto y “TAC” es la alcalinidad. Fuente: elaboración propia. 302

Tabla 7-20. Listado con los valores del error del balance iónico de las muestras de la campaña octubre 2013. Fuente: elaboración propia..... 304

Tabla 7-21. Valores del error del balance iónico de las muestras dobles tomadas en la primera campaña de terreno, octubre 2013. Fuente: elaboración propia. 305

Tabla 7-22. Listado con los valores del error del balance iónico de las muestras de la campaña diciembre 2013. Fuente: elaboración propia..... 307

Tabla 7-23. Valores del error del balance iónico de las muestras dobles tomadas en la segunda campaña de terreno, diciembre 2013. Fuente: elaboración propia. 308

Tabla 7-24. Constantes de solubilidad (K_s) de la calcita, anhidrita y halita. Fuente: elaboración propia. 309

Tabla 7-25. Valores estadísticos del contenido isotópico (^{13}C, ^{18}O y ^{2}H) de las aguas de la zona de estudio durante la primera campaña de terreno, octubre 2013. Fuente: elaboración propia..... 322

Tabla 7-26. Valores estadísticos por subcuencas del contenido isotópico de las aguas muestreadas durante la primera campaña de terreno (octubre 2013). Fuente: elaboración propia. 323

Tabla 7-27. Valores estadísticos del contenido isotópico (^{18}O y ^{2}H) de las aguas de la zona de estudio durante la segunda campaña de terreno (diciembre, 2013). Fuente: elaboración propia. 324

Tabla 7-28. Valores estadísticos por subcuencas del contenido isotópico ($\delta\ ^{18}O$ y $\delta\ ^{2}H$) de las aguas muestreadas durante la segunda campaña de terreno (diciembre, 2013). Fuente: elaboración propia. 325

Tabla 7-29. Los valores máximos y mínimos aquí representados están referidos a concentraciones, rangos o unidades totales respecto a los elementos o compuestos que corresponda. Todos los que excedan la clase 3 permanecerán a la Clase 4. Fuente: Guía CONAMA. 394

Tabla 7-30. Clasificación de la calidad de aguas según CONAMA (CONAMA, 2004) de las muestras tomadas en la campaña octubre 2013. Fuente: elaboración propia. 397

1 INTRODUCCIÓN

La zona de estudio se localiza en el sector noreste de la II Región de Antofagasta, ver **Figura 1-1**; el límite norte se corresponde con la división entre las Regiones I y II, y el este con la frontera con Bolivia. Al oeste está limitada por la divisoria de aguas que forma la topografía, y el límite sur está marcado por la confluencia entre el río Loa y el río Salado en la localidad de Chiu Chiu. En este área los recursos hídricos son escasos, existiendo como curso de agua principal el río Loa, el cual es el río de mayor longitud de Chile. El río Loa es el sustento hídrico de la actividad agrícola, minera y consumo de agua de boca de la región. En las últimas décadas se ha producido un crecimiento importante en los sectores productivos, es especial en la minería, provocando un aumento en la demanda de agua subterránea.

A partir de los resultados preliminares de la etapa Diagnóstico 2012, la Dirección General de Aguas (DGA), considera necesaria una actualización de la información hidrogeoquímica de la cuenca del río Loa con el fin de contemplarlo en el plan estratégico para la gestión de los recursos hídricos de la región de Antofagasta.

En la Cuenca del Loa se han desarrollado diversos estudios sobre el origen de la recarga y las posibles conexiones entre acuíferos y cuencas existentes. Actualmente se está llevando a cabo un estudio hidroquímico en el sector de la cuenca del río Salado mediante un convenio entre la Dirección General de Aguas y la Comisión Chilena de Energía Nuclear con el fin de determinar la composición química e isotópica de la cuenca del Loa en el sector medio.

Por lo tanto, mediante el presente estudio se amplía el conocimiento en la parte alta de la cuenca del río Loa. Es necesario comprender la hidroquímica e hidrología isotópica y su correlación con diferentes factores, como la estratigrafía y la geología superficial de la zona para dar respuesta a muchos interrogantes existentes en la zona sobre el recurso hídrico existente y su sustentabilidad.

Es importante destacar que para emplear la química del agua como mecanismo para conocer el origen de ésta, su estado de mezcla o el mecanismo con el cual interacciona, es necesario disponer del marco teórico respecto a la forma de interacción del agua con el medio geológico.

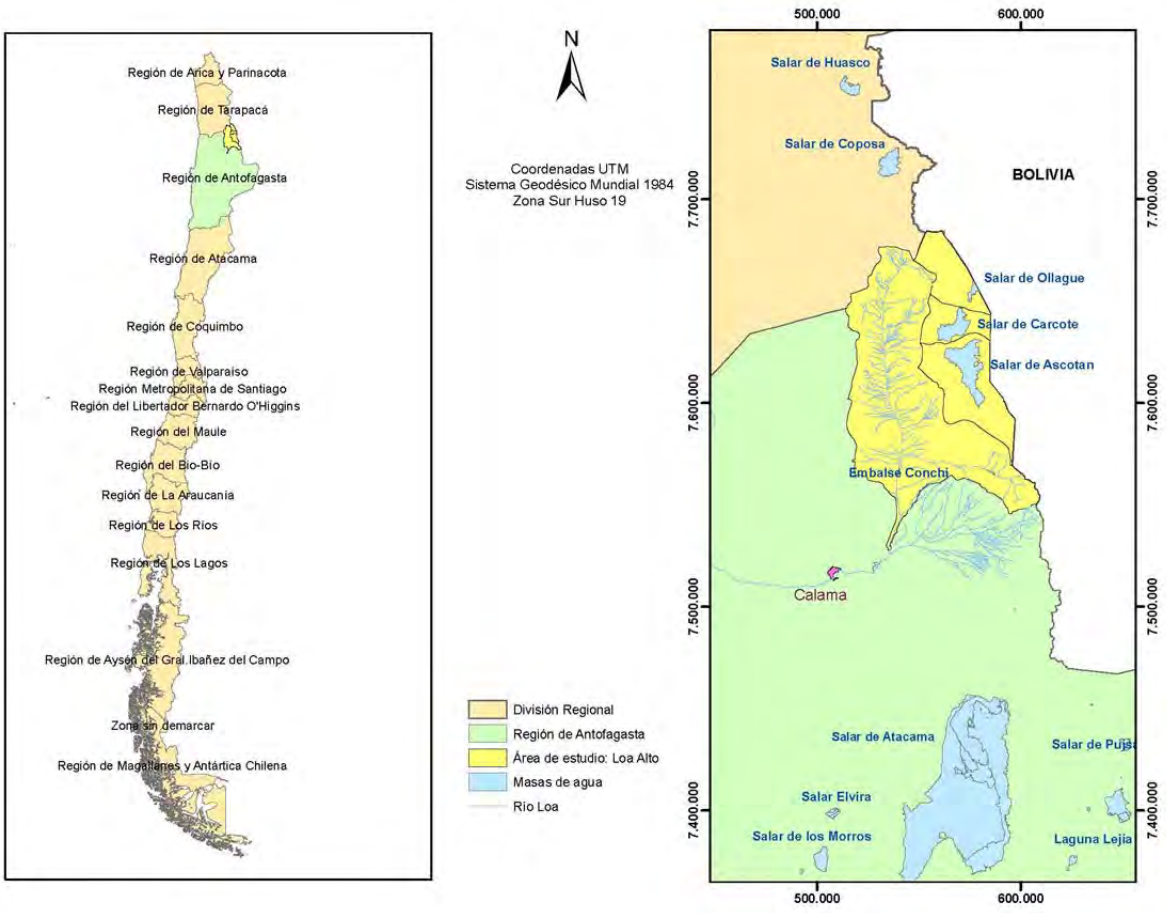


Figura 1-1. Localización de la cuenca del Loa Alto. Fuente: elaboración propia.

1.1 OBJETIVOS

El objetivo general del estudio es el levantamiento de la información hidrogeoquímica e isotópica en la cuenca Loa Alto.

Los objetivos específicos del proyecto son los siguientes:

a) Recopilación de toda la información disponible de química e hidrogeoquímica en la zona de estudio.
b) Monitoreo hidroquímico e isotópico en pozos, vertientes y aguas superficiales a la cuenca.
c) Definición y caracterización de las unidades acuíferas principales en base a la estratigrafía y geología superficial de la zona.
d) Representar y estimar los flujos de agua subterránea.

e) Identificar las zonas de recarga y descarga.
f) Representar territorialmente los resultados del estudio en un SIG.
g) Analizar los resultados obtenidos, relacionando todo el funcionamiento del sistema acuífero.
h) Definir el modelo conceptual del acuífero.

1.2 LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA Y RELACIÓN ENTRE CUENCAS Y SUBCUENCAS

Para el desarrollo del presente estudio, la DGA considera importante trabajar sobre el análisis hidrogeoquímico de la cuenca del Loa Alto. La zona de estudio se localiza en la Región de Antofagasta.

En su totalidad, el río Loa forma una cuenca hidrográfica que supera los 33.570 km², siendo la mayor de Chile y la única exorreica de toda la Región de Antofagasta. El Loa nace cerca de Ollagüe, a los pies del volcán Miño en la cordillera de los Andes, y forma un cañón de más de 150 km en su recorrido hacia el sur hasta llegar al oasis de Chiu Chiu. La cuenca superior del Loa está flanqueada a ambos lados por dos cadenas montañosas longitudinales; el flanco occidental está constituido por la Sierra del Medio con una altitud aproximada de 4.500 metros; en el flanco oriental destacan el cerro Paruma de Portezuelo (5.582 msnm), volcán de Ollagüe (5.868 msnm), cerro Ascotán (5.187 msnm) y el cerro Toconce (5.411 msnm).

En este informe se considera que “la cuenca del Loa Alto” en realidad se compone de un agregado de cuencas y subcuencas, ver **Tabla 1-1**. Algunas de ellas drenan hacia el cauce del Loa y otras no. Para este proyecto, se ha categorizado el área total (8.893 Km^2) en un subconjunto de 7 subcuencas que se acoplan a la cuenca que contiene el cauce principal del río Loa. De acuerdo a esta subdivisión “la cuenca del Loa Alto” se compone de:

- Subcuencas hidrológicamente desconectadas: correspondientes a las subcuencas endorreicas de los salares de Alconcha, Ollagüe, Carcote y Ascotán.
- Subcuenca tributaria eventual: perteneciente a la subcuenca de Pampa Puno, donde se encuentra la Vega Sapunta.
- Subcuenca tributaria permanente: subcuenca del río San Pedro.

- Subcuenca principal: corresponde al resto de la superficie de la cuenca del Loa Alto, desde el nacimiento del Loa Alto hasta antes de la incorporación del río Salado.

SUBCUENCA	TIPO	EXTENSIÓN
Loa Alto	Principal	4.534 km^2
San Pedro	Tributaria permanente	1.054 km^2
Pampa Puno	Tributaria eventual	143 km^2
Ascotán	Hidrológicamente desconectada (endorreica)	1.874 km^2
Carcote	Hidrológicamente desconectada (endorreica)	481 km^2
Ollagüe	Hidrológicamente desconectada (endorreica)	541 km^2
Alconcha	Hidrológicamente desconectada (endorreica)	267 km^2

Tabla 1-1. Separación y caracterización de las diferentes subcuencas dentro de la cuenca del Loa Alto. Fuente: elaboración propia.

En la **Figura 1-2** se muestra la subdivisión realizada y los tamaños relativos de cada una de las subcuencas, las principales carreteras que dan acceso al área de estudio así como la red hídrica existente.

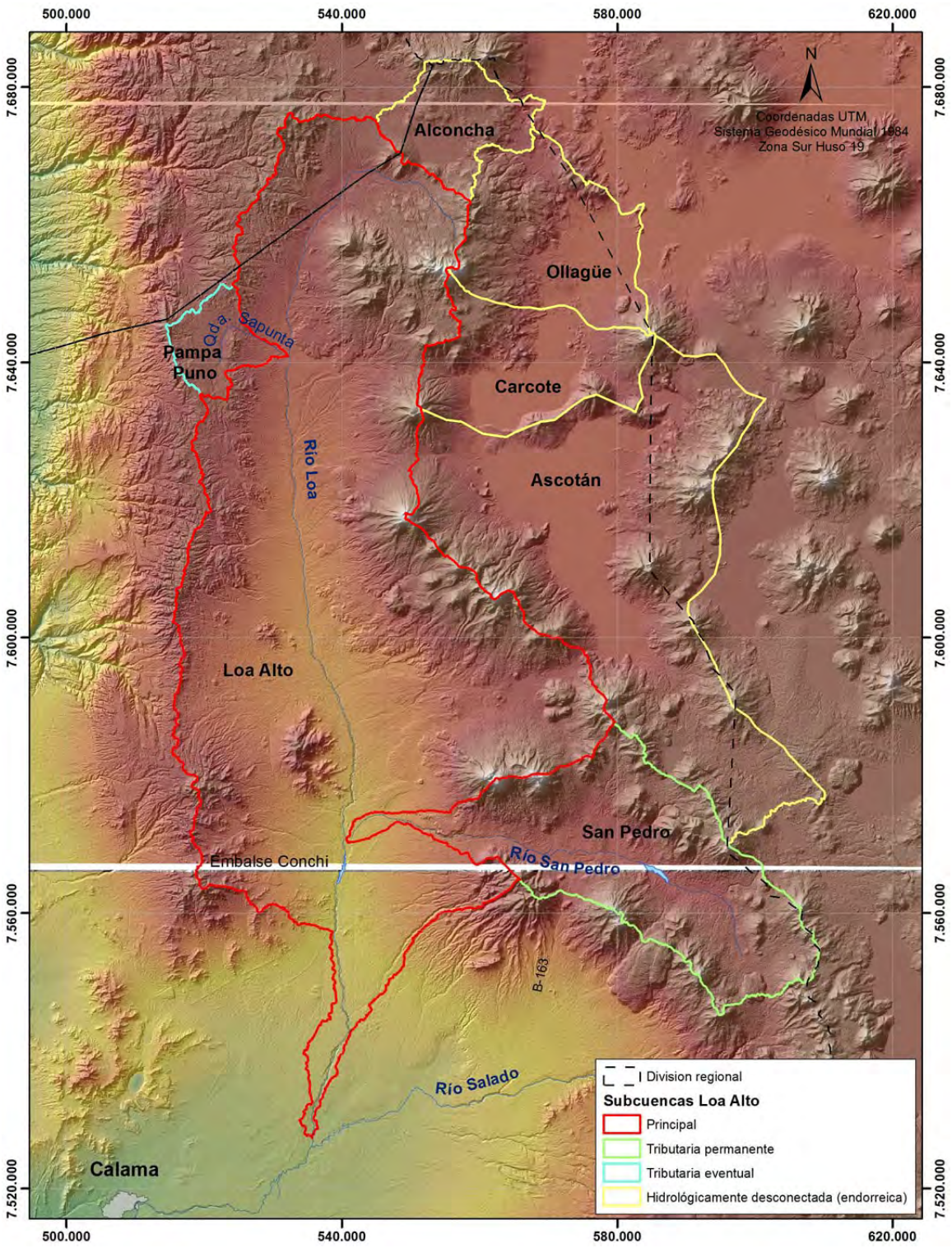


Figura 1-2. Subdivisión en subcuencas realizada por Matraz de la cuenca del Loa Alto. Fuente: elaboración propia.

1.3 ALCANCE DEL ESTUDIO Y ACTIVIDADES.

En este estudio se ha realizado el levantamiento de información geológica, hidrológica, hidrogeológica, hidroquímica e isotópica de la cuenca del Loa Alto y monitoreo de diversos puntos de agua, con el fin de realizar una caracterización hidroquímica e isotópica de la cuenca y las posibles zonas de recarga de las subcuencas. A partir de los resultados obtenidos en el monitoreo se ha relacionado la hidroquímica con la geología, estratigrafía y dirección de flujo de las aguas subterráneas y superficiales, desarrollando un modelo conceptual de la cuenca del Loa Alto.

Para abordar el Proyecto, se han efectuado una serie de actividades con objetivos específicos, ver **Tabla 1-2**.

ACTIVIDADES	RESULTADOS
Revisión antecedentes	Recopilación de información relevante para la comprensión del funcionamiento hídrico del Loa Alto, así como su relación con las subcuencas que engloba.
1ª Campaña de monitoreo	Caracterización hidrogeoquímica de los recursos hídricos del área a partir de los análisis químicos e isotópicos.
Caracterización geológica	Compilación de la información geológica existente, superficial y subsuperficial orientado al conocimiento de las unidades hidrogeológicas.
Estudio de la hidrología	Caracterización hidrológica del área en función de la altura dentro de la cuenca de estudio. Cálculo de volúmenes de precipitación. Comparación entre la precipitación en la subcuenca del Loa y el caudal aforado en el río Loa.
Estudio hidrogeológico	Caracterización de las unidades hidrogeológicas presentes en las subcuencas del Loa Alto y su eventual interrelación. Realización de equipotenciales, mapas con curvas piezométricas y líneas de flujo de agua subterránea.
Análisis de los resultados	Confección de un modelo conceptual preliminar. Informe del balance iónico considerando los datos de la 1ª campaña de monitoreo y los datos históricos recopilados.
2ª Campaña de monitoreo	Caracterización hidrogeoquímica del acuífero a partir de los datos obtenidos en la 1ª y 2ª campaña de monitoreo.
Modelo hidrogeológico e hidrogeoquímico	Desarrollo de los modelos conceptuales preliminares de los acuíferos de cada subcuenca y su relación hidrogeoquímica.
Base de datos y proyecto SIG de los datos disponibles	Elaboración de base de datos y proyecto SIG de los datos recopilados.
Informe Final	Obtención del Informe Final y conclusiones.

Tabla 1-2. Resumen de las actividades del proyecto y los resultados obtenidos en cada una de ellas. Fuente: elaboración propia.

1.4 METODOLOGÍA

El desarrollo de un modelo hidrogeológico conceptual requiere el levantamiento de información en cuatro áreas principales:

- Geología
- Hidrología
- Hidrogeología
- Hidroquímica e isotópica

Cada una de estas cuatro áreas o disciplinas describen las relaciones establecidas en un sistema de recursos hídricos superficiales y subterráneos que cambian y son afectados en el tiempo por el ejercicio climático, evolución geológica y la actividad antrópica. Cuando en un modelo las relaciones en estas áreas operan con coherencia, se puede afirmar que el modelo hidrogeológico conceptual representa adecuadamente el funcionamiento del sistema hídrico.

La metodología aplicada al proyecto está orientada a desarrollar con mayor profundidad la disciplina de la hidroquímica, como una componente básica del modelo hidrogeológico conceptual, y realizar una recopilación exhaustiva de las otras 3 componentes (geología, hidrología e hidrogeología). En este sentido, la metodología propuesta a continuación permitió lograr una compilación de estas áreas e integrarlas en un único modelo que servirá de base para la gestión de los recursos hídricos de la cuenca del Loa Alto.

A continuación se describe y detalla la metodología seguida para desarrollar los objetivos del estudio.

1.4.1 RECOPILACIÓN Y ANÁLISIS DE ANTECEDENTES

Se ha efectuado una completa recopilación de los estudios básicos y antecedentes (informes, estudios, tesis, expedientes, estadísticas y datos puntuales) provistos por la Dirección General de Aguas (DGA), Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), entre otros. Adicionalmente, para el desarrollo del trabajo se considera:

a) Información hidrológica: referida a caudales, aforos puntuales, precipitaciones y niveles freáticos entre otros datos, que la DGA ha facilitado.

b) Información de carácter geológico e hidrogeológico: correspondiente a antecedentes sobre las formaciones, rellenos sedimentarios, localización de basamento, singularidades, cartas geológicas e hidrogeológicas, informes sobre prospecciones geofísicas, sondajes,

antecedentes de estratigrafía de pozos, pruebas de bombeo, prospecciones geofísicas y perfiles estratigráficos entre otra información. Todo lo anterior sólo en base a antecedentes ya existentes.

c) Información cartográfica: básicamente referida a mapas e imágenes satelitales que han sido utilizados para la laboración del presente trabajo. También se ha empleado la biblioteca digital que dispone Matraz sobre la cuenca del Loa Alto.

d) Información sobre usos y derechos de aprovechamiento de aguas: catastro de desrechos subterráneos constituidos 1990-2012 de la DGA.

e) Información sobre calidad de aguas de la red de monitoreo de la DGA.

f) Información sobre caudales de reserva para áreas de interés nacional.

g) Información sobre infraestructura existente, tales como canales de regadío, embalses y tranques entre otros; detallando sus características físicas (largo, recubrimiento, filtraciones, superficie) y operacionales (reglas de operación).

h) Revisión de expedientes de solicitudes de derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas, identificando ubicación de pozos, niveles de agua subterránea, datos de pruebas de bombeo y estratigrafía de pozos. El análisis de pruebas de bombeo ha servido para identificar zonas de mayor o menor transmisividad, lo que ha sido corroborado con la información estratigráfica de los sondajes. Los antecedentes de niveles estáticos de agua subterránea se han utilizado para generar mapas de curvas equipotenciales por periodos. Este tipo de mapas han servido para identificar la dirección de los flujos principales de agua subterránea, los órdenes de magnitud de éstos y su variación en el tiempo.

Por cada estudio revisado se genera una ficha que contiene una breve reseña y describe la relevancia que tiene para este informe.

1.4.2 CAMPAÑAS DE TERRENO

En este apartado se presenta el diseño y desarrollo de las 2 campañas de terreno realizadas en la cuenca del Loa Alto durante la ejecución del Proyecto. La primera campaña de terreno se ha llevado a cabo en el mes de octubre de 2013 y la segunda en el mes de diciembre de 2013. En cada una de estas campañas se realiza la toma de muestras en 60 puntos, completando un total de 120 muestras para su análisis químico e isotópico. Dentro del conjunto de 120 puntos muestreados, se miden niveles freáticos en

11 puntos durante la primera campaña y en 15 puntos en la segunda, también en la segunda campaña se realiza la medida de 12 aforos del cauce del río Loa, distribuidos homogéneamente a lo largo de toda la cuenca.

1.4.3 CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA

Las unidades geológicas dan forma a la geometría de los medios acuíferos y por tanto regulan buena parte de las características del medio. En la biblioteca digital de Matraz se cuenta con numerosos trabajos con información geológica del Loa Alto, algunos de los cuales contienen perfiles geológicos de las zonas de interés. A partir de esta información junto con la recopilación de antecedentes adicionales, se presenta una descripción geológica detallada, en la que se incluyen perfiles geológicos para la definición de las subcuencas. Esta caracterización permite entender la geometría acuífera de las subcuencas y de esta forma sustentar la modelación conceptual general.

1.4.4 CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA

Se ha realizado una caracterización hidrológica de la cuenca del Loa Alto considerando las estaciones disponibles de la red hidrométrica de la DGA. Con la información recopilada en los antecedentes y los datos de las estaciones meteorológicas de la DGA se ha realizado un análisis y caracterización de las variables meteorológicas de la zona de estudio. Estas variables son las precipitaciones, temperaturas y evapotranspiración.

Se han definido los límites de las subcuencas a partir del criterio topográfico, para lo cual se han construido Modelos Digitales de Elevaciones mediante el software ArcGIS y la cartografía digital. Se ha aplicado el módulo Hydrology de ArcGIS que determina las direcciones de las corrientes y simula los escurrimientos superficiales o red de drenaje. Mediante esta información generada y con las curvas de nivel de la zona de estudio se han delimitado las divisorias de aguas de las diferentes subcuencas. Este programa ha permitido obtener de forma inmediata los parámetros morfológicos de las subcuencas, relativos a la forma, relieve y red de drenaje.

Mediante la combinación del análisis meteorológico y de la caracterización morfológica de las subcuencas, se realiza un balance hidrológico. Para las cuencas endorreicas todo el agua que proviene de la precipitación y no se pierde por evapotranspiración, finalmente forma parte de la recarga del salar, es decir, no se separa la escorrentía superficial de la subterránea. De esta forma se ha obtenido la recarga en cada cuenca endorreica. En las cuencas exorreicas el agua que no se pierde por evapotranspiración equivale a la

escorrentía total. En este caso, se ha comparado este valor con las estaciones de aforo de la DGA para separar la componente superficial de la subterránea.

Finalmente se ha realizado un análisis de los caudales en el río Loa. El objetivo es detectar la existencia de aumentos y/o disminuciones de caudales que sean significativos. Para ello, se ha estudiado la relación existente entre los caudales aforados en el río Loa y la precipitación recogida en el área. Adicionalmente se han obtenido relaciones entre los parámetros de la cuenca (superficie, pendiente media, altitud media, longitud y red hídrica) y los caudales constituidos a régimen natural.

1.4.5 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA

La caracterización hidrogeológica de la cuenca del Loa Alto corresponde al estudio hidrogeológico en base a la definición del marco geológico y geomorfológico de la zona, así como a la información piezométrica disponible (equipotenciales) y características elásticas de los medios acuíferos. Se considera toda la información sobre mapas hidrogeológicos, prospecciones existentes, estratigrafía de sondajes, informes hidrogeológicos asociados a pozos, estudios de modelación de aguas subterráneas, informes de monitoreos de empresas mineras entre otros.

La generación de equipotenciales tiene como objetivo la caracterización del flujo de agua subterránea. A partir de la medición de las cotas de la superficie piezométrica en al menos 3 puntos conectados entre sí se pueden trazar líneas equipotenciales, y un conjunto de éstas a su vez permiten caracterizar las direcciones regionales y locales (dependiendo de la distancia entre los puntos de medición) del flujo subterráneo. La extensión de la zona, la separación entre los puntos de medición de nivel freático, la falta de accesibilidad a la mayoría de los pozos privados, junto con la accidentada topografía de la zona han dificultado la medición de una red de puntos mínima para construir un mapa piezométrico contínuo. No obstante, a partir de las cotas de los manantiales, cursos superficiales y de los pozos en los que sí se pudo realizar la medición del nivel estático del agua, se presenta un mapa con puntos y cota de agua subterránea a nivel regional.

1.4.6 CARACTERIZACIÓN HIDROQUÍMICA E ISOTÓPICA

La componente hidroquímica e isotópica es la base de este proyecto. A partir de la caracterización hidroquímica se logra caracterizar el modelo conceptual de la cuenca del Loa Alto. A partir de los datos hidroquímicos obtenidos en las campañas de terreno y de la recopilación de antecedentes se identifican las diferentes marcas hidroquímicas de cada

subcuenca. De esta manera se pueden ver las diferencias y similitudes entre ellas, ver el origen del agua además de su interacción con los materiales geológicos desde su infiltración hasta su punto de muestreo. A partir de la caracterización hidroquímica de las muestras de agua y su posterior análisis comparativo se pueden observar procesos de mezcla, interacciones de las aguas subterráneas y superficiales, procesos de disolución/precipitación y evaporación entre otros.

La caracterización isotópica, junto con la caracterización hidroquímica, permite identificar los diferentes componentes del ciclo hídrico de la cuenca. Desde el origen del agua subterránea, las altitudes de recarga, la interacción de las aguas superficiales con las subterráneas (río-acuifero) y la interacción agua-roca. A su vez, los isótopos permiten identificar los procesos físicos a los que el agua está sometida, como los procesos de evaporación, condensación y dilución entre otros.

1.4.7 MODELO CONCEPTUAL DEL ACUÍFERO

Se desarrolla un modelo conceptual mediante la elaboración de una serie de fases interdependientes que incluyen la recolección de datos en el terreno, el análisis de esta información de terreno, presentación de los resultados y posterior visualización gráfica. La visualización de los resultados puede llevar a redefinir y actualizar el modelo conceptual a la vez que aporta conclusiones para el caso en estudio (**Figura 1-3**).

De este modo, se realiza una interpretación de los datos más relevantes catastrados en la revisión de antecedentes, y de los datos y observaciones extraídos de las campañas de terreno. Una vez interpretada esta información geológica, hidrológica, hidrogeológica, química e isotópica por separado se cruza toda la información de estas disciplinas para conseguir una caracterización del sistema hídrico en su conjunto. De esta forma, se refleja el conocimiento integrado de todos los aspectos de la cuenca.

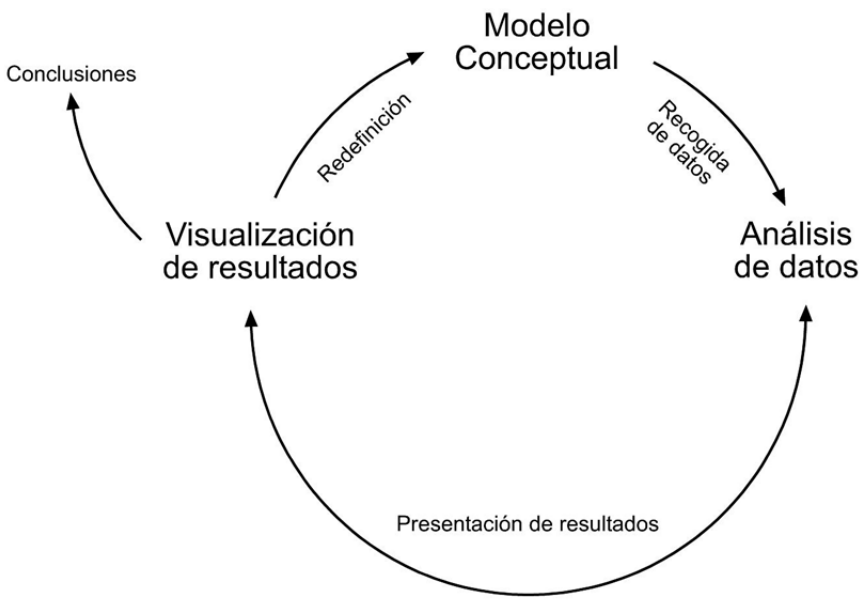


Figura 1-3. Fases para la obtención del modelo conceptual y conclusiones. Fuente: modificado de *Kresic & Mikszewski, 2013*.

1.4.8 CONCLUSIONES

Se presentan las conclusiones que consideran la caracterización geológica, hidrológica, hidrogeológica e hidroquímica del acuífero, y el balance iónico en cada una de las campañas de monitoreo hidroquímico. A partir de la integración de las 4 disciplinas estudiadas se definen los modelos conceptuales preliminares de los acuíferos existentes en las 7 subcuencas que componen la zona de estudio y se analiza la posible conexión entre diferentes subcuencas.

Toda la información obtenida y utilizada con fines para este proyecto, incluidos planos, figuras, tablas Excel, fotos y proyecto SIG generados durante la realización del presente estudio, se entrega conjuntamente con el Informe Final.

2 RECOPILACIÓN Y ANÁLISIS DE ANTECEDENTES

La recopilación de antecedentes y análisis de la información existente ha tenido como objetivo principal establecer una compilación base de todos los trabajos geológicos e hidrogeológicos publicados en la cuenca del Loa Alto a la fecha, y de esta forma convertirse en un documento de referencia para todo aquel lector que necesite obtener información sobre los trabajos públicos realizados sobre recursos hídricos de la región. Para esto, se ha contado con 37 trabajos de diversa índole, entre las que se listan en orden cronológico:

- NIEMEYER, Hans. Estudio de la contaminación del río Loa. Dirección General de Aguas (DGA). Santiago, 1968. 73 p.
- LINGSCH, Mario. Modelo de simulación y planificación hidrológico y de constitución química: su aplicación a la cuenca del río Loa, Provincia de Antofagasta. Departamento de Estudios y Planificación. Santiago, 1975-1976. 350 p.
- CORFO, DGA, CCC, ONU. Investigación de recursos hidráulicos en el Norte Grande. Hidrogeología de la región de Ojos de San Pedro. Proyecto CHI-535, Santiago, 1977. 60 p.
- ESPILDORA, Basilio, et al. Estudio hidrológico y operacional del sistema embalse Conchi – río Loa. Ministerio de Obras Públicas. Dirección de Riego. Santiago, Febrero, 1979. 210 p.
- NIEMEYER, Hans. Hoyas Hidrográficas de Chile, Segunda Región. Dirección General de Aguas (DGA), Santiago. 1980-90. 97 p.
- RAMÍREZ, Carlos .F. y HUETE, Carlos. Hoja Ollagüe, Región de Antofagasta. Serie Carta Geológica de Chile escala 1:250.000. Instituto de Investigaciones Geológicas (IIG). Santiago, 1981. 47 p.
- GEODATOS LIMITADA. Estudio geofísico cuenca Ojos de San Pedro-Incaliri. Informe resumen. Corporación Nacional del Cobre, División Chuquicamata. Santiago. 1985. 42 p.
- AGUA INGENIEROS CONSULTORES LIMITADA. Servicios de asesoría para la prospección Hidrogeológica del Alto Loa, cuenca río San Pedro-Inacaliri. Corporación Nacional del Cobre, División Chuquicamata, Santiago, 1985. 76 p.
- GEODATOS LIMITADA. Estudio geofísico cuenca Ojos de San Pedro-Inacaliri. Revisión de avance Nº4. Corporación Nacional del Cobre, División Chuquicamata. Santiago. 1986. 13 p.

- GEODATOS LIMITADA. Estudio geofísico cuenca Ojos de San Pedro-Inacaliri. Revisión de resultados. Corporación Nacional del Cobre, División Chuquicamata. Santiago, Septiembre, 1986. 12 p.
- DIRECCIÓN GENERAL DE AGUA. Balance hidrológico nacional, II Región. Departamento de hidrología, subdepartamente de estudios hidrológicos, Santiago, 1986. 173 p.
- FALCÓN, Eduardo. Volumen de agua subterránea almacenada en la cuenca San Pedro-Inacaliri, Segunda Región. Corporación Nacional del Cobre, Santiago. 1987. 4 p.
- ARAVENA, Ramón; SUZUKI, Osamu. Isotopic Evolution of River Water in the Northern Chile Region. Water Resources Research. Vol. 26, Nº12, , 1990. 2887-2895 p.
- CICA INGENIEROS CONSULTORES. Estudios Ambientales por extracción de aguas subterráneas en la cuenca del salar de Ascotán. Corporación Nacional del Cobre-División Chuquicamata, Santiago, 1998. 400 p.
- MARDONES, Léonardo. Flux et évolution des solutions salines dans les systèmes hydrologiques des salars d´Ascotán et d´Atacama. Tesis Doctoral. Universidad de Paris-Sur. Paris. 1998. 203 p.
- RISACHER, François, et al. Geoquímica de aguas en cuencas cerradas: I, II y III Regiones – Chile. S.I.T Nº51. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas (DGA)-UCN-IRD. Santiago, Enero, 1999. 299 p.
- TOMLINSON, Andrew., et al. Geología de la precordillera Andina de Quebrada Blanca-Chuquicamata, Regiones I y II (20º30'-22º30'S). Servicio Nacional de Geología y Minería. Santiago, 2001. 455 p.
- INGEOREC LIMITADA. Hidrogeología y modelo de simulación Pampa Puno. Corporación del Cobre, División Chuquicamata. Santiago, 2001. 237 p.
- FERROCARRIL DE ANTOFAGASTA A BOLIVIA. Estudio hidrogeológico y modelo de simulación, sector estación Polapi, II Región. Dirección General de Aguas. Santiago. 2003. 350 p.
- DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS. Evaluación de los recursos hídricos, sectores Calama y Llalqui, cuenca del río Loa. S.I.T. Nº 85 Dirección General de Agua (DGA). Departamento de Estudios y Planificación. Santiago, Mayo, 2003. 113 p.
- IGSA CONSULTORES. Evaluación de Impacto Ambiental Proyecto Extracción Minera en Salar de Carcote. Sociedad Química y Minera de Chile (SQM). Santiago. 311 p.

- CADE-IDEPE CONSULTORES EN INGENIERÍA. Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad, Cuenca río Loa. Dirección General del Agua (DGA), Santiago, 2004. 149 p.
- DICTUC. Hidrogeología de la II región y asesoría para la revisión de informes de estudios de evaluación de recursos hídricos. Dirección General de Aguas (DGA), Santiago, 2005. 309 p.
- MAY, Geoffrey. et al. Eocene to Pleistocene lithostratigraphy, chronostratigraphy and tectono-sedimentary evolution of the Calama Basin, northern Chile. Revista Geológica de Chile, Vol. 32, Nº1. 2005. 33-58 p.
- DIRECCIÓN GENERAL DE AGUA. Sistematización, especialización y análisis de datos isotópicos en muestras de agua del norte de Chile, DSDT-221. Departamento de estudios y planificación, Dirección General del Agua (DGA), Santiago, Junio, 2005. 91 p.
- VILLABLANCA, Daniela; HERRERA L., Christian; PUEYO M., Juan José. Uso de perfiles de conductividad eléctrica e isótopos estables para estudiar la relación de agua dulce-agua salada: Salar de Ascotán. Congreso Geológico Chileno, Antofagasta, Agosto, 2006. 4 p
- SGA LIMITADA. Declaración de Impacto Ambiental Proyecto Estudio hidrogeológicos salar de Alconcha. Anexo Nº3, Estudio de Línea Base. Cía Minera Quebrada Blanca. Santiago, 2007. 112 p.
- MUÑOZ P, J. 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. Parte III: Hidrología Regional del Altiplano de Chile. S.I.T. Nº 157. Ministerio de obras públicas, Dirección general de Aguas (DGA). Santiago, 2008. 155 p.
- GP CONSULTORES LIMITADA. Plan de alerta temprana de Pampa Puno del proyecto Suministro, construcción y operación de aducción Pampa Puno. Corporación Nacional del Cobre, Santiago, 2008. 166 p.
- SCHLUMBERGER WATER SERVICES CHILE LIMITADA. Actualización del modelo conceptual hidrogeológico y desarrollo de un modelo numérico. Plan de manejo ambiental. Salar de Ascotán. Sociedad Contractual Minera EL ABRA. Santiago, 2009. 64 p.
- VILLABLANCA, Daniela. Estudio de la relación isotópica $\delta^{18}O/\delta^{2}H$ de los manantiales en el sector de las nacientes del Loa, Región Antofagasta. XII Congreso Geológico Chileno, Santiago, Noviembre, 2009. 4 p.

- TASSI, F.; AGUILERA, F.; DARRAH, T.; VASELLI, O.; CAPACCIONI, B. ; POREDA, R.J. ; DELGADO, A. . Fluid geochemistry of hydrothermal systems in the Arica-Parinacota, Tarapacá and Antofagasta regions (northern Chile). En : Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2010. 15 p.
- ARCADIS CHILE. Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Sistema de impulsión de agua Lequena –Ujina. Capítulo 2 linea de base, geología, geomorfología y riesgo. Compañía minera Doña Inés de Collahuasi SCM (CMDIC). Santiago, 2011. 19 p.
- AQUATERRA INGENIEROS LIMITADA. Estimación de recargas en cuencas altiplánicas y precordilleranas de vertiente pacífica. Dirección General del Agua (DGA), Santiago, 2011. 205 p.
- DIRECCIÓN GENERAL DE AGUA. 2012. Diagnóstico plan estratégico para la gestión de los recursos hídricos, Región de Antofagasta. Santiago, Diciembre, 2012. 68 p.

Para resumir el gran volumen de información existente, en este capítulo de revisión de antecedentes se ha dispuesto la información bajo la estructura que define el modelo hidrogeológico conceptual clásico:

- Geología
- Hidrología
- Hidrogeología
- Hidroquímica e isotópos
- Balance Hídrico

En consecuencia, la información se ha clasificado por temáticas y en orden cronológico (de más antiguo a más reciente). A su vez, en cada subsección temática se enumeran los informes utilizados junto a un breve resumen de su contenido, por lo que al recorrer este capítulo se notará que algunos informes se repiten entre subsecciones. Esto último ocurre especialmente en el caso de los trabajos más relevantes desde el punto de vista del presente estudio.

2.1 GEOLOGÍA

Se ha reunido toda la información geológica existente en la zona de estudio para lograr un entendimiento integral del funcionamiento geológico. Se presenta una síntesis de cada uno de los 9 estudios que fueron considerados sustantivos para este proyecto.

RAMÍREZ, Carlos .F. y HUETE, Carlos. Hoja Ollagüe, Región de Antofagasta. Serie Carta Geológica de Chile escala 1:250.000. Instituto de Investigaciones Geológicas (IIG). Santiago, 1981. 47 p.

La geología de la Hoja de Ollagüe de escala 1:250.000 interpreta parte de la geología de la cordillera de los Andes, entre las coordenadas geográficas 21º00´y 22º00´latitud sur y 69º00´lontigud oeste y la frontera con Bolivia, abarcando un área de 9.000 km^2 de rocas de edad comprendida entre Paleozoico y Cenozoico Superior.

La geología de la parte occidental de la hoja está basada en los levantamientos geológicos escala 1:50.000, realizados por el Instituto de Investigaciones Geológicas (IIG) en conjunto con Metal Mining Agency of Japan, mientras que en el sector oriental la geología se basa en un reconocimiento fotogeológico con observaciones de terreno efectuadas en 1978.

Este estudio narra la historia geológica existente desde el Paleozoico hasta el Cuaternario, las características estructurales de la zona de estudio completa y las diferentes formaciones geológicas que afloran en la zona de investigación. Además este informe es complementario a un mapa geológico escala 1:250.000, **Figura 2-1,** y tres perfiles geológicos en dirección este-oeste, **Figura 4-2,** los cuales se han incluido en el apartado de caracterización geológica (Capítulo 4).

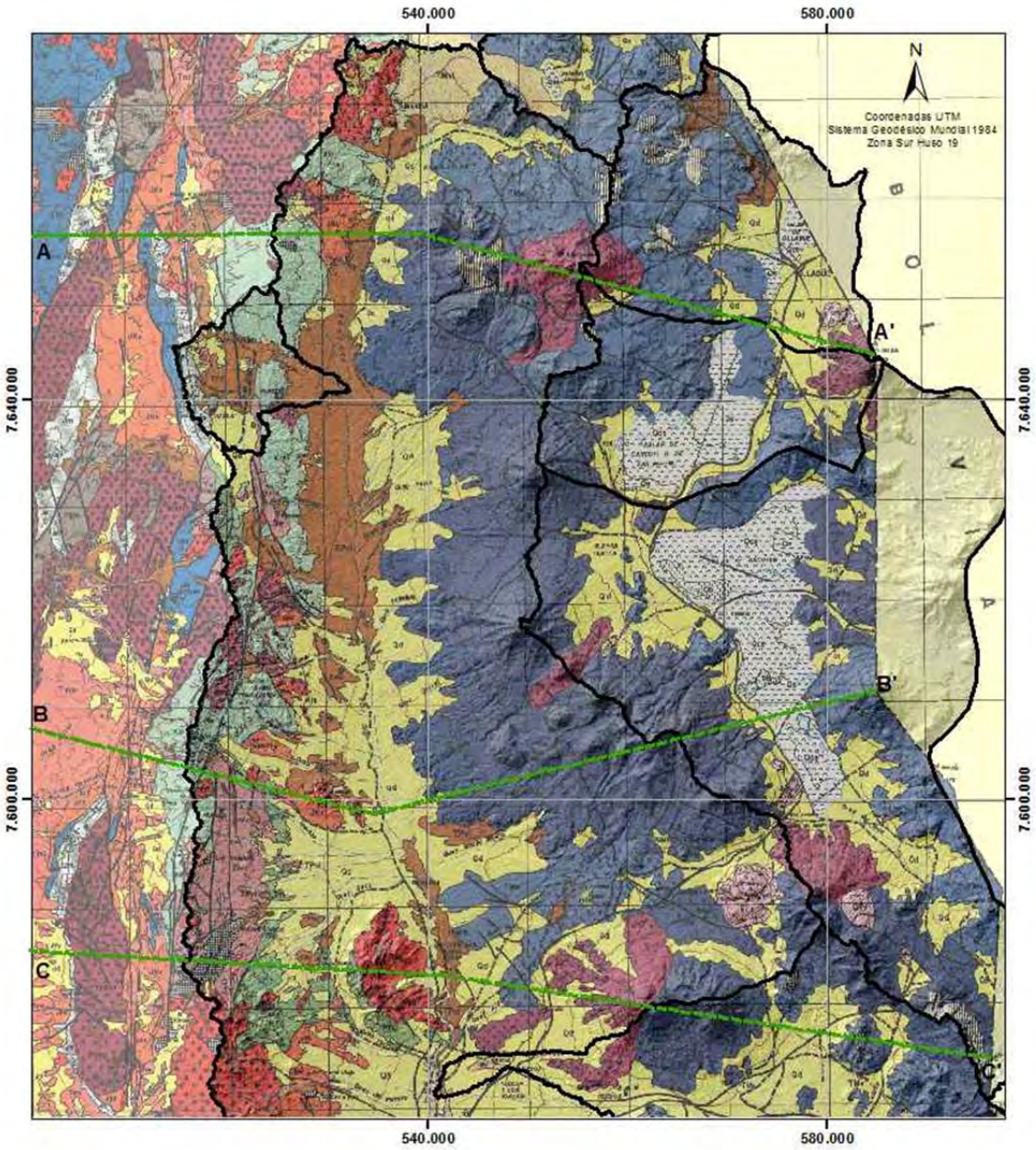


Figura 2-1. Mapa geológico de la zona de estudio, escala 1:250.000. Fuente: modificado de Ramírez y Huete, 1981.

GEODATOS LIMITADA. Estudio geofísico Cuencas Ojos de San Pedro-Inacaliri. Revisión de resultados. Corporación Nacional del Cobre-División Chuquicamata. Santiago, 1986. 13 p.

A partir de los sondajes eléctricos verticales realizados en la subcuenca de San Pedro y los perfiles de sísmica de refracción y un perfil gravitacional recopilados, Geodatos identifica tres unidades geológicas, el tipo de estructura que existe en el sector de Ojos de San Pedro y estima el volumen almacenado en la Unidad Hidrogeológica II.

De todas las secciones que se realizaron, se ha seleccionado como representativo el Perfil San Pedro Nº2, que se localiza en la el centro de la cuenca de San Pedro. En la **Figura 2-2** se verifica la estructura tipo *graben* presente en este sector y la existencia de 3 unidades hidrogeológicas. En esta sección se presenta la unidad hidrogeológica I constituida por sedimentos cuaternarios, una unidad hidrogeológica II formada por andesitas fracturadas de poco espesor y las unidad hidrogeológica III correspondiente a ignimbritas.

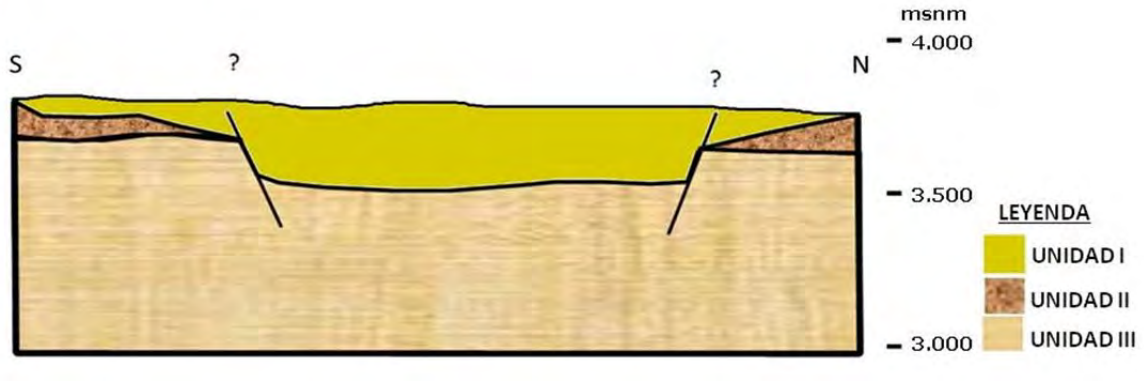


Figura 2-2. Sección Geoeléctrica Perfil San Pedro Nº2. Fuente: Geodatos, 1986.

CICA INGENIEROS CONSULTORES. Estudios Ambientales por extracción de aguas subterráneas en la cuenca del salar de Ascotán. Corporación Nacional del Cobre-División Chuquicamata, Santiago, 1998. 400 p.

En este documento CICA (CICA, 1998) describe la historia geológica de la zona de estudio desde el Mioceno Medio hasta la actualidad, la tectónica regional y las estructuras locales del Salar de Ascotán. Se catalogan las unidades geológicas en superficiales y en subsuperficiales, y se incluye un bloque diagrama esquemático de las unidades geológicas subsuperficiales de la subcuenca de Ascotán, **Figura 2-3**. Este

estudio es relevante para la descripción detallada de las características estructurales del salar de Ascotán.

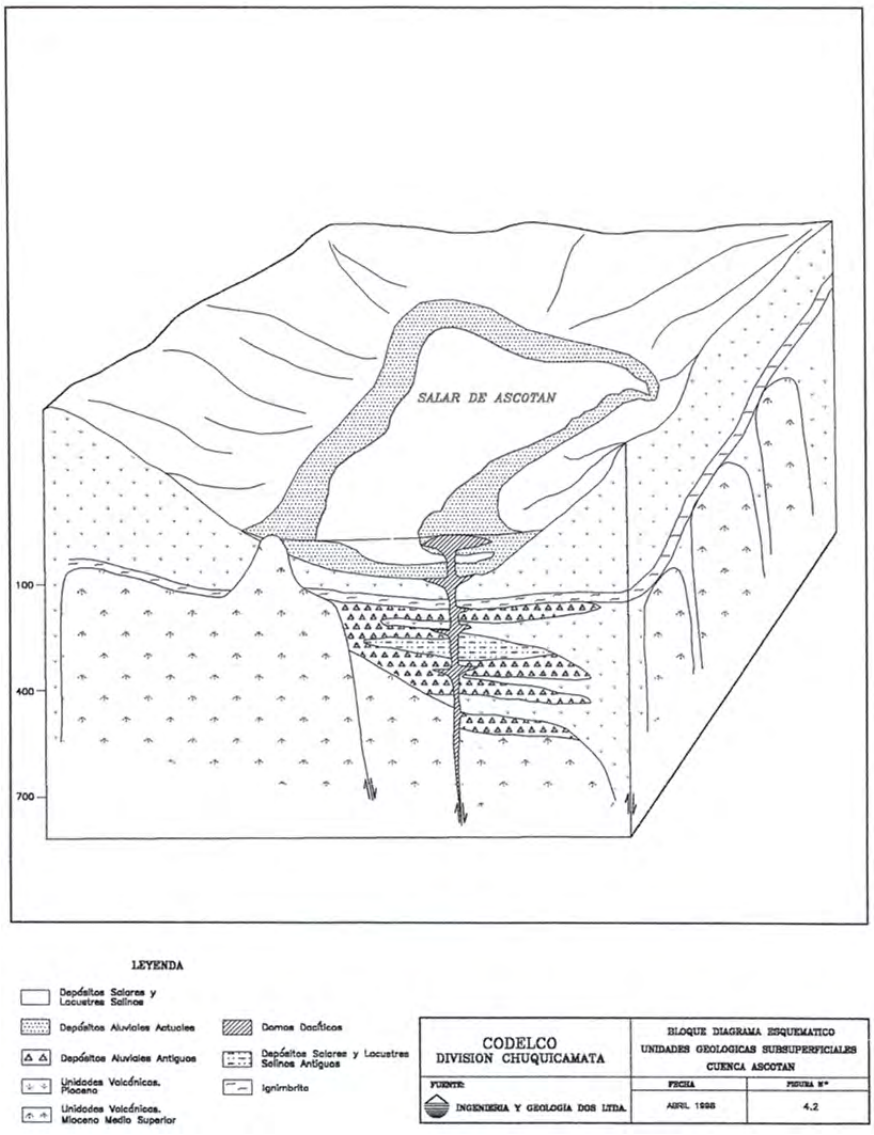


Figura 2-3. Bloque diagrama esquemático, unidades geológicas subsuperficiales de la subcuenca de Ascotán. Fuente: CICA, 1998.

TOMLINSON, Andrew J.; BLANCO P, Nicolás; MAKSAEV J., Víctor; DILLES, John H.; GRUNDER, Anita L.; LADINO U., Marco. Geología de la precordillera Andina de Quebrada Blanca-Chuquicamata, Regiones I y II (20º30'-22º30'S). Servicio Nacional de Geología y Minería. Santiago, 2001. 455 p.

Este informe es uno de los estudios más completos a nivel geológico de la zona de estudio. Analiza la estratigrafía y litología desde el Paleozoico Inferior hasta el Neógeno y las estructuras existentes en la área comprendida entre las latitudes 20º30'-22º30' sur y 69º00´-69º15´ oeste. Adicionalmente, se incluyen unos anexos en los que se citan las dataciones radiométricas realizadas en la zona y su ubicación, el listado de fósiles y el de yacimientos existentes en dicha área.

Cabe destacar que en el capítulo caracterización geológica se incluyen las figuras en las que se presenta la columna estratigráfica tipo y la interpretación de cada miembro de la Formación Sichal y la distribución de los afloramientos de las dos unidades ignimbríticas en el área de investigación. En la **Figura 2-4** se muestra la columna estratigráfica correspondiente a la Formación Tolar.

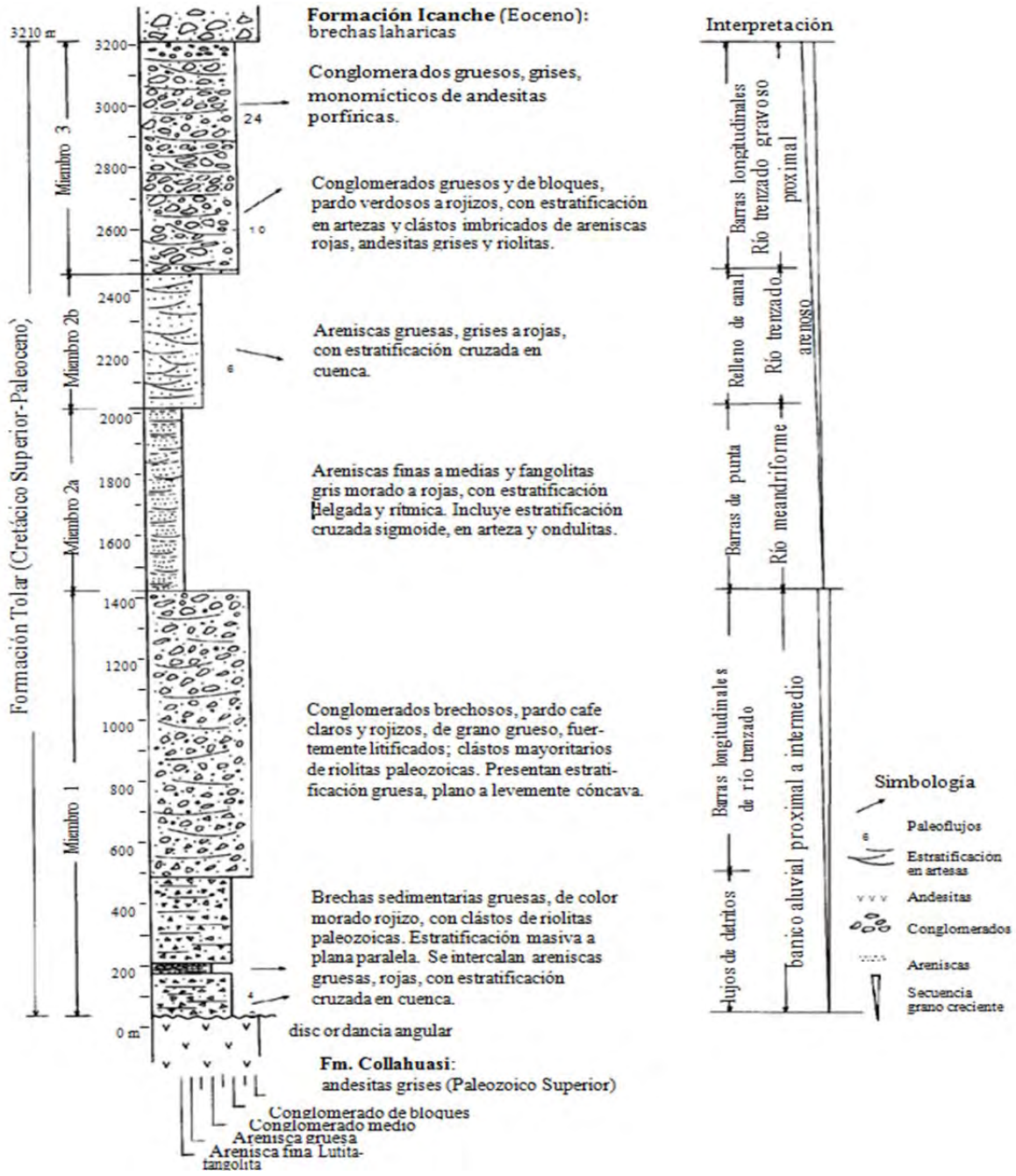


Figura 2-4. Columna estratigráfica Formación Tolar, levantado en quebrada Millo. Fuente: Tomlinson *et al*., 2001.

IGSA CONSULTORES. Evaluación de Impacto Ambiental Proyecto Extracción Minera en Salar de Carcote. Sociedad Química y Minera de Chile (SQM). Santiago, 2004. 311 p.

En el capítulo de caracterización del área de influencia incluida en la Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) que realiza la consultora IGSA para el Proyecto *"Extracción Minera en salar de Carcote"* de SQM S.A. se define el marco geológico de la subcuenca del salar de Carcote.

Las unidades geológicas identificadas engloban las rocas presentes desde la cordillera prealtiplánica hasta el Altiplano, que cronológicamente comprenden desde el Terciario al Cuaternario. Estas unidades se identifican y describen en el capítulo caracterización geológica (Capítulo 4). Además, se han obtenido las características estructurales detalladas de la subcuenca de Carcote.

DICTUC. Hidrogeología de la II región y asesoría para la revisión de informes de estudios de evaluación de recursos hídricos. Dirección General de Aguas (DGA), Santiago, 2005. 309 p.

En este informe se presenta el estudio hidrogeológico de la subcuenca del salar de Ollagüe, de Carcote y de Ascotán. En cada estudio se incluye el marco geológico que describe de un modo resumido las unidades geológicas que afloran en cada salar y las estructuras existentes.
Contiene el mapa geológico de cada salar, el perfil geológico en el que se identifican las unidades hidrogeológicas del salar de Ollagüe, el perfil geológico de los pozos, **Figura 2-5,** y un esquema del modelo geológico e hidrogeológico y varios perfiles geológicos e hidrogeológicos del sector sureste del salar de Ascotán.
Al tratarse de un estudio muy general de cada salar no se ha obtenido información geológica nueva, pero se ha considerado para verificar información de otros informes recopilados. Las figuras ayudan a comprender mejor el sistema hidrogeológico del Salar de Ollagüe y de Ascotán.

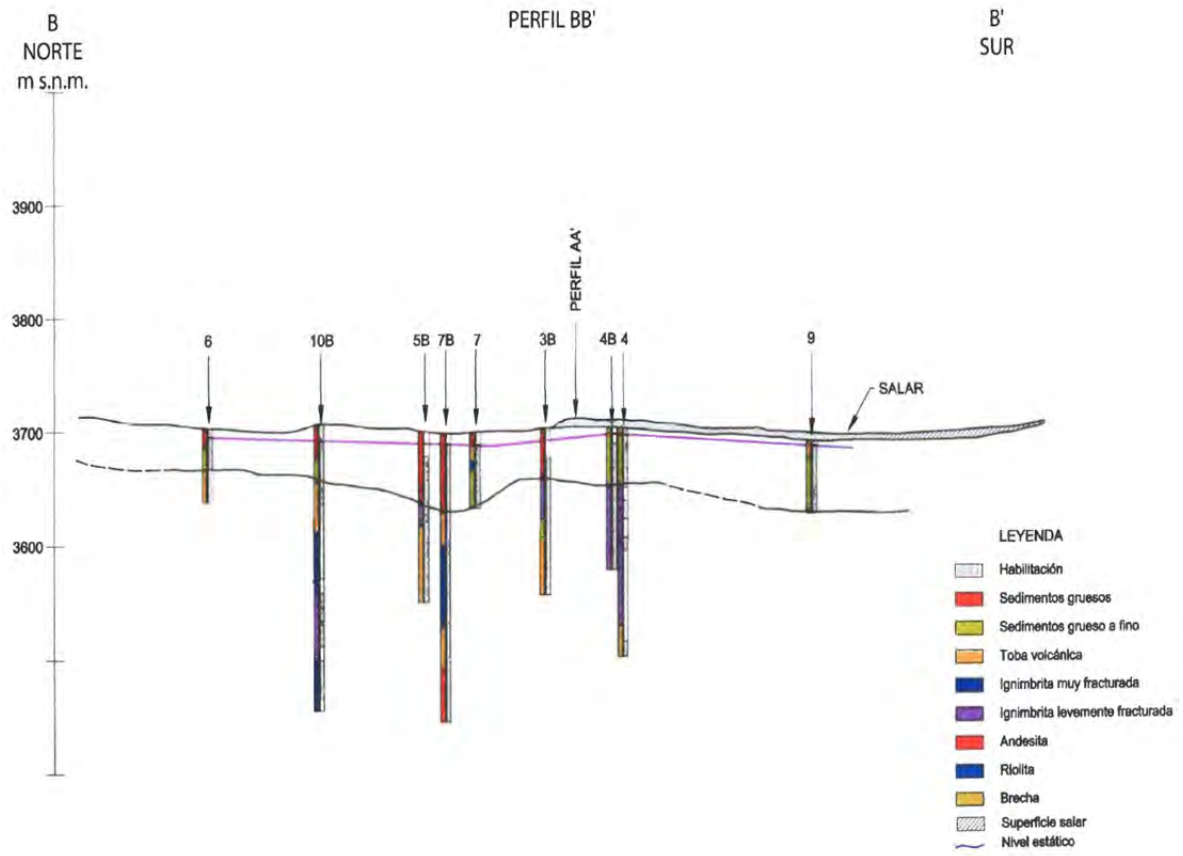


Figura 2-5. Perfil BB´ que muestra la geología de norte a sur del salar de Ollagüe. Fuente: DICTUC, 2005.

MAY, Geoffrey. et al. Eocene to Pleistocene lithostratigraphy, chronostratigraphy and tectono-sedimentary evolution of the Calama Basin, northern Chile. Revista Geológica de Chile, Vol. 32, Nº1. 2005. 33-58 p.

En el estudio de MAY se elabora una revisión de las secuencias sedimentarias post Paleoceno de la cuenca de Calama basada en datos radiométricos $^{40}Ar/^{39}Ar$, sedimentológicos y estructurales.

A partir de esta revisión, este estudio considera mantener la preexistente Formación Calama aunque sugiere redefinir su datación. La edad que se propone para esta formación comprende del Eoceno Inferior al Mioceno Inferior. Además, eleva la Formación Loa a la categoría de grupo y define las Formaciones que la constituyen.

En la **Figura 2-6** se muestran las secuencias estratigráficas desde el Eoceno hasta el Cuaternario existentes en el área comprendida entre la Cordillera de la Costa y la Depresión Pre-Andina.

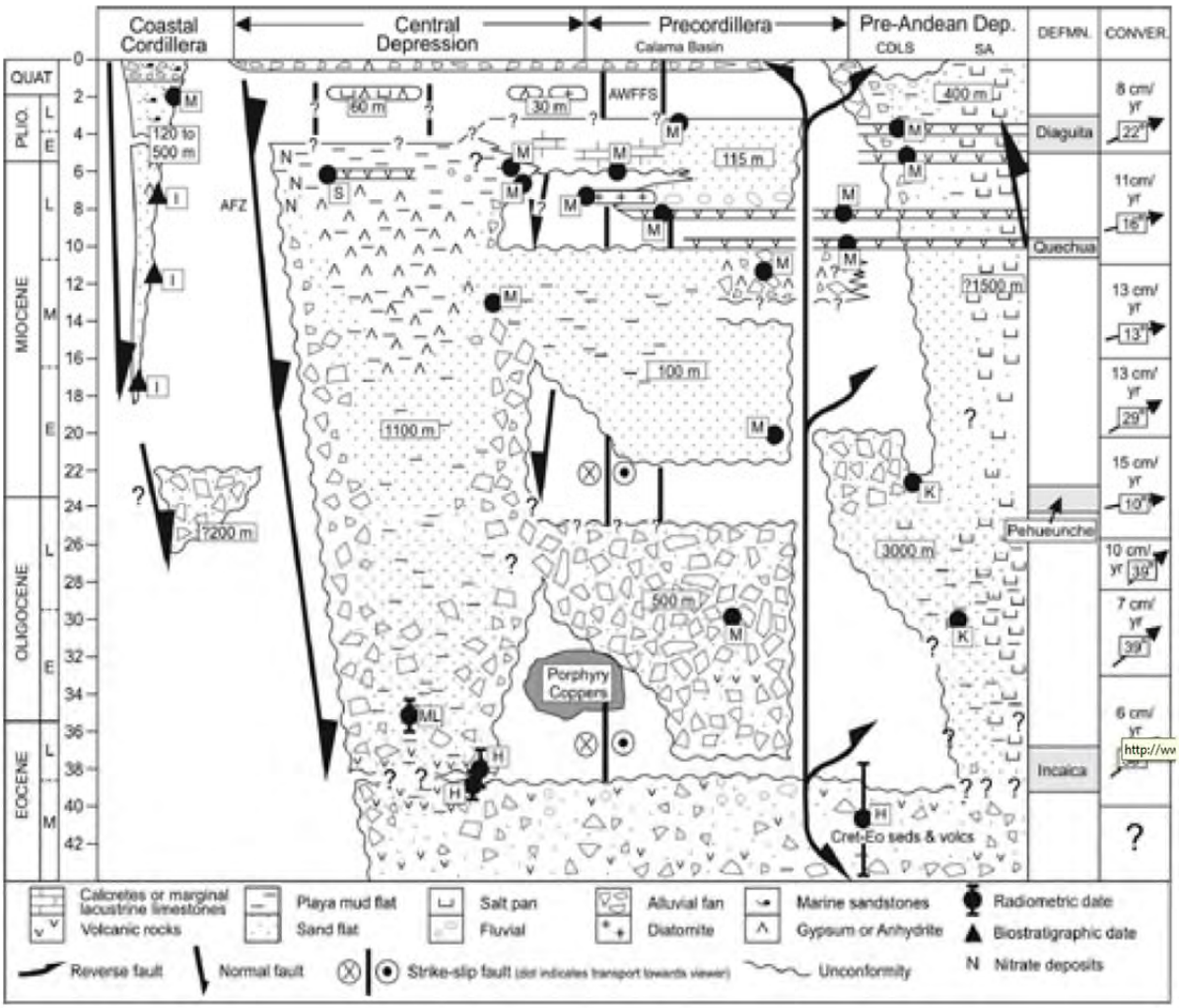


Figura 2-6. Cronoestratigrafía de la sección del norte de Chile, 21º y 24º sur. Fuente: May, et al., 2005.

SGA LIMITADA. Declaración de Impacto Ambiental Proyecto Estudio hidrogeológicos salar de Alconcha. Anexo N°3, Estudio de Línea Base. Cía Minera Quebrada Blanca. Santiago, 2007. 112 p.

La consultora SGA, realiza una Declaración de Impacto Ambiental del proyecto *"Estudio hidrogeológico salar de Alconcha"* que incluye unos anexos de estudios de línea base. En el Anexo Nº3 se describe la geología del salar de Alconcha. En este anexo se identifican las unidades geológicas, tanto unidades constituidas por sedimentos no consolidados como las rocas estratificadas, y las estructuras locales.

En la **Figura 2-7** se observan las unidades geológicas que afloran en la subcuenca de Alconcha, cronológicamente corresponden a unidades miocénicas hasta cuaternarias, y las estructuras principales que condicionan a estas unidades.

Las unidades estratigráficas son idénticas a las unidades descritas en RAMÍREZ Y HUETE (Ramírez y Huete, 1981) y se citan en el capítulo de caracterización geológica.

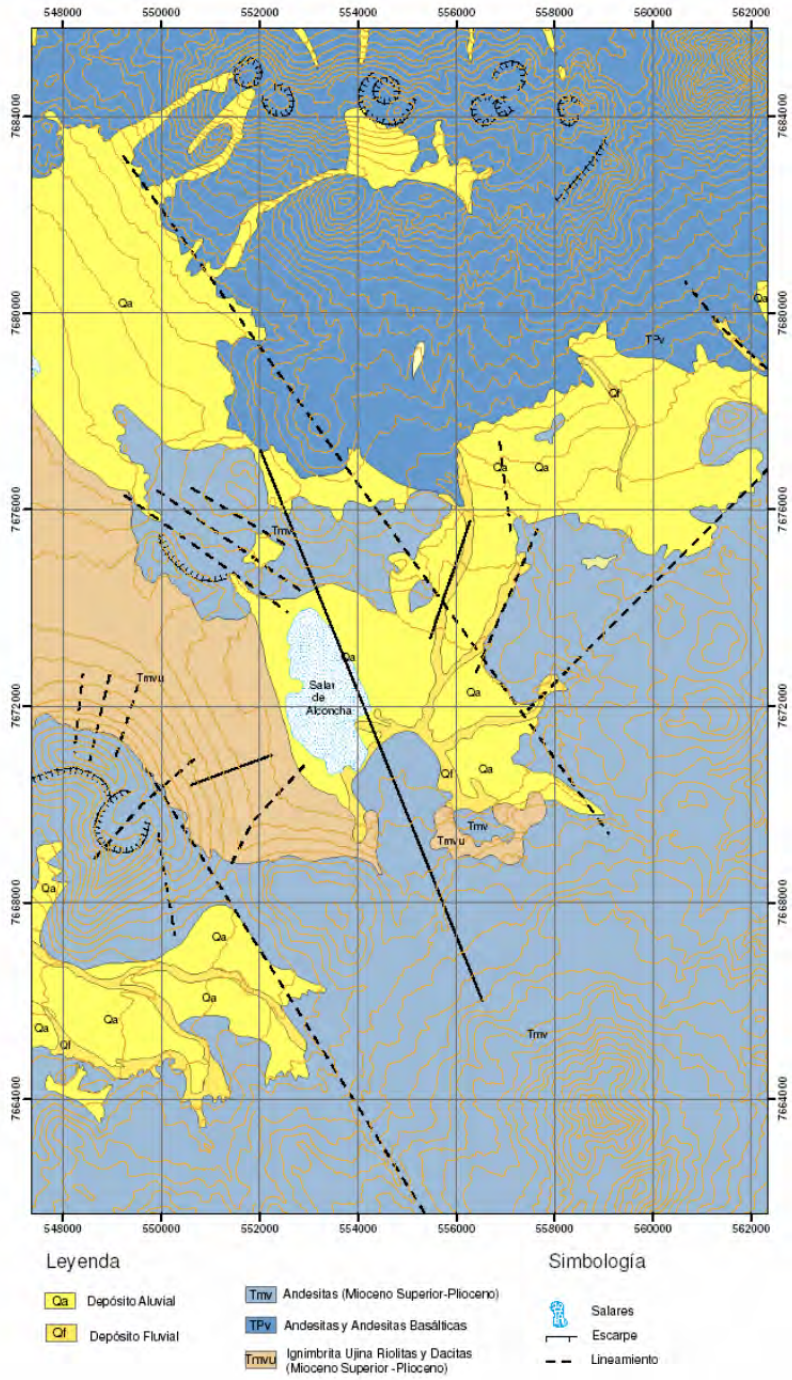


Figura 2-7. Mapa geológico de la subcuenca del salar de Alconcha. Fuente: SGA, 2007.

ARCADIS CHILE. Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Sistema de impulsión de agua Lequena –Ujina. Capítulo 2 linea de base, geología, geomorfología y riesgo. Compañía minera Doña Inés de Collahuasi SCM (CMDIC). Santiago, 2011. 19 p.

En este apartado del Estudio de Impacto Ambiental elaborado por Arcadis se describe la geomorfología y geología del sector medio a oriental del macizo montañoso de la Precordillera, del borde occidental de la Depresión Intermedia o Depresión del Loa y de la cuenca de pampa Polán-Ujina. La identificación de las unidades geológicas se realiza en tres tramos a partir de los trazados de la línea de transmisión eléctrica y del acueducto, que comienzan en Lequena y finalizan en el sector de Minera Collahuasi.

En este informe se describe un diagrama en el que se aprecia una preferencia de orientación de las fracturas de las ignimbritas orientadas N40ºW, seguidas por fracturas N30ºW y N60ºE, sin embargo es posible que estas orientaciones preferenciales sean más aparentes que reales, dado que Arcadis realiza la mayoría de las medidas en los bordes del río Loa y de quebradas aledañas.

2.2 HIDROLOGÍA

Son diversos los estudios que existen con información de tipo hidrológica de la cuenca del río Loa. Los más importantes utilizan información de la base de datos de la Dirección General de Aguas de estaciones pluviométricas y fluviométricas.

A continuación se resumen los 5 informes seleccionados que mejor describen las características hidrológicas de la zona de estudio.

DIRECCIÓN GENERAL DE AGUA. Balance hidrológico nacional, II Región. Departamento de hidrología, subdepartamento de estudios hidrológicos, Santiago, 1986. 173 p.

El presente informe corresponde al balance hídrico de la Región de Antofagasta, parte integrante del estudio Balance Hidrológico Nacional (BHN), que ha definido y desarrollado la Dirección General de Aguas.

Se entregan los componentes del balance hídrico por cuencas a nivel anual, considerando un periodo suficientemente representativo. El balance hídrico ha sido el comprendido entre los años 1961/62 y 1980/81.

El informe entrega mapas de isolíneas de precipitación, de evapotranspiración y de escorrentía. Además, se entrega mapa de isotermas, ya que es necesario para determinar la evapotranspiración de acuerdo a la metodología utilizada.

La información de utilidad para el presente informe corresponde a las isolíneas de precipitación.

INGEOREC LIMITADA. Hidrogeología y modelo de simulación Pampa Puno. Corporación del Cobre, División Chuquicamata. Santiago, 2001. 237 p.

Se desarrolla un modelo de simulación hidrogeológico del acuífero del sector de Pampa Puno para Codelco. El objetivo del informe es determinar y evaluar los efectos en los niveles de agua subterránea por la explotación del campo de pozos de la División Chuquicamata.

Presenta un anexo con la estadística de caudales de la estaciones fluviométricas del río Loa y del registro de la DGA, desde el año 2005 al año 2007. Esta información ha sido utilizada en el presente informe para caracterizar los caudales en puntos de la cuenca del Loa Alto en los que no se dispone de datos.

DIRECCIÓN GENERAL DE AGUA. Evaluación de los recursos hídricos, sectores Calama y Llalqui, cuenca del río Loa. S.I.T. Nº 85. Dirección General de Aguas (DGA). Departamento de Estudios y Planificación. Santiago. 2003. 113p.

En este estudio se integra la información existente sobre el sistema hídrico de la cuenca del río Loa y se desarrollan los análisis correspondientes, para poder evaluar la disponibilidad de aguas subterráneas en sectores específicos y los efectos de una explotación subterránea intensificada sobre los recursos superficiales. El estudio contiene los resultados de un estudio hidrológico y balance hídrico de la cuenca del Loa, los resultados de una modelación hidrogeológica en el sector específico de Calama, y algunas interpretaciones de información hidrogeoquímica en apoyo a los resultados hidrológicos. Como conclusión final, se hace una estimación tanto de los recursos renovables como de los recursos no renovables, disponibles en la cuenca.

El análisis hidrológico se ha realizado en régimen natural y abarca toda la cuenca del río Loa y afluentes. Este análisis comienza con la caracterización y cuantificación de la precipitación y evapotranspiración en la cuenca, y termina con la obtención de la cantidad de recurso disponible para escorrentía superficial y subterránea en cada subcuenca constitutiva. Luego se desarrolla, para cada subcuenca, el balance de

escorrentía versus usos. Estos balances son los que proporcionan el marco dentro del cual se establecen las condiciones de borde para la aplicación de los modelos hidrogeológicos.

Se ha empleado este informe para contrastar los valores de balance hidrológico calculados en la cuenca del Loa Alto con los obtenidos por el Departamento de Estudios y Planificación de la DGA.

MUÑOZ P, J. 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. Parte III: Hidrología Regional del Altiplano de Chile. S.I.T. Nº 157. Ministerio de obras públicas, Dirección general de Aguas (DGA). Santiago, 2008. 155 p.

Este estudio contempla el análisis a nivel mensual y anual de variables meteorológicas como precipitación, escurrimiento, temperatura y evaporación de tanque. Los datos meteorológicos fueron obtenidos de los registros que lleva la DGA a través del Banco Nacional de las Aguas (BNA). Adicionalmente, recopilaron datos de precipitación del Sistema Nacional de Información Hídrica (SNIH) de Argentina, del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) de Bolivia, y del National Oceanic & Atmospheric Administration (NOAA) de Estados Unidos que contiene registros de precipitación de estaciones localizadas en Chile, Argentina, Bolivia y Perú.

Analizan las variables hidrológicas para determinar su variación espacial y temporal a nivel mensual y anual. Además realizan un estudio de sequías meteorológica e hidrológica con los registros de precipitaciones y escurrimientos, respectivamente.

Se han empleado las isolíneas de precipitación para caracterizar las precipitaciones medias anuales en la cuenca del Loa Alto. Esta información se contrasta con la obtenida en el informe de la DGA (DGA, 1986).

GCF INGENIEROS LIMITADA. Actualización de la evaluación de la disponibilidad de recursos hídricos para constituir derechos de aprovechamiento en las subcuencas afluentes al salar de Atacama. S.I.T. Nº 210. Dirección General de Aguas (DGA). Santiago, Enero. 2010. 277 p.

Se realizó una revisión y análisis de antecedentes existentes. A partir de ello y del conocimiento sobre la cuenca del salar de Atacama, efectúan una delimitación de

subcuencas aportantes al salar, junto con una primera identificación de los sectores sensibles ambientalmente.

Para cada subcuenca desarrollan un balance hídrico mensual a partir de un estudio hidrológico actualizado. Efectuaron balances hídricos para el periodo 1970 a 2008, incorporando los montos demandados por vegas, bofedales, áreas cultivadas y superficies de agua libre.

Finalmente realizan una estimación de las demandas de los sectores sensibles y de la disponibilidad del recurso hídrico en el salar.

Para este proyecto ha sido de utilidad el estudio hidrológico, concretamente la variable precipitación. Han realizado un rellenado y extendido de las series de precipitación. Aplicaron un modelo estocástico multivariado sencillo, que propone conservar la estructura espacial, la media y las desviaciones en magnitud que se observan en las precipitaciones de la zona, simulando valores que, dentro de ese marco, varíen aleatoriamente. Finalmente obtienen el valor de precipitación promedio anual en diversas estaciones de la DGA de la segunda región, el cual se ha utilizado para verificar si las isoyetas empleadas se ajustan a los valores de las estaciones pluviométricas.

2.3 HIDROGEOLOGÍA

Se ha realizado un resumen de los 13 trabajos que presentan información hidrogeológica sobre las subcuencas en estudio.

CORFO, DGA, CCC, ONU. Investigación de recursos hidráulicos en el Norte Grande. Hidrogeología de la región de Ojos de San Pedro. Proyecto CHI-535, Santiago, 1977. 60 p.

Este informe abarca la región de la cuenca del río de San Pedro, Siloli e Incaliri, con una extensión aproximada de 1.050 km^2. Situada entre dos cordilleras de volcanes a una distancia aproximada de 100 km al noreste de la ciudad de Calama.

En este estudio se hace una caracterización geológica, hidrogeológica e hidroquímica de la cuenca del río San Pedro e Incaliri, dónde se muestran descripciones estratigráficas de las perforaciones, los resultados de los ensayos de bombeo y análisis hidroquímicos además de realizar un balance hídrico de la cuenca.

En la **Tabla 2-1**, se muestran los valores de transmisividad y coeficiente de almacenamiento específico de los pozos B-1, B-2, B-3 y B-4.

Pozo bombeo	Pozo observ.	Caudal (l/s)	Método de análisis	Transmisividad (m^2/d)	Conductiv. Hidráulica (m/d)	Coef. Almac.	Típo de acuífero
B1 Prf. 140	B-1I	60	Theis	37565	380	0.32	No confinado
B1 Prf. 140	B-1I	43	Walton	1408.5	18	0.14	¿No confinado?
			Theis	2690	34	0.22	¿No confinado?
			Jacob	4530	57	0.12	¿No confinado?
B2	B-2II	135	Theis	51610	1000	8.30E-02	Confinado
			Jacob	85436	1700	7.60E-04	Confinado
B3	B-3II	100	Theis	4595	65	0.14	No confinado
	B-3II	100	Walton	3272	46	0.34	No confinado
	B-3III	100	Walton	1775	25	6.00E-03	¿No confinado?
B4	B-4I	40	Walton	4000	69	1.36E-01	No confinado
	B-4I ,B4II	40	Thiem-Dupuit	3456	76		No confinado
	B-4II, B-4III	40	Thiem-Dupuit	3431	76		No confinado
	B-4I, B-4III	40	Thiem-Dupuit	2021	45		No confinado

Tabla 2-1. Parámetros hidráulicos cuenca del río San Pedro. Fuente: CORFO *et al.*, 1977.

AGUA INGENIEROS CONSULTORES LIMITADA. Servicios de asesoría para la prospección Hidrogeológica del Alto Loa, cuenca río San Pedro-Inacaliri. Corporación Nacional del Cobre, División Chuquicamata, Santiago, 1985. 76 p.

AGUA tiene como objetivo en este informe presentar el marco geológico regional de la zona, la información hidrogeología obtenida de los sondajes y de los trabajos geofísicos, el estudio geoquímico e isotópico del sector de San Pedro y por último se estima el volumen de agua subterránea.

Por lo tanto, de este estudio se ha obtenido las unidades hidrogeológicas de este sector, resultado de la interpretación realizada por AGUA de 6 perfiles geofísicos y la estratigrafía de los sondajes y de la prospección superficial mediante métodos eléctricos, sísmicos y gravimétricos.

GEODATOS LIMITADA. Estudio geofísico cuenca Ojos de San Pedro-Incaliri. Informe resumen. Corporación Nacional del Cobre, División Chuquicamata. Santiago. 1985. 42 p.

En este informe se realiza un estudio geofísico de la subcuenca del río San Pedro, en el valle situado al sur del volcán San Pedro. En este documento se presentan los resultados de más de 90 km de perfiles geofísicos, SEV, sísmica de refracción y gravimetría. También se realizaron perfilajes de gamma natural, temperatura de fluidos y resistividad de fluidos en los pozos B-1, B-2, B-3, B-4, CHU-1, CHU-2, CHU-4 y CHU-5.

En las Figuras de 2 a 14 del informe de GEODATOS (Geodatos, 1985), se pueden observar los perfiles geoeléctricos realizados en la cuenca Ojos de San Pedro-Incaliri, en la Figura 15 se representa un perfil sísmico y en las Figuras de 16 a 19 se presentan perfiles gravimétricos. A continuación en la **Figura 2-8** se muestra el perfil geoeléctrico B-2, el cual se ubica en el sector central de la cuenca.

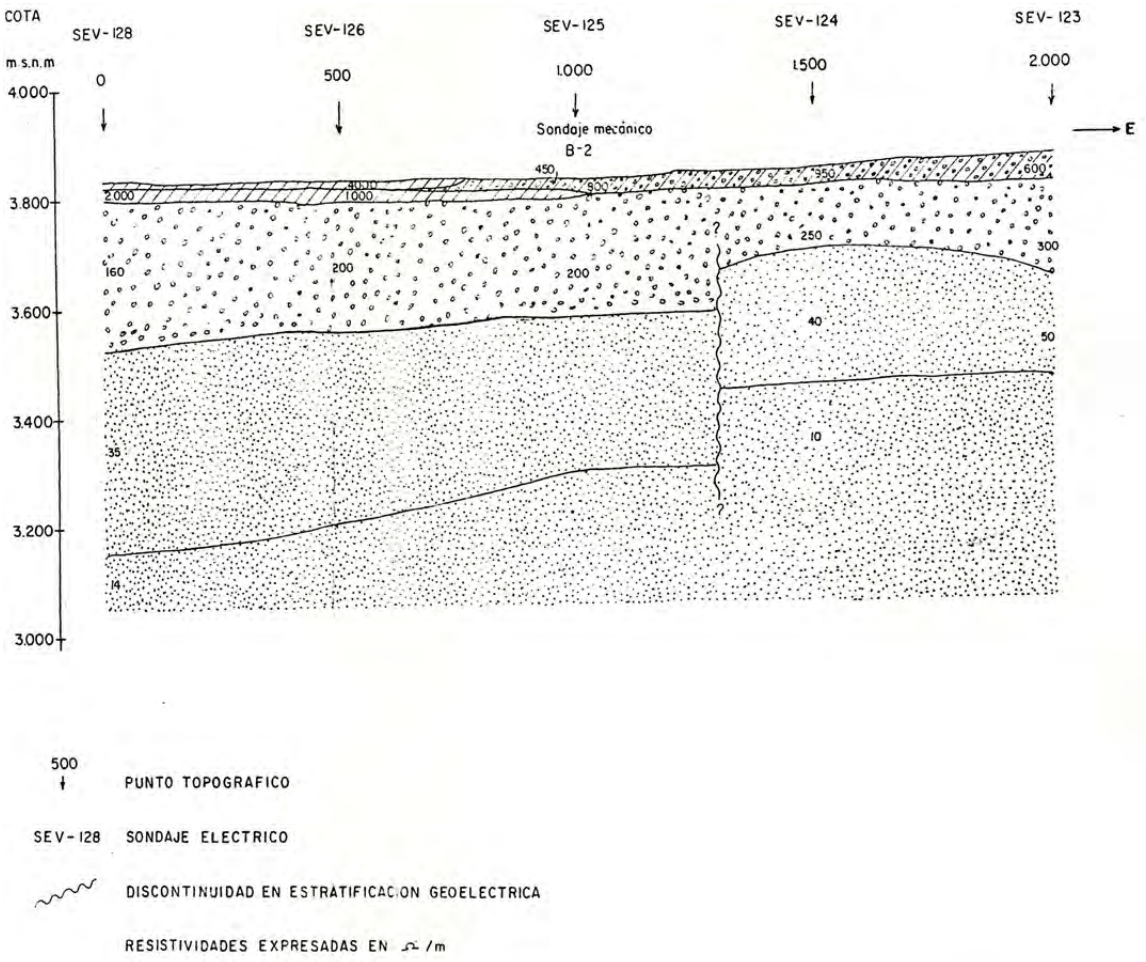


Figura 2-8. Perfil geoeléctrico B-2. Fuente: Geodatos, 1985.

GEODATOS LIMITADA. Estudio geofísico cuenca Ojos de San Pedro-Inacaliri. Revisión de avance N°4. Corporación Nacional del Cobre, División Chuquicamata. Santiago. 1986. 13 p.

En este informe se realiza un estudio geofísico de la región de Ojos de San Pedro, el valle situado al sur del volcán San Pedro. En este informe se presentan los resultados de perfilajes geofísicos de los pozos CHU-8, CHU-9, CHU-12, CHU-13, CHU-14 y CHU-15. En estos pozos se realizaron perfiles de temperatura de fluidos, resistividad de fluidos, densidad gamma y gamma natural. En el Anexo 1 del informe de GEODATOS (Geodatos, 1986) se presentan los resultados de los perfilajes geofísicos de los pozos CHU-17, CHU-18, CHU-19 y CHU-20. En el Anexo 2 se hace una comparativa entre los diferentes ensayos en cada pozo explorado.

La dificultad para compilar la información de este informe viene dada por la imposibilidad de poder ubicar la situación geográfica de los pozos a los que se hace referencia. En el presente informe no se dan las coordenadas de los pozos donde se realizaron los perfiles. En la **Figura 2-9** se muestra la sección geoelétrica de la Pampa Apacheta Nº 2, donde se pueden apreciar las unidades hidrogeológicas de este sector.

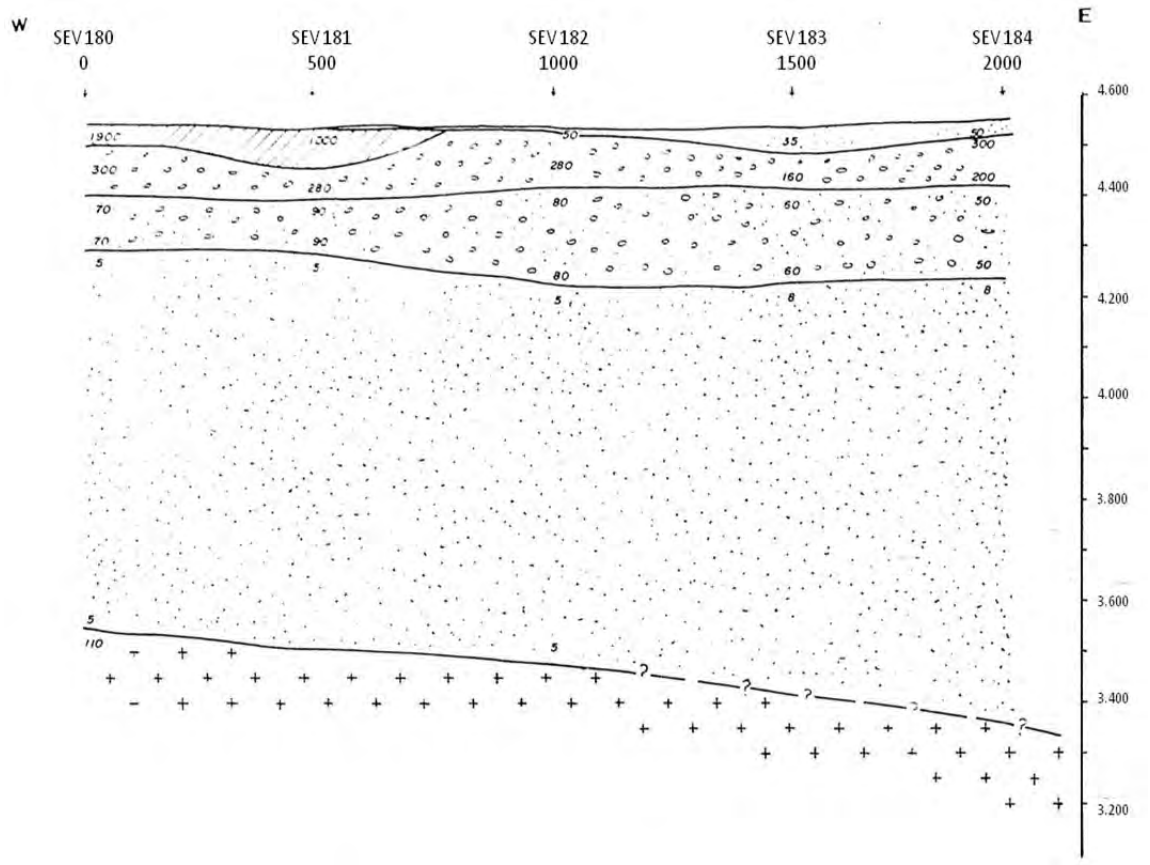


Figura 2-9. Sección geoeléctrica de la Pampa Apacheta Nº 2. Fuente: Geodatos, 1986.

FALCÓN, Eduardo. Volumen de agua subterránea almacenada en la cuenca San Pedro-Inacaliri, Segunda Región. Corporación Nacional del Cobre, Santiago. 1987. 4 p.

Este informe tiene como objetivo determinar el volumen de agua subterránea almacenada en los acuíferos de la cuenca San Pedro-Inacaliri a partir de los estudios realizados por la División Chuquicamata, Codelco-Chile. Se explica de un modo resumido la circulación del agua subterránea en los acuíferos afectado por dos sistemas de fallas, que esquematiza en 13 cortes transversales al valle y se considera que el espesor saturado del acuífero es desde el nivel de saturación hasta la profundidad de 400 m.

A partir del coeficiente de almacenamiento para condiciones de extracción a corto plazo, **Tabla 2-2,** y a largo plazo, **Tabla 2-3**, se ha obtenido un volumen de agua subterránea almacenada de 3,2 x 10^9 m^3 y 6,5 x 10^9 m^3 respectivamente.

Unidad	Coeficiente de almacenamiento
Unidad Aluvial	2%
Unidad Andesita	5%
Unidad Ignimbrita	2%

Tabla 2-2. Valores del coeficiente de almacenamiento para condiciones de extracción a corto plazo. Fuente: Falcón, 1987.

Unidad	Coeficiente de almacenamiento
Unidad Aluvial	10%
Unidad Andesita	8%
Unidad Ignimbrita	5%

Tabla 2-3. Valores del coeficiente de almacenamiento para condiciones de extracción a largo plazo. Fuente: Falcón, 1987.

INGEOREC LIMITADA. Hidrogeología y modelo de simulación Pampa Puno. Corporación* del Cobre, *División Chuquicamata. Santiago, 2001. 237 p.

INGEOREC (INGEOREC, 2001) efectúa un modelo de simulación hidrogeológico del acuífero del sector de Pampa Puno para Codelco. El objetivo del informe es determinar y evaluar los efectos en los niveles de agua subterránea por la explotación del campo de pozos de la División Chuquicamata en este área.

Antes de realizar el modelo de simulación del sector de Pampa Puno, se analiza a un nivel de detalle el estudio geológico e hidrogeológico, que incluye los valores de las pruebas de bombeo y de monitoreo, **Tabla 2-4**. El informe de INGEOREC presenta un anexo con las columnas estratigráficas de los sondajes exploratorios de la campaña de 1996 realizados por División Chuquicamata. La información hidrogeológica más relevante se resume en el capítulo de caracterización hidrogeológica.

Pozo Bombeo	Fecha	Caudal Bombeo	Pozo Observación	Distancia al pozo de bombeo (m)	Nivel estático (m)	Nivel Dinámico (m)	Transmisividad	
							Jacob (m^2/día)	Recuperación (m^2/día)
2B	Oct-98	12	2B		74,5	91,2	80	130
			2E	61,9	74,9	76,6	270	220
	Oct-98	18	2B		75,7	98,6	85	
			2E	61,9	75,2	76,7	300	670
	Mar-99	3	2B		74,1	141,4	60	93
			2E	61,9	73,2	75,6	370	600
4B	Ene-99	60	4B		67,9	91,5	180	500
	May-99	110	4B		66,9	114,4	190	
			4E	54,9	68,2	69,3	7500	
6B	Feb-99	50	6B		56,7	116,9	80	90
			4B	2338	67,5	67,6	5600	
			7B	1368	58,2	58,5	340	420
7B	Feb-99	50	7B		56,7	105,3	47	460
			6B	1368	54,2	56,0	380	110
8B	Mar-99	8,5	8B		47,1	67,5	12	
9B	Abr-99	50	9B		109,9	149,7	30	
10B	Abr-00	30	10B		74,6	118,6	85	
11B	May-00	60	11B		77,0	144,5	27	
314B	Sep-98	5	314B		54,9	96,0	3	7
	Jul-99	5	314B		54,9	136,3	2	

Tabla 2-4. Resultados de transmisividad de las pruebas de bombeo de la campaña 1998-2000. Fuente: INGEOREC, 2001.

FERROCARRIL DE ANTOFAGASTA A BOLIVIA (FCAB). Estudio hidrogeológico y modelo de simulación, sector estación Polapi, II Región. Dirección General de Aguas. Santiago. 2003. 350 p.

Este informe presenta un estudio hidrogeológico para solicitar un derecho de aprovechamiento de aguas subterráneas en un pozo ubicado en el sector de Polapi. Además se construyeron 4 pozos de exploración y 1 de bombeo, un estudio geofísico mediante el método de Transiente Electromagnético (TEM) y un perfilaje (gamma natural, densidad gamma, calibre, temperatura, conductividad, flujo, resistividad corta y larga, potencial espontáneo y resistividad puntual) en un pozo.

Para la descripción hidrogeológica del sector de la estación de Polapi en la subcuenca del río Loa se ha tomado como referencia las unidades hidrogeológicas y los niveles freáticos presentados en este informe.

IGSA CONSULTORES. Evaluación de Impacto Ambiental Proyecto Extracción Minera en Salar de Carcote. Sociedad Química y Minera de Chile (SQM). Santiago. 311 p.

En este estudio se efectúa una caracterización de la zona de influencia directa que tendría el proyecto de extracción minera en el salar de Carcote. Se identifican tres unidades acuíferas en el salar de Carcote, la profundidad y la dirección de las líneas de flujo de agua subterránea en la subcuenca. Sin embargo, al no existir antecedentes de pruebas de bombeo en la zona de estudio, se consideran los valores de las constantes elásticas estimados en las unidades hidrogeológicas del borde oeste del salar de Ascotán.

Este informe se basa en el estudio realizado por MARDONES (Mardones, 1977) para determinar la conexión hidráulica entre el salar de Ascotán y el salar de Carcote, **Figura 2-10** .

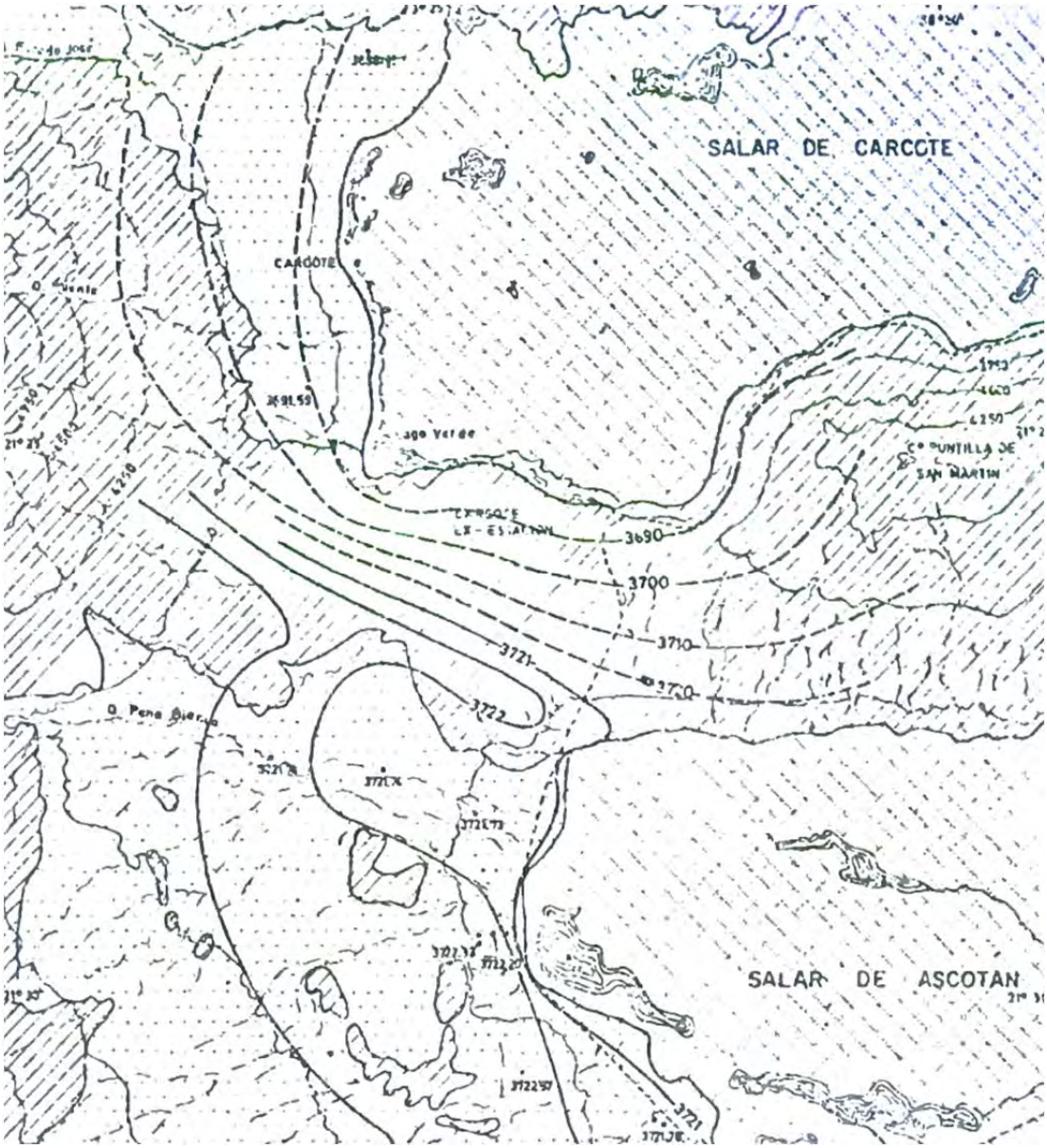


Figura 2-10. Mapa piezométrico del salar de Carcote. Fuente: Mardones, 1977.

DICTUC. Hidrogeología de la II región y asesoría para la revisión de informes de estudios de evaluación de recursos hídricos. Dirección General de Aguas (DGA), Santiago, 2005. 309 p.

El informe de DICTUC (DICTUC, 2005) describe de un modo detallado la hidrogeología de los salares de Ollagüe, Carcote y Ascotán, identificando las unidades hidrogeológicas según la litología y el grado de saturación y la composición del agua subterránea a partir de información estratigráfica de pozos. Además, se estiman los

valores de los parámetros elásticos de cada unidad acuífera de los diferentes sectores. Se han recopilado mapas piezométricos de la subcuenca del salar de Ascotán y de Carcote, los perfiles geológicos del salar de Ollagüe y el modelo geológico e hidrogeológico del salar de Ascotán y de Ollagüe, **Figura 2-11.**

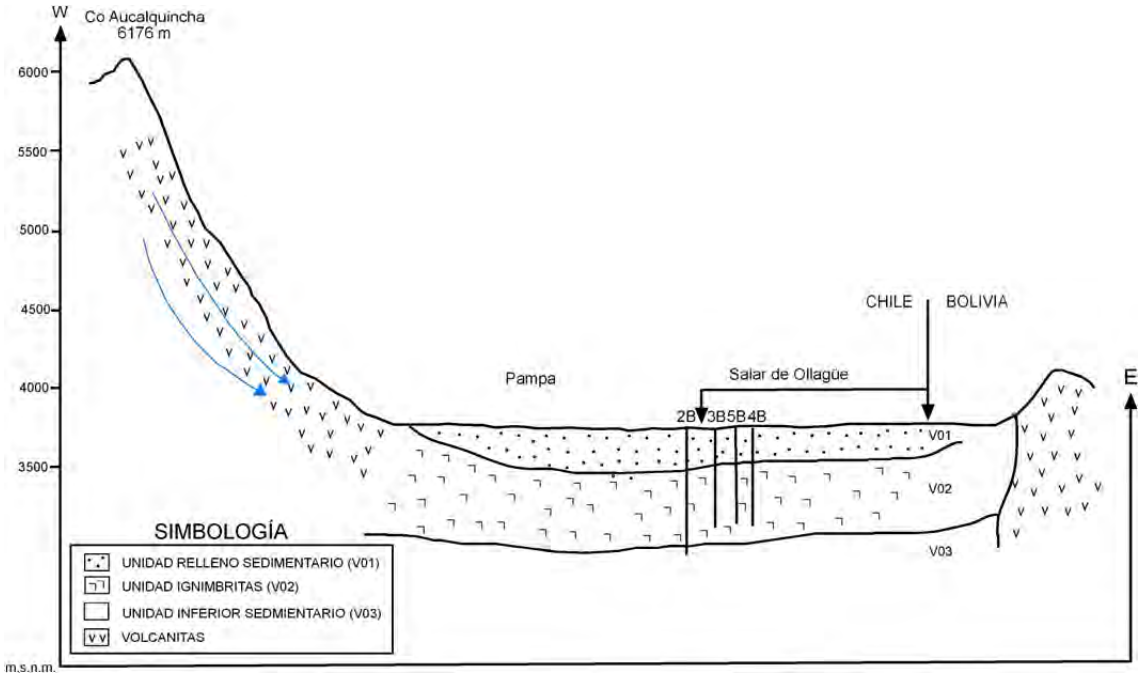


Figura 2-11. Modelo hidrogeológico del Salar de Ollagüe. Fuente: DICTUC, 2005.

Para elaborar esta caracterización hidrogeológica, DICTUC (DICTUC, 2005) se ha basado en diferentes fuentes de información. Dichas fuentes se corresponden con:

- Antecedentes recopilados, entre los que destacan la descripción estratigráfica de una serie de sondajes elaborada por la División Chuquicamata.
- Los datos de las pruebas de bombeo realizadas en los pozos OLLAE-2B, OLLAE-3B, OLLAE-4B y OLLAE-5B.
- Los antecedentes de estudios de geofísica TEM.
- Pruebas de bombeo de pozos del estudio “Desarrollo de los Recursos de Agua en el Norte Grande, Chile”.
- Los niveles estáticos de pozos encontrándose estos datos en el Banco Nacional de Aguas (BNA).
- Las pruebas de bombeo realizadas en dos calicatas en el Salar de Carcote.
- La literatura relacionada.

SGA LIMITADA. Declaración de Impacto Ambiental Proyecto Estudio hidrogeológicos salar de Alconcha. Anexo N°3, Estudio de Línea Base. Cía Minera Quebrada Blanca. Santiago, 2007. 112 p.

En el Anexo Nº3 "Estudio de línea base salar de Alconcha" que forma parte de la Declaración de Impacto Ambiental (DIA) *"Estudio hidrogeológico salar de Alconcha"* confeccionado por la consultora SGA a Minera Quebrada Blanca se presenta en detalle el análisis hidrogeológico de dicha área.

Según SGA el salar de Alconcha se caracteriza por presentar dos acuíferos principales. Elabora un mapa piezométrico, **Figura 2-12**, a partir de los registros del nivel freático del mes de enero de 2007 y se comparan con las series anteriores. Al comienzo de la década de los ochenta las empresas Hargis and Montgomery y Harshbarger and Asociated realizaron unos estudios exploratorios en el salar de Michincha, salar de Alconcha y la subcuenca del Loa. En el salar de Alconcha se efectuaron una serie de test de air lift en los pozos construidos y una prueba de bombeo de 72 horas a partir de los datos obtenidos se estimaros los valores de las constantes elásticas de cada unidad acuífera.

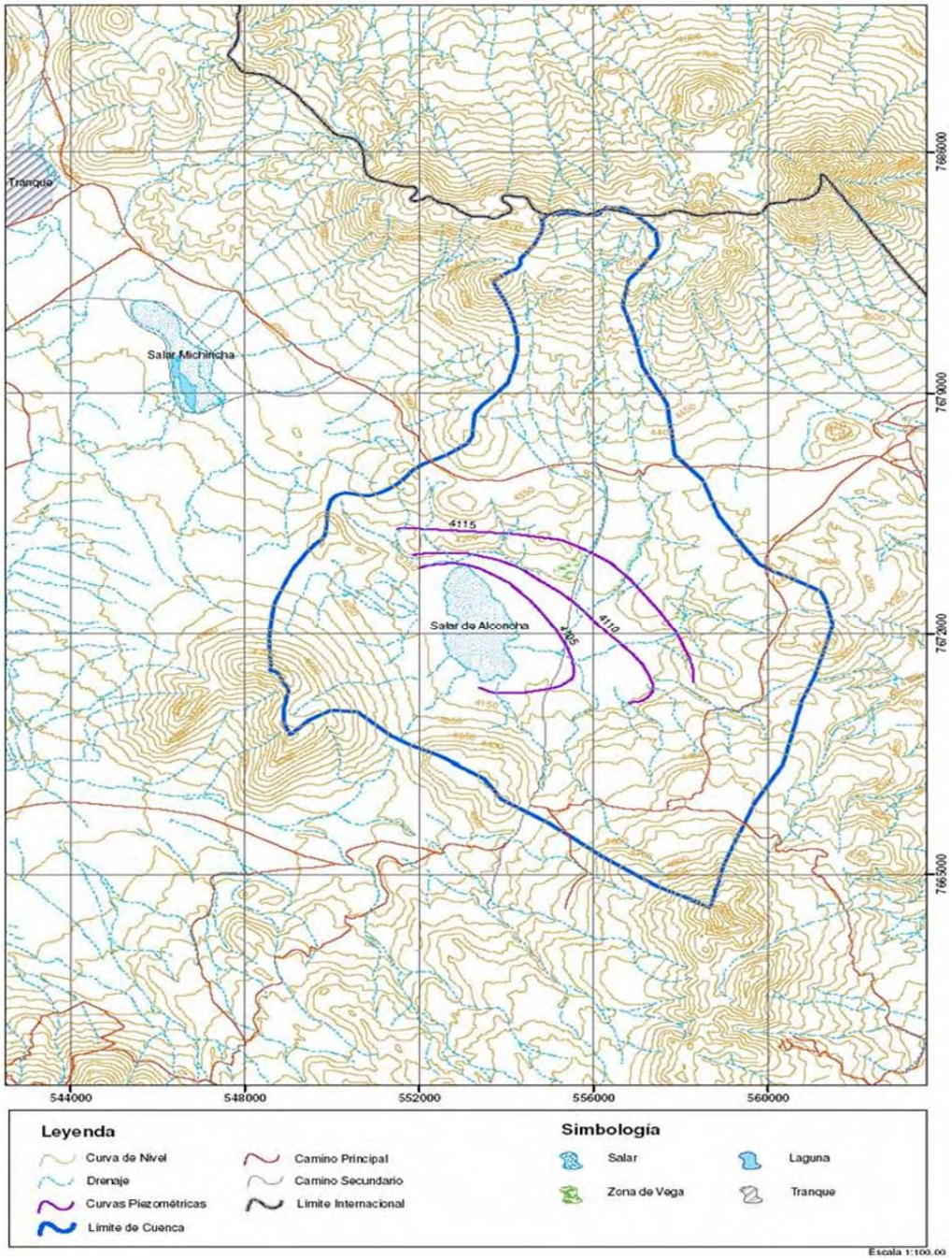


Figura 2-12. Mapa piezométrico del salar de Alconcha. Fuente: SGA, 2007.

GP CONSULTORES LIMITADA. Plan de alerta temprana de Pampa Puno del proyecto Suministro, construcción y operación de aducción Pampa Puno. Corporación* Nacional *del Cobre, Santiago, 2008. 166 p.

En este informe se entregan los resultados del monitoreo correspondiente al Plan de Alerta Temprana (PAT) de Pampa Puno en la fase de prebombeo comprometido ante la

Dirección General del Agua (Res.DGA Nº 859/02). El estudio se compone de 5 capítulos en los que se describe el marco geológico e hidrogeológico, se presenta el comportamiento natural de los niveles y calidad de las agua subterráneas del acuífero de Pampa Puno, del monitoreo de Vega Sapunta, los caudales y calidad de aguas del río Loa, y las variables medidas en la estación meteorológica del sector de Pampa Puno.

Como la fase de prebombeo tiene como objetivo la caracterización de las condiciones hidrogeológicas de la línea base, se ha podido obtener información hidrogeológica relevante para el presente informe.

SCHLUMBERGER WATER SERVICES CHILE LIMITADA. Actualización del modelo conceptual hidrogeológico y desarrollo de un modelo numérico. Plan de manejo ambiental. Salar de Ascotán. Sociedad Contractual Minera EL ABRA. Santiago, 2009. 64 p.

En el informe de SCHLUMBERGER (Schlumberger, 2009) se describen las unidades acuíferas y se estiman los valores de las propiedades hidráulicas del acuífero principal del Salar de Ascotán (sedimentos no consolidados y brecha sedimentaria), a partir de los resultados de las pruebas de bombeo realizados por Codelco en el año 1993. En cambio, los valores de las unidades de andesita, toba o brecha volcánica se estiman basándose en la experiencia de WMC (Water Management Consultants) en sistemas similares del norte de Chile. El rendimiento específico del acuífero sedimentario en el sector sur del salar SWS lo calcula a partir del volumen de agua subterránea bombeada y el descenso que se produce en los pozos. Para el estudio de SCHLUMBERGER (Schlumberger, 2009) se cuenta con el registro de niveles de pozos habilitados desde 1996 a 2009

En la **Tabla 2-5** se resume la estimación de la conductividad hidráulica y del rendimiento específico/coeficiente de almacenamiento del sector sur de la cuenca de Ascotán.

Unidad hidrogeológica	Rango de K (m/d) Bibliográfico	K promedio estimada (m/d)	K promedio estimada (m/s)	Rendimiento específico/Coeficiente de almacenamiento
Sedimentos no consolidados	[0,1-100]	10	$1,2 \times 10^{-4}$	20 a 25
Brecha sedimentaria	[0,1-100]	10	$1,2 \times 10^{-4}$	20 a 25
Toba volcánica	[0,01-100]	0,05	5×10^{-7}	5
Brecha volcánica	$[10^{-8}$-$10^{-4}]$	10^{-4}	10^{-9}	10^{-5}
Andesita no fracturada	$[10^{-8}$-$10^{-4}]$	10^{-4}	10^{-10}	10^{-5}
Andesita fracturada	[0,01-10]	0,1	10^{-6}	10^{-4}

Tabla 2-5. Resumen de los parámetros hidráulicos de las unidades hidrogeológicas. Fuente: Schlumberger, 2009.

AQUATERRA INGENIEROS LIMITADA. Estimación de recargas en cuencas altiplánicas y precordilleranas de vertiente pacífica. Dirección General del Agua (DGA), Santiago, 2011. 205 p.

Aquaterra estima la recarga de agua en 14 cuencas altiplánicas y precordilleranas aplicando la metodología desarrollada por la DGA (DGA, 2010) en *"Propuesta metodológica para la estimación de recarga en cuencas altiplánicas y de vertiente pacífica".*

En el capítulo sobre la caracterización hidrogeológica del río Loa se ha incluido la figura del perfil geofísico realizado por Aquaterra en el río Loa antes de Lequena. De este perfil, además se han obtenido valores de permeabilidad de las unidades hidrogeológicas subyacentes al río.

2.4 HIDROQUÍMICA

A continuación se resumen los 12 documentos que contienen información hidroquímica e isotópica relevante para el presente proyecto. De los 12 informes seleccionados: 1 clasifica las aguas según la calidad, 4 presentan información hidroquímica, 6 isotópica y sólo uno de ellos contiene ambas disciplinas.

NIEMEYER, Hans. Hoyas Hidrográficas de Chile, Segunda Región. Dirección General de Aguas (DGA), Santiago, 1980-90. 97 p.

En este documento se hace una descripción de las cuencas más importantes de la II Región a nivel geográfico, hidrográfico y de calidad.

De este documento se ha utilizado la información hidroquímica de los cursos superficiales del río Loa, San Pedro y quebrada Taira, en concreto se han obtenido valores de conductividad eléctrica, pH, concentraciones de Boro y Arsénico.

AGUA INGENIEROS CONSULTORES LIMITADA. Servicios de asesoría para la prospección Hidrogeológica del Alto Loa, cuenca río San Pedro-Inacaliri. Corporación Nacional del Cobre, División Chuquicamata, Santiago, 1985. 76 p.

En este trabajo se realiza una síntesis de la información hidrogeológica, realizada en la cuenca del río San Pedro.

De este documento se ha obtenido los valores $\delta^{18}O$, $\delta^{2}H$ y $\delta^{13}C$ de los pozos, vertientes y cursos superficiales de la cuenca del río Loa, **Tabla 2-6.**

Nombre	X	Y	$\delta^{18}O$ ‰ 1985	$\delta^{2}H$ ‰ 1985	$\delta^{13}C$ ‰ 1985	$\delta^{18}O$ ‰ 1976	$\delta^{2}H$ ‰ 1976	$\delta^{18}O$ ‰ 1977	$\delta^{2}H$ ‰ 1977	$\delta^{18}O$ ‰ 1980	$\delta^{2}H$ ‰ 1980	
Vert. Cabana	605219	7559242	-11.3	-89.0	-5.8							
Vert. Cabana Vega	602429	7554745	-10.7	-82.0	-8.0							
Vert. Colana	585078	7574264	-11.8	-84.0	-2.5							
Vert. Ojos de Ascotán 1	581242	7601543	-11.0	-92.0	-2.7							
Vert. Ojos de Ascotán 2	581761	7602093	-10.9	-93.0	-1.8							
CHU-4 115m	571359	7568319	-11.8	-96.0	-5.9							
CHU-4 220m	571359	7568319	-11.9	-98.0	-7.6							
Nieve Pampa Cachimba	590054	7578053	-12.6	-81.0								
B-2 50m	575202	7571545	-10.8	-83.0	-2.4	-11.0	-72.0	-10.9	-81.0			
B-2 100m	575202	7571545	-10.7	-84.0	-2.0							
CHU-1obs. 50m	574328	7571545	-6.9	-69.0	-9.9							
CHU-1 88m	574328	7571545	-10.9	-83.0	-2.5							
CHU-2 120m	575202	7571545	-11.5	-86.0	-3.3							
Inacaliri	594037	7564956	-12.0	-94.0	-5.6	-12.6	-96.0			-11.4	-73.0	
CHU-5 100m	565631	7569711	-10.4	-79.0	0.0							
PB-4 20m	571547	7568671	-9.5	-70.0	1.4	-9.0	-74.0	-9.0	-73.0			
B-3 60m	574737	7570132	-7.2	-71.0	-7.7	-7.2	-73.0	-7.3	-69.0			
B-1obs 80m	574328	7571545	-11.5	-92.0	4.6							
B-1 100m	574328	7571545	-9.2	-73.0	-0.4							
SP-2	569771	7569141	-10.3	-79.0	2.7	-9.7	-79.0			-10.0		
OSP	570912	7570683	-10.4	-78.0	-3.0				-10.8	-77.0	-10.7	-71.0
Dren-1	570485	7569719	-10.0	-79.0	-1.2							
Dren-2	572407	7568906	-10.8	-79.0	-1.7							
SP-1	569972	7569293	-10.2	-78.0	3.5	-9.3	-73.0		-9.3	-10.1	-63.0	

Tabla 2-6. Valores de valores $\delta^{18}O$, $\delta^{2}H$ y $\delta^{13}C$ de los pozos, vertientes y cursos superficiales de la cuenca del río Loa. Fuente: AGUA, 1985.

ARAVENA, Ramón; SUZUKI, Osamu. Isotopic Evolution of River Water in the Northern Chile Region. En: Water Resources Research. Vol. 26, N°12, , 1990. 2887-2895 p.

En este estudio se exponen los resultados de la evolución isotópica y química de las aguas del río Loa, para la zona comprendida entre Lequena y Calama, y Tarapacá.

Isotópicamente se obtienen valores de $\delta^{18}O$, $\delta^{2}H$ y $\delta^{13}C$ (DIC) y ^{14}C de los puntos del río Loa desde Lequena a Chiu Chiu, y del río San Pedro como referencia, y se compara con los resultados obtenidos en el presente estudio. Se han considerado también las teorías relacionadas con la distribución de estos isótopos en la cuenca del río Loa, **Figura 2-13**.

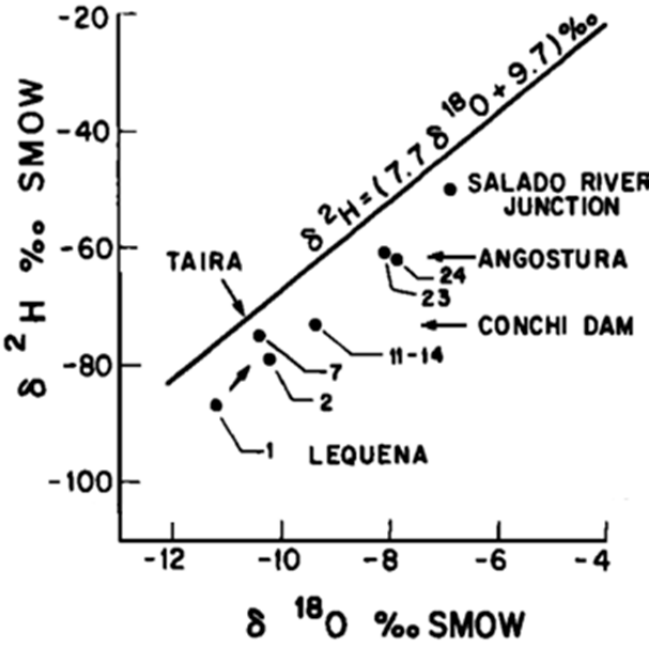


Figura 2-13. Diagramas composición isotópica del río Loa. Fuente: Aravena y Suzuki, 1990.

En la **Tabla 2-7** se presentan los resultados del análisis químico del agua muestreada en diferentes puntos del río Loa y del río San Pedro.

Localización	T (°C)	pH	Ca^{+} (meq/L)	Mg^{2+} (meq/L)	Na^{2+} (meq/L)	K^{+} (meq/L)	HCO_3^{-} (meq/L)	SO_4^{2-} (meq/L)	Cl^{-} (meq/L)	SiO_2 (meq/L)	SI*
Loa en Lequena	19,4	9	3,8	1,9	5,1	0,4	3,1	4,5	3,9	75	1,4
Loa Cerro Las Papas	18,2	8,2	7,2	3,6	9,4	0,5	6,9	2,4	12,1	67	1,19
Loa Quinchamale	15,8	8,2	7,3	3,7	9,5	0,5	6,5	2,6	12,1	79	1,15
Loa Santa Bárbara	16,9	8	7,7	4,1	10,4	0,5	6,9	2,5	12,1	79	1,02
	12,1	7,7	7,3	4,5	9,6	0,5	7,2	2,5	12,2	75	
Loa Lasana	9	8,4	5,8	6	13,5	0,7	7,2	3,5	15,7	81	1,21
Loa Chiu-Chiu	11,8	8,5	6	6,4	13,5	0,7	7,2	3,7	17,9	79	1,31
San Pedro Aforo	21,1	7,5	3,5	3,4	5,2	0,4	5,8	2	5,1	105	1,36
San Pedro Sifón	12,3	8,8	3,5	3,4	5,2	0,4	6,1	2	5,4	106	0,28

*SI = Índice de saturación de calcita.

Tabla 2-7. Composición química del río Loa y del río San Pedro. Fuente: Aravena y Suzuki, 1990.

MARDONES, Léonardo. Flux et évolution des solutions salines dans les systèmes hydrologiques des salars d´Ascotán et d´Atacama. Tesis Doctoral. Universidad de Paris-Sur. Paris. 1998. 203 p.

En el informe MARDONES (Mardones, 1998), se lleva a cabo un estudio detallado de la hidrogeología de los salares de Ascotán y Atacama, usando datos hidroquímicos e isotópicos.

De este documento se han extraído la Tabla 43 donde se presentan los valores isotópicos de $\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$ de muestras de lluvia y nieve de la cuenca del salar de Ascotán. En la **Tabla 2-8** se muestran los valores isotópicos de ^{13}C y ^{18}O de muestras de vertientes y pozos de la cuenca de Ascotán, de Ojos de San Pedro y del río Loa.

Identificación	Actividad %	δ ‰ ^{13}C (PDB)	δ ‰ ^{18}O (PDB)
Ascotán este			
V-11	11,3±0,5	-3.03	-11.71
V-10	12,8±0,6	-5.57	-12.84
V-5	21,5±0,9	-7.98	-12.93
V-2	24,4±0,8	-9.07	-11
ASB-20	11,7±1,4	-9.66	-3.26
ASB-10	13,8±0,8	-5.01	-9.36
Sedimento 70 cm	55,6±0,6	-0.93	-2.02
Ascotán oeste			
V-Polapi	86,2±2,2	-13.42	-9.61
ASB-40	17,9±1,7	-2.63	-8.23
Quebrada Perdiz			
CHU-35	24,9±0,6	-4.71	-12.4
Ojos San Pedro			
CHU-10	5,7±0,6	1.13	-6.65
Dren	4,4±0,3	-2.27	-14.92
Río Loa			
Quinchamali	17,9±0,3	1.99	-7.74
Lequena	33,8±0,9	0.47	-9.08

Tabla 2-8. Valores isotópicos de ^{13}C y ^{18}O del Salar de Ascotán. Fuente: Mardones, 1998.

RISACHER, François; ALONSO, Hugo; SALAZAR, Carlos. Geoquímica de aguas en cuencas cerradas: I, II y III Regiones – Chile. S.I.T N°51. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas (DGA)-UCN-IRD. Santiago, Enero, 1999. 299 p.

En este informe se realiza un estudio hidroquímico de las cuencas cerradas del norte de Chile. Existen datos sobre la composición química de las aguas superficiales y subterráneas, y de sus diferentes evoluciones en los salares.

Del estudio de RISACHER (Risacher, 1999) se emplean como referencia para el presente trabajo los valores de composiciones químicas de las aguas de los salares de Alconcha, Carcote y Ascotán. También se utilizan los análisis hidroquímicos de 9 muestras de nieve de la Tabla 6 del informe.

En la **Tabla 2-9** se muestra las coordenadas, altura y tipo de muestra que se ha tomado en la campaña de terreno en el salar de Carcote.

Nombre	Fecha	Hora	Coordenadas UTM		Altura	Tipo de muestra
			Este	Norte		
CAR-1	10/6/1994	10:30	559050	7642250	4100	Manantial corriente
CAR-2	10/6/1994	11:00	559325	7642325	4100	Manantial corriente
CAR-3	10/6/1994	12:20	563250	7638700	3690	Laguna
CAR-4	10/6/1994	12:45	563300	7638525	3690	Napa ("ojo" en el salar)
CAR-5	10/6/1994	14:15	559160	7634690	3691	Manantial
CAR-6	10/6/1994	14:30	559293	7634650	3690	Laguna
CAR-7	10/6/1994	14:45	559231	7634650	3690	Poza
CAR-8	10/6/1994	15:00	559260	7634664	3690	Poza
CAR-9	10/6/1994	15:15	559185	7634735	3690	Napa (cateo)
CAR-10	10/6/1994	15:25	559229	7634728	3690	Poza
CAR-11	10/6/1994	15:40	559270	7634685	3690	Poza
CAR-12	10/6/1994	16:40	560125	7631200	3691	Manantial corriente
CAR-13	10/6/1994	17:00	560200	7631375	3690	Laguna
CAR-15	10/7/1994	11:10	568900	7640815	3691	Manantial corriente
CAR-16	10/7/1994	11:40	569100	7640800	3690	Napa (cateo)
CAR-17	10/7/1994	12:25	569040	7640900	3690	Laguna
CAR-18	10/7/1994	12:45	568750	7641775	3691	Manantial corriente
CAR-19	10/7/1994	13:00	568755	7641775	3690	Napa (cateo)
CAR-20	10/7/1994	13:25	568790	7641775	3690	Laguna muy superficial
CAR-21	10/7/1994	14:30	569000	7644775	3690	Laguna
CAR-22	10/7/1994	15:25	569150	7645250	3691	Manantial corriente
CAR-24	10/7/1994	16:30	571625	7633875	3690	Manantial difuso
CAR-25	10/7/1994	17:15	564400	7630975	3691	Manantial corriente
CAR-26	10/7/1994	17:30	564625	7631200	3690	Laguna

Tabla 2-9. Puntos de muestreo en el salar de Carcote. Fuente: Risacher *et al.*, 1999.

FERROCARRIL DE ANTOFAGASTA A BOLIVIA (FCAB). Estudio hidrogeológico y modelo de simulación, sector estación Polapi, II Región. Dirección General de Aguas. Santiago. 2003. 350 p.

Este informe presenta un estudio hidrogeológico para solicitar un derecho de aprovechamiento de aguas subterráneas en un pozo ubicado en el sector de Polapi e incluye un análisis hidroquímico de aguas subterráneas y superficiales.

Se caracterizan químicamente las aguas subterráneas muestreando los pozos PLE-1, PPE-2, PPE-3, PPE-4 y SEP-1 y las aguas superficiales del río Loa en la represa Lequena y en Quinchamali. Los valores de la composición hidroquímica de estas aguas se presentan en el capítulo de hidroquímica e isotópica.

CADE-IDEPE CONSULTORES EN INGENIERÍA. Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad, Cuenca río Loa. Dirección General del Agua (DGA), Santiago, 2004. 149 p.

Este informe presenta una clasificación de las aguas de las aguas de toda la cuenca del rio Loa, donde se incluyen los cauces del los ríos Loa, Salado, San Pedro Toconce y San Salvador. La clasificación se realiza según la *"Guía para el Establecimiento de las Normas Secundarias de Calidad Ambiental para Aguas Continentales Superficiales y Marinas"* (CONAMA, 2004).

Finalmente definen las zonas y elementos que se han de controlar y proponen un plan de control para cada zona según los usos del agua.

DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS. Sistematización, especialización y análisis de datos isotópicos en muestras de agua del norte de Chile, DSDT-221. Departamento de estudios y planificación, Dirección General del Agua (DGA), Santiago, Junio, 2005. 91 p.

En esta publicación de la DGA se realiza una recopilación de la información isotópica de $\delta^{18}O/\delta^{2}H$ e hidroquímica de las regiones I, II, III y IV.

De esta publicación se ha extraído la recta meteórica local de precipitación de la región de Antofagasta del **Figura 2-14.**

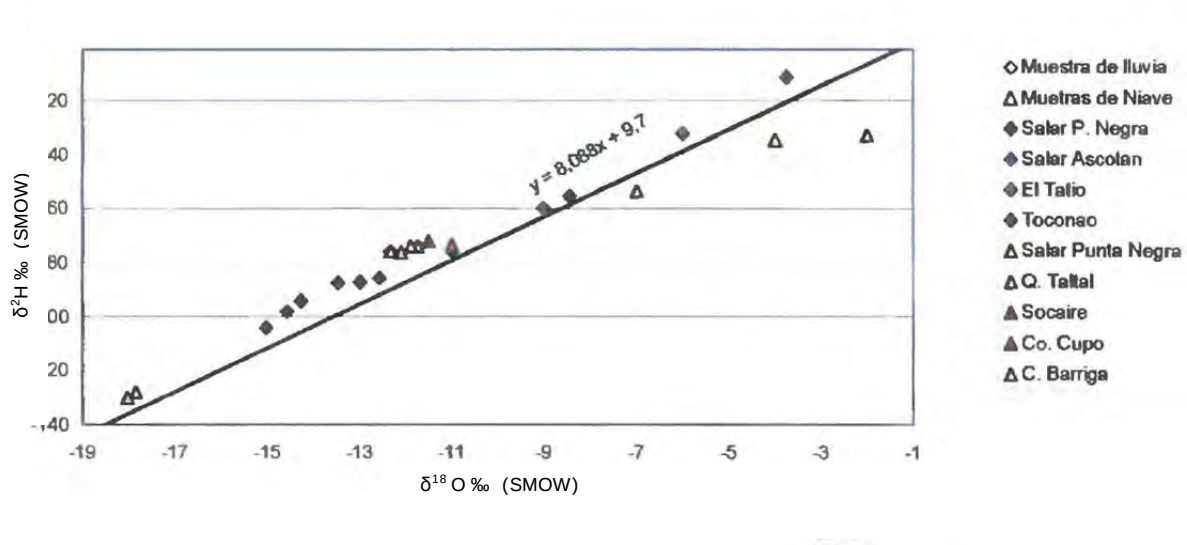


Figura 2-14. Gráfico que muestra la relación los valores isotópicos de $\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$ de la precipitación de la región de Antofagasta. Fuente: DGA, 2005.

VILLABLANCA, Daniela; HERRERA, Christian; PUEYO M., Juan José. Uso de perfiles de conductividad eléctrica e isótopos estables para estudiar la relación de agua dulce-agua salada: Salar de Ascotán. Congreso Geológico Chileno, Antofagasta, Agosto, 2006. 4 p.

En la presente publicación se realiza un estudio del sistema hidrogeológico de la parte oriental del salar de Ascotán en base a los perfiles de conductividad y la composición isotópica de la molécula del agua.

De este documento se ha extraído la Recta Meteórica Local además de obtener la recta de evaporación isotópica en los pozos cercanos al salar, **Figura 2-15**.

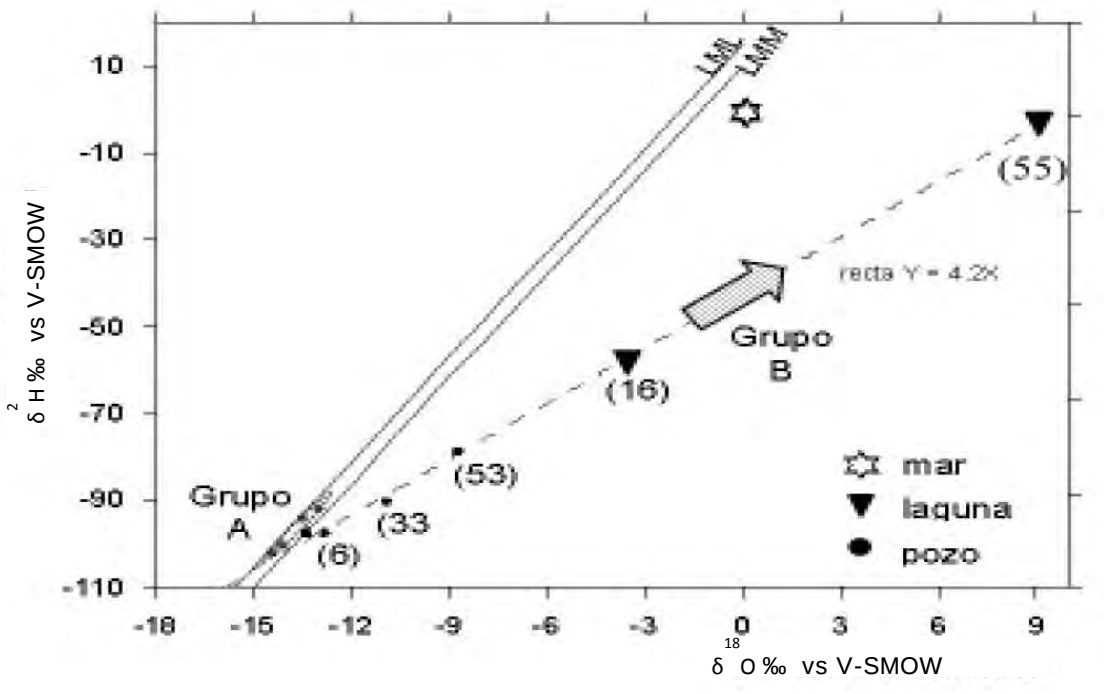


Figura 2-15. Composición isotópica de ^{18}O y ^{2}H de las aguas subterráneas en el borde oriental del salar de Ascotán. Fuente: Villablanca, 2006.

SGA LIMITADA. Declaración de Impacto Ambiental Proyecto Estudio hidrogeológicos salar de Alconcha. Anexo N°3, Estudio de Línea Base. Cía Minera Quebrada Blanca. Santiago, 2007. 112 p.

En este documento se realiza una presentación de la información recopilada y generada de la cuenca del salar de Alconcha para caracterizar los componentes ambientales del área de influencia dentro del proyecto de DIA "Estudios hidrogeológicos salar de Alconcha". En el capítulo de hidroquímica se realiza una caracterización de la composición de las aguas a partir de los resultados de los análisis de los elementos mayores.

De este informe se han obtenido de la Tabla-32 los resultados de 25 análisis químicos de elementos mayores provenientes de 11 pozos, una vertiente y un curso de agua superficial. Las coordenadas de los puntos de agua con información hidroquímica se han obtenido de la Tabla-31 y del mapa de ubicación de la Figura-23 (SGA, 2007). De los cuales se aprovecharon 11 análisis, descartando el resto por un error en el balance iónico superior al 10%.

En la **Figura 2-16** se muestran los cuatro mapas de líneas de isovalores de conductividad, sulfatos, cloruros y bicarbonatos elaborados a partir de los valores obtenidos en el análisis químico realizado en las muestras tomadas en la campaña de 2007.

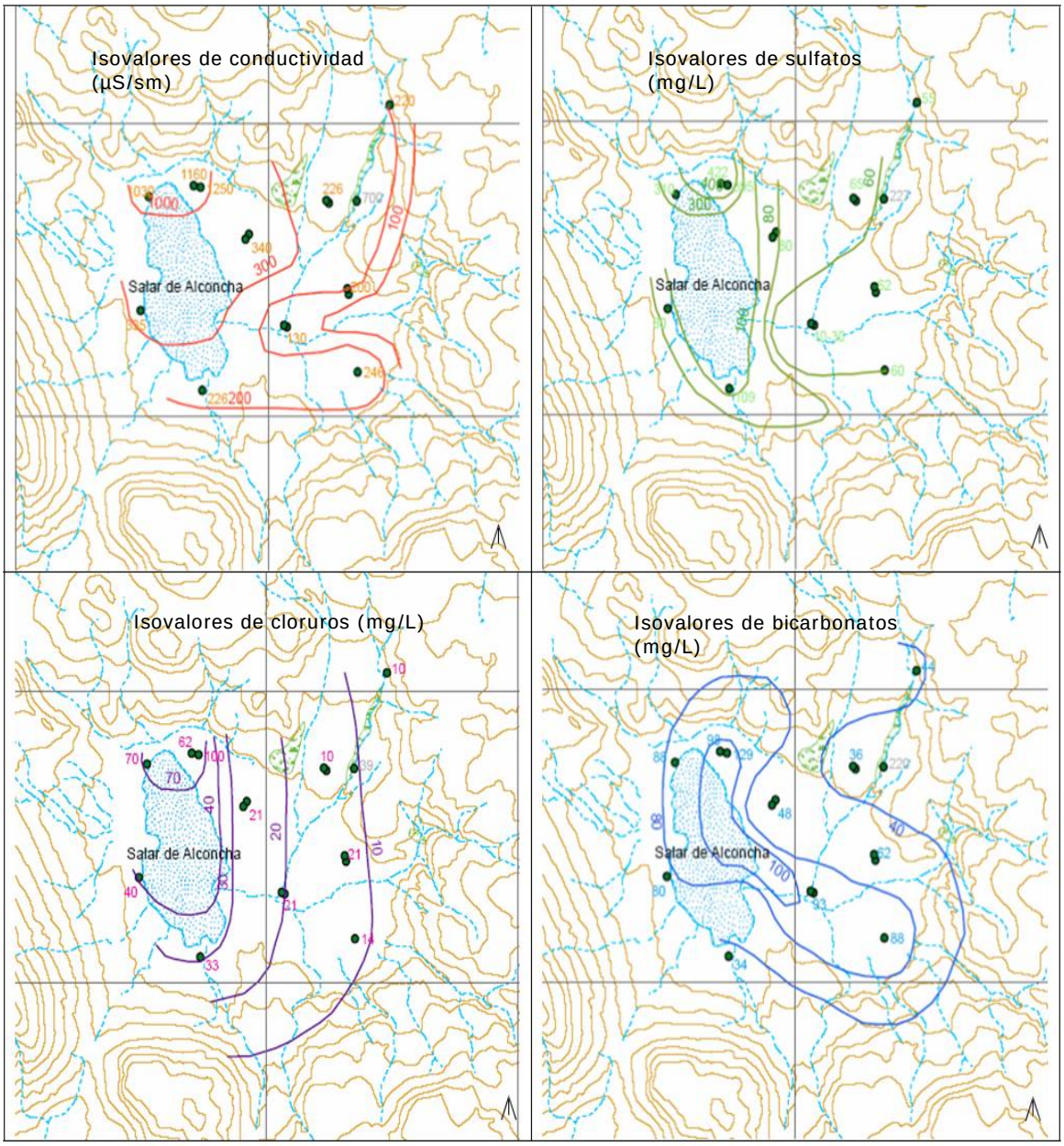


Figura 2-16. Mapas de líneas de isoniveles de conductividad, sulfatos, cloruros y bicarbonatos. Fuente: SGA, 2007.

GP CONSULTORES LIMITADA. Plan de alerta temprana de Pampa Puno del proyecto Suministro, construcción y operación de aducción Pampa Puno. Corporación* Nacional *del Cobre, Santiago, 2008. 166 p.

En este documento se hace un reporte al Servicio de Evaluación Ambiental por parte de Pampa Puno de las variables a monitorear en dicha cuenca. Las variables monitoreadas son niveles de pozos, niveles de lámina de agua en la Vega Sapunta, caudales en el río Loa y calidad química en los pozos de Pampa Puno.

De este reporte se han obtenido las composiciones químicas mayoritarias mensuales de los pozos de Pampa Puno entre los años 2005 y 2007. La **Tabla 2-10**, expone la composición química del análisis realizado en las diferentes muestras tomadas en el pozo Puno-4B.

Fecha	pH	CE	HCO_3	CO_3	SO_4	Cl	Na	K	Ca	Mg	Si
8/7/2003	7.3	238	24	5	38.7	27.8	18.4	2.72	19.2	2.03	9.8
9/4/2003	7.6	236	28	5	19.8	27.8	12	4.64	21.6	1.76	18
10/6/2003	7.5	230	70	5	4	27.7	7.84	3.44	28	2	3.9
12/3/2003	7.5	242	30	5	14	66.4	18.4	3.44	34.4	25.22	3
1/13/2004	7.9	239	40	5	14	26.8	8.8	2.56	28	2.24	24.2
3/30/2004	7.8	231	38	5	19.8	31.2	12	2.88	27.2	2.4	8.8
4/26/2004	8	245	50	5	17.7	31.9	22.4	3.76	24	2.48	8.6
1/26/2005	7.6	241	20	5	15.6	35.1	7.2	2.88	26.4	2	9.6
8/28/2005	7.9	232	38	5	18.9	28.6	15.2	3.68	17.6	2.64	18.3
9/10/2005	8.1	226	40	5	4	28.8	7.84	0.16	18.56	2.34	15.4
1/24/2006	8.3	299	45	5	18.9	48.9	13.6	4.4	33.6	3.2	14.3
7/26/2006	7	238	38	5	18.9	27.6	14.4	8	25.6	1.99	9.3
8/29/2006	7.7	234	39	5	36.6	31.3	9.6	2.72	26.4	2.08	13.3
9/25/2006	7.5	232	36	5	20.2	27.9	8	2.8	28	2.06	11.5
11/26/2006	7.7	228	35	5	22.2	34.6	13.6	2.96	28	1.92	12.6
12/16/2006	7.2	248	26	5	30	40	26	7.3	18	3.5	9.9
1/26/2007	7.7	236	42	5	19.3	31.4	6.24	2.8	26.4	2.2	12.3
2/18/2007	7.9	237	41	5	16.9	35.6	12	5.28	22.16	2.39	13
3/26/2007	7.8	233	50	5	18.9	31.6	13.6	3.52	28	2.16	10.1
4/30/2007	7.1	238	79	5	21.4	31.2	12.8	4.96	28.8	2.31	9.1

Tabla 2-10. Valores de la composición química del muestreo en el pozo Puno-4B. Fuente: GP, 2008.

VILLABLANCA, Daniela. Estudio de la relación isotópica $\delta^{18}O/\delta^{2}H$ de los manantiales en el sector de las nacientes del Loa, Región Antofagasta. XII Congreso Geológico Chileno, Santiago, Noviembre, 2009. 4 p.

En este artículo se realiza un análisis de la composición isotópica de los isótopos de la molécula del agua en las vertientes situadas alrededor del nacimiento del río Loa, además se realiza una correlación entre los valores isotópicos de $\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$ con la altura topográfica de los manantiales.

De este artículo se ha obtenido la Recta Meteórica Local en la zona de las nacientes del Loa, los valores isotópicos de $\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$, la correlación entre el contenido isotópico y la altura de muestreo, **Figura 2-17.**

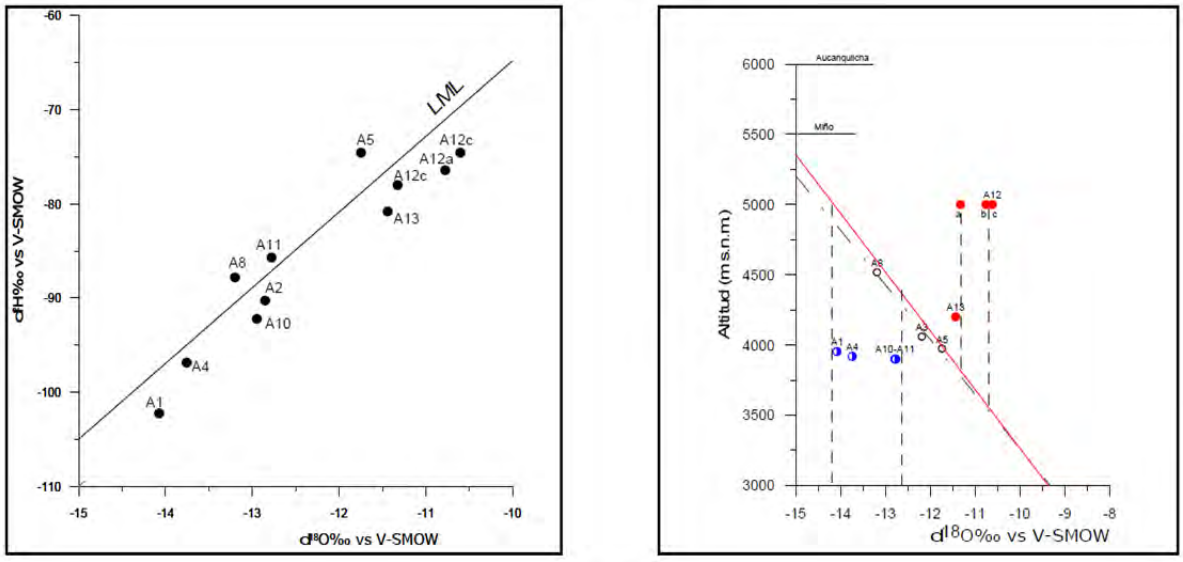


Figura 2-17. Figura de la izquierda muestra la relación entre los valores isotópicos de $\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$,la figura de la derecha la correlación entre el contenido isotópico y la altura de muestreo. Fuente: Villablanca, 2009.

2.5 BALANCE HÍDRICO

Se ha recopilado 6 estudios que dan cuenta de balances hídricos dentro del area de estudio.

MARDONES, Léonardo. Flux et évolution des solutions salines dans les systèmes hydrologiques des salars d´Ascotán et d´Atacama. Tesis Doctoral. Universidad de Paris-Sur. Paris. 1998. 203 p.

Esta tesis doctoral constituye la base del modelo conceptual de posteriores estudios de otros autores, ya que toman como referencia los valores de los caudales de recarga y descarga en el salar de Ascotán, **Tabla 2-11**, y el propio modelo conceptual .

En este informe se detalla el modelo conceptual del salar de Ascotán, en el que se considera una conexión hidráulica entre el salar de Ascotán hacia Carcote y se estima dicho caudal de infiltración.

Entrada (L/s)		**Salida (L/s)**		**Balance (L/s)**
Precipitación	7.404			
		Evaporación	6.723	
		Carcote	15	
			TOTAL	**666**

Tabla 2-11. Valores estimados de los caudales de entrada y salida de agua subterránea en el salar de Ascotán. Fuente: Mardones, 1998.

RISACHER, François; ALONSO, Hugo; SALAZAR, Carlos. Geoquímica de aguas en cuencas cerradas: I, II y III Regiones – Chile. S.I.T Nº51. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas (DGA)-UCN-IRD. Santiago, Enero, 1999. 299 p.

Los objetivos principales de este informe son determinar la calidad de las aguas de los manantiales que aportan agua a diferentes salares del norte de Chile, la caracterización hidroquímica de estos salares y su balance hídrico. Se logra cumplir los anteriores objetivos a partir de la recopilación de antecedentes y del análisis de las muestras de agua tomadas en diferentes campañas de terreno.

Para el presente estudio se han tenido en cuenta las componentes del balance hídrico que expone este informe y valores de los caudales de recarga y descarga de agua subterránea en los salares de Alconcha, Carcote y Ascotán. Presenta un balance hídrico de cada salar, **Figura 2-18**, con los valores estimados de altura de agua que precipita y se evapora anualmente, la superficie de cada salar y el volumen de agua subterránea de aporte desde las partes altas de las subcuencas y el volumen de agua subterránea infiltrada.

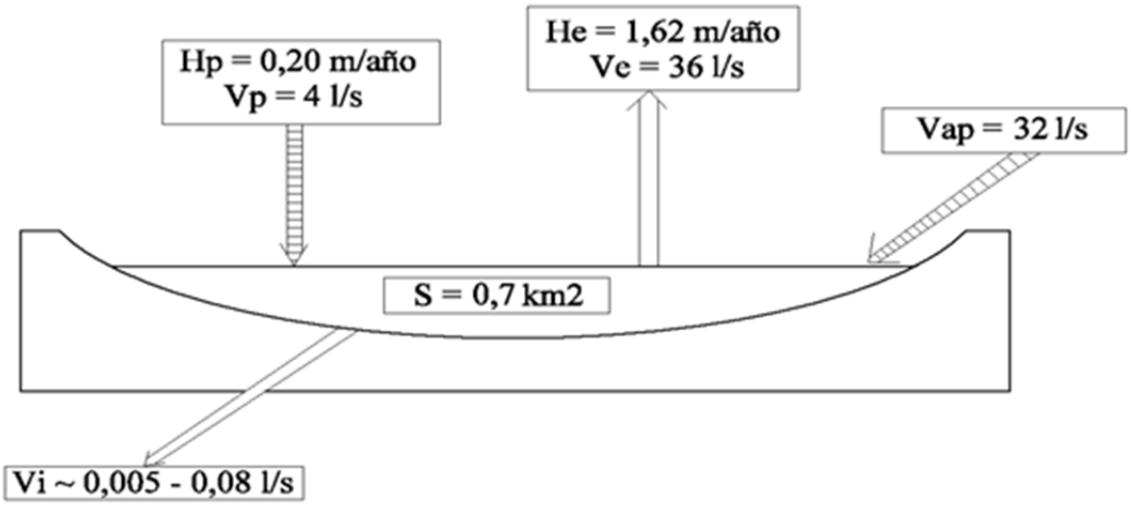


Figura 2-18. Balance hídrico del salar de Alconcha. Fuente: Risacher *et al*., 1999.

DIRECCIÓN GENERAL DE AGUA. Evaluación de los recursos hídricos, sectores Calama y Llalqui, cuenca del río Loa. S.I.T. Nº 85. Dirección General de Aguas (DGA). Departamento de Estudios y Planificación. Santiago. 2003. 113p.

Se presenta un balance hídrico de la cuenca completa del río Loa para evaluar la disponibilidad de agua subterránea en sectores específicos y los efectos de una intensa explotación de agua subterránea sobre los recursos superficiales.

Este informe presenta un esquema con el balance hidrológico de los sectores del Loa Alto, de la subcuenca del río San Pedro y del sector comprendido entre Lasana y Chiu Chiu, definiendo los caudales de la recarga por precipitación y la descarga por evaporación. Posteriormente se calculan los caudales de escorrentía superficial y subterránea, **Figura 2-19**.

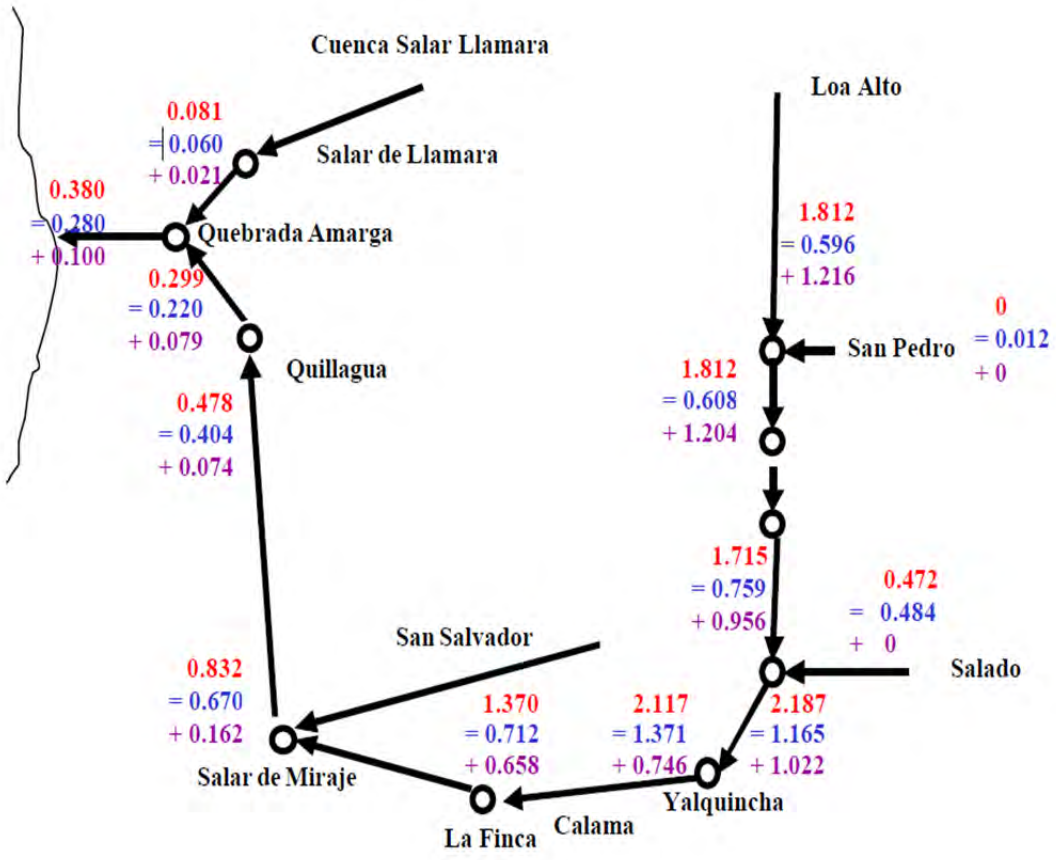


Figura 2-19. Esquema de la separación de la escorrentía total (rojo) en escorrentía superficial (azul) y escorrentía subterránea (morado) del río Loa. La unidad de los caudales es m^3/s. Fuente: *Salazar, 2003.*

DICTUC. Hidrogeología de la II región y asesoría para la revisión de informes de estudios de evaluación de recursos hídricos. Dirección General de Aguas (DGA), Santiago, 2005. 309 p.

DICTUC (DICTUC, 2005) caracteriza las subcuencas del salar de Ollagüe, Carcote y Ascotán a nivel hidrológico, geológico, hidrogeología y finaliza con el balance hídrico de cada una de ellas.

Además explica un modelo de simulación hidrogeológico que realiza INGEDOS (1999) para un Estudio de Impacto Ambiental de un proyecto de extracción de un caudal de 400 l/s de agua subterránea solicitado por Codelco-División Chuquicamata.

Se han obtenido los valores de las profundidades del nivel estático en diferentes pozos y los datos geofísicos dan cuenta de la ocurrencia de estratos saturados a partir de los 400 m de profundidad.

En la **Tabla 2-12** se muestran los valores estimados de los caudales de recarga y descarga de cada componente considerados en el balance hídrico del salar de Ollagüe, Carcote y de Ascotán

Subcuenca		Entrada (l/s)		Salida (l/s)		Balance (l/s)
Salar de Ollagüe		Precipitación	2.101,4			
				Evaporación	1.786,9	
		TOTAL				**314,5**
Salar de Carcote		Precipitación	1.397			
		Infiltración Ascotán	15			
				Evaporación	850	
		TOTAL				**562**
Salar de Ascotán*	Balance 1	Flujo subterráneo	887	-		
		TOTAL				**887**
	Balance 2	Balance hídrico	7.404	Evaporación	6.723	
		TOTAL				**681**
	Balance 3	Precipitación**	857	Evaporación**	857	
		TOTAL				**0**

*DICTUC calcula la recarga de 3 formas: flujo subterráneo, balance hídrico y evaporación.

** El caudal de precipitación es igual a la evaporación porque se considera que la cuenca del Salar de Ascotán es endorreica.

Tabla 2-12. Valores de las entradas, las salidas y el balance de los modelos conceptuales de las subcuencas del salar de Carcote y de Ascotán. Fuente: DICTUC, 2005.

SGA LIMITADA. Declaración de Impacto Ambiental Proyecto Estudio hidrogeológicos salar de Alconcha. Anexo N°3, Estudio de Línea Base. Cía Minera Quebrada Blanca. Santiago, 2007. 112 p.

La evaluación de los recursos hídricos subterráneos de la subcuenca del salar de Alconcha que forma parte del informe de SGA (SGA, 2007) fue realizada por la empresa INGEOREC. En el apartado de hidrología se calcula el valor de la recarga que se produce en la subcuenca del salar de Alconcha mediante los métodos Turc y Countange. En la **Tabla 2-13** se observa que los valores obtenidos aplicando la fórmula de Coutange (89 l/s) son prácticamente el doble que la calculada por la fórmula de Turc (36 l/s).

Además, en la Tabla Nº 27 del informe de SGA se muestra una comparación de valores de recarga que aparecen en estudios de la cuenca Michincha, Coposa, Huasco, Ascotán, Carcote y Ojo de San Pedro, donde se puede comparar la recarga por km^2 de cuenca hidrográfica aportante.

Cuenca	Área (km^2)	Estudio	Metodología	Recarga (l/s)	Rendimiento (l/s/km^2)
Alconcha	133	INGEOREC (2007)	Turc	36	0,27
			Countange	89	0,67

Tabla 2-13. Valores de la recarga en la subcuenca del salar de Alconcha. Fuente: SGA, 2007.

SCHLUMBERGER WATER SERVICES CHILE LIMITADA. Actualización del modelo conceptual hidrogeológico y desarrollo de un modelo numérico. Sociedad Contractual Minera EL ABRA. Santiago, 2009. 64 p.

El modelo conceptual del informe de SCHLUMBERGER (Schlumberger, 2009) define como principales unidades acuíferas, el acuífero sedimentario somero no consolidado y no confinado, y el acuífero de brecha sedimentaria más profundo.

En el documento de SCHLUMBERGER (Schlumberger, 2009) se calculan dos balances hídricos, por un lado se obtiene el balance de la cuenca completa de Ascotán y por otro lado, el balance del sector sur-central del salar. En la **Tabla 2-14** se muestra el método empleado para calcular el caudal de recarga y se indica que datos presentan un grado de incertidumbre. Además, en la **Figura 2-20** se expone el modelo conceptual del sector sur del salar de Ascotán en la que muestra las zonas de recarga y descarga de agua subterránea, estructuras geológicas y las unidades hidrogeológicas.

Metodología	Recarga (l/s)	Incertidumbre
Relación Precipitación-cota (15% recarga)	Total: 804	Incertidumbre sobre el porcentaje de precipitación que se infiltra y recarga al acuífero.
Tasa de evaporación de Mardones	Total: 771	Los datos obtenidos mediante los lisímetros son limitados, hay incertidumbre en la evaporación desde el núcleo del salar.

Tabla 2-14. Resumen de las estimaciones de recarga en la toda la subcuenca de Ascotán. Fuente: Schlumberger, 2009.

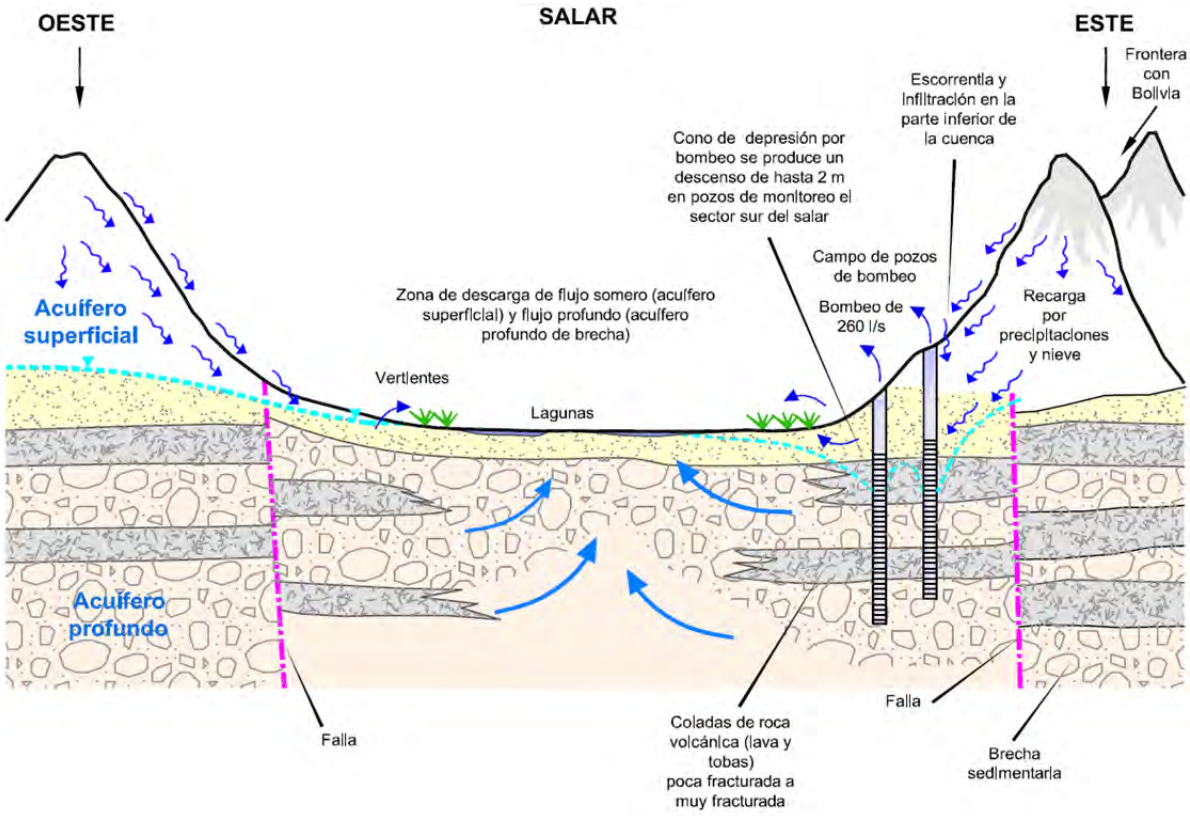


Figura 2-20. Esquema del modelo conceptual del sector sur del salar de Ascotán. Fuente: Schlumberger, 2009.

3 CAMPAÑAS DE TERRENO

3.1 DISEÑO Y PLANIFICACIÓN

El diseño de las campañas de terreno fue realizada en gabinete y, a nivel técnico sirvió para predefinir los puntos a muestrear, determinar el protocolo de muestreo de las aguas y seleccionar los laboratorios para los análisis químicos e isotópicos.

3.1.1 ELECCIÓN DE PUNTOS

La determinación de los puntos de muestreo en la campaña de octubre 2013 fue realizada a través de tres herramientas diferentes. La más importante de ellas a partir de la cual se localizaron la mayoría de puntos de muestreo de aguas superficiales y vertientes fue Google Earth. La localización de puntos de muestreo con esta herramienta para aguas superficiales se realizó en base a la disponibilidad de caminos que garantizaran un buen acceso a ríos y lagunas. Por otro lado, los pequeños oasis de vegetación fácilmente identificables a través de imagen satelital permitieron determinar la mayoría de puntos de muestreo relativos a vertientes. La selección de todos los puntos de muestreo localizados a través de Google Earth para aguas superficiales y vertientes se realizó bajo el condicionante de conseguir una distribución homogénea de los puntos y mostrar la mayor representatividad de las diferentes huellas químicas.

La segunda herramienta utilizada para la elección de puntos de muestreo fue el Catastro Público de Aguas de la DGA. A través de este catastro se localizaron todos los pozos con derechos concedidos en la zona de estudio. Sin embargo, por dificultades en la comunicación con algunos de los propietarios sólo fue posible conseguir los permisos de acceso a los pozos propiedad de Sociedad Contractual Minera El Abra localizados en la cuenca de Ascotán.

El reconocimiento en terreno de las condiciones de calidad y acceso de los puntos de muestreo seleccionados en gabinete permitió redefinir algunos de ellos modificando su ubicación o directamente eliminándolos por motivos de difícil accesibilidad o baja representatividad. Este método fue la tercera herramienta utilizada en la elección de puntos de muestreo que, además de puntos de muestreo en aguas superficiales y vertientes, también permitió incluir nuevos puntos de muestreo de aguas subterráneas de pozos que se encontraron abiertos durante el transcurso de la campaña.

Por lo que respecta al diseño de la campaña de diciembre de 2013, esta requirió de menos trabajo previo de gabinete. Esto se debió a que el objetivo principal de la campaña de diciembre en relación al estudio químico era identificar posibles variaciones estacionales en los patrones químicos. De este modo, se respetaron la gran mayoría de puntos de muestreo de la campaña de octubre previa.

En la campaña de diciembre de 2013 tuvo especial relevancia la relocalización en terreno de algunos puntos de muestreo de la campaña de octubre. Esto se realizó bajo la restricción del estudio de posibles variaciones estacionales pero con el añadido de complementar los resultados de la campaña de octubre con nuevos puntos de muestreo en localizaciones estratégicas.

Las secciones de aforo consideradas en la campaña de diciembre fueron previamente determinadas a través de Google Earth bajo las mismas premisas de homogeneidad en la distribución y facilidad de accesos que rigieron la elección de puntos de muestreo. Sin embargo, en terreno fueron modificados algunos puntos de aforo a causa de dificultades en los accesos o por condiciones de aforo de pobre calidad o con riesgo de medición para los técnicos. Estas dificultades aparecieron principalmente en la parte baja del río Loa especialmente a partir del embalse Conchi.

3.1.2 PROTOCOLO DE MUESTREO

El protocolo de muestreo utilizado en las campañas de terreno fue diferente según los objetivos de cada punto de medición de parámetros de terreno, muestreo de aguas o aforos. La localización de cada uno de ellos se realizó con GPS navegador (GARMIN Etrex 30) en coordenadas UTM WGS 84.

Parámetros de Terreno

Los parámetros fisicoquímicos de los puntos de muestro seleccionados se obtuvieron *in situ* electrónicamente mediante el medidor multiparamétrico HANNA HI-9828 (HANNA Instruments, 2014). Los parámetros fisicoquímicos registrados incluyeron temperatura, pH, potencial de oxidación-reducción (ORP), conductividad eléctrica (CE), oxígeno disuelto (OD) y sólidos disueltos totales (SDT). Este medidor fue objeto de diversas calibraciones durante las campañas de terreno especialmente realizadas tras mediciones en salares. Los diferentes sensores del medidor fueron descontaminados tras cada medición con agua destilada. El recipiente utilizado para la obtención de los parámetros de terreno tenía una capacidad de 0,5 litros y era limpiado con el propio agua de muestreo antes de cada medición.

Muestras de Agua

Las muestras de agua fueron recogidas en cuatro botellas para sendos análisis de aniones, cationes, ^{18}O-^{2}H y ^{13}C. Todas ellas fueron limpiadas con el propio agua a muestrear antes de su llenado definitivo. El llenado de las botellas se realizó directamente del punto de muestreo con la propia botella o con la ayuda de un contenedor o jeringa de plástico que también fueron descontaminados con el agua a muestrear antes de su uso.

La cantidad de agua recogida para las muestras destinadas a análisis hidroquímicos fue de 1 litro en total para cada punto de muestreo separado en dos botellas de plástico de 0,5 litros para los respectivos análisis de aniones y cationes. El agua para análisis de aniones se tomó directamente sin ningún tipo de filtrado y ni aditivo. Las muestras de cationes, a diferencia de las anteriores, fueron filtradas con filtro de celulosa de 45 µm y acidificadas con ácido nítrico para su preservación. El volumen y concentración de esta solución de ácido nítrico fue preparado por el laboratorio y se encontraba incluida el interior de las botellas de cationes que, junto con las botellas de aniones, fueron facilitadas por el mismo laboratorio. El tipo de cierre de estas botellas es de rosca simple con lo que difícilmente se pudo alcanzar un llenado completo de las botellas libre de espacios con aire.

El muestreo isotópico se realizó en botellas de plástico de 25 ml para las muestras destinadas a los análisis de ^{18}O y ^{2}H mientras que para el ^{13}C se emplearon botellas de vidrio de 40 ml. Ambos tipos de botellas disponían de cierre a presión además del de rosca simple con lo que en la mayoría de ellas se consiguió un llenado completo sin espacios con aire. Las aguas destinadas a estos análisis no fueron filtradas ni conservadas con ningún tipo de aditivo.

El almacenado de las muestras tanto de hidroquímica como de isótopos hasta su envío se realizó en habitaciones cerradas y frescas protegidas de la radiación solar. El control de calidad de los análisis de los laboratorios fue realizado mediante la incorporación de muestras dobles dentro del set de muestras totales. En la primera campaña fueron 5 las muestras dobles enviadas mientras que en la segunda campaña fueron 3.

Los códigos de identificación de las muestras en la campaña de octubre de 2013 fueron constituidos por un número seguido de las siglas LAS, LAV o LAP. El número indica el orden en el que la muestra fue tomada desde el inicio de la campaña mientras que las siglas indican la región geográfica (Loa Alto) y el origen del agua muestreada: Superficial, Vertiente o Pozo. Las muestras de la segunda campaña análogas a las de

la primera campaña de muestreo conservaron los códigos iniciales de estas con la incorporación de un "2" al final para identificarlas así con la segunda campaña.

Los códigos de los puntos donde sólo se midieron parámetros de terreno se identifican por las siglas PT seguidas de un número que indica el orden de muestreo en la primera campaña y, para los de la segunda, a este código se le adjunta un "2". Los datos únicos de niveles freáticos provenientes de pozos son etiquetados con las siglas PPE seguido de un número para los pozos de Pampa Peineta en la subcuenca de San Pedro. Dos valores de niveles freáticos en dos pozos ubicados en el salar de Ascotán tienen códigos independientes que corresponden a Vertiente 12 y NF-1-2.

Aforos

El método empleado en las mediciones de aforos fue basado en el capítulo de medición de caudales con molinete del *"Manual básico para instrucción de hidromensores" (1991)* elaborado por la DGA. El dispositivo utilizado en terreno para el cálculo de velocidades fue un molinete GLOBAL WATER modelo FP111.

El método de aforo requirió de una barra graduada fijada en el lecho fluvial sobre la que se hacía deslizar verticalmente el molinete fijándolo en cada punto en que se deseaba medir la velocidad del flujo (**Figura 3-1**). La medición de la velocidad en cada punto fue de mínimo 60 segundos. El molinete se orienta perpendicular a la sección de aforo y las piernas del aforador lo más alejadas del molinete aguas abajo y orientadas según el sentido del flujo del agua. Las secciones de aforo fueron seleccionadas evitando dentro de lo posible irregularidades en el lecho.

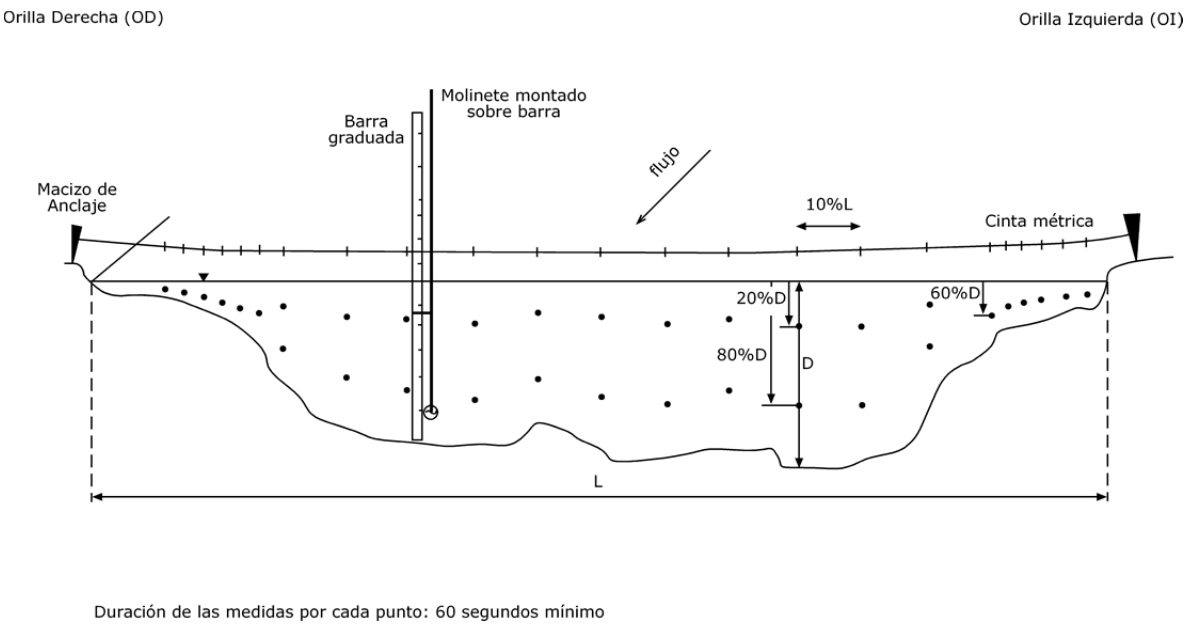


Figura 3-1. Método de muestreo para los aforos de la campaña de diciembre de 2013. Fuente: elaboración propia.

En relación a la subdivisión de la sección en tramos, en terreno se observó que en secciones con ancho menor a 120 cm la subdivisión de este en 5 tramos ofrecía unos resultados equivalentes a una subdivisión en 10 tramos. El resto de secciones de aforo con ancho superior a 120 cm fueron subdivididas en 10 tramos acorde con la norma.

El número de puntos de medición de velocidad en cada vertical fue determinado para cada subdivisión de la sección de aforo en función de la profundidad. En las secciones del cauce donde la profundidad fue mayor a 20 cm se empleó el método de los dos puntos por sección. Este método consiste en medición de la velocidad al 20% y 80% de la profundidad total del tramo. La velocidad del tramo es el promedio de ambas mediciones. En cauces de menor profundidad inferiores a 20 cm se empleó el método del 60%. Este método consiste en el cálculo de la velocidad al 60% de la profundidad del tramo desde la superficie (**Figura 3-1**). El empleo de este método se determinó al observar que, a causa de la precisión del molinete utilizado y dimensiones de su hélice, este no causaba diferencias en los resultados con respecto al método del 20% y 80%.

3.1.3 LABORATORIOS

Los laboratorios seleccionados para el análisis de las muestras fueron los mismos en las dos campañas. Las muestras para los análisis hidroquímicos fueron enviadas a:

DICTUC S.A. Vicuña Mackena 4860, Macul, Santiago, Chile. Certificado ISO 9001:2008 en Sistemas de Gestión Ambiental.

Por lo que respecta a las muestras de análisis isotópicos, estas fueron enviadas al siguiente laboratorio especializado en este tipo de análisis:

University of Waterloo Environmental Isotopes Laboratory. 200 University Avenue West, Waterloo, Ontario N2L 3G1, Canadá. Certificado ISO 17025 Quality Assurance / Quality Control.

3.2 CAMPAÑA DE TERRENO OCTUBRE 2013

A continuación se presentan los objetivos, descripción y alcances de la primera campaña de terreno realizada dentro del estudio "Caracterización hidrogeoquímica de la cuenca del Loa Alto". El objetivo inicial de esta campaña de terreno era la toma de 60 muestras para su análisis hidroquímico, 60 muestras para el análisis isotópico de ^{18}O, ^{2}H y ^{13}C además de la medición de 30 niveles de agua en pozos. En la **Tabla 3-1** se presentan los detalles de las principales actividades de terreno previstas inicialmente para esta primera campaña.

Actividad	Previsto	Descripción	Datos obtenidos
Muestreo Hidroquímico	60 muestras	muestras de 500 ml natural	pH, CE, Alc., HCO_3, Cl, SO_4, NO_3
		muestras de 500 ml filtrada (45 µm) y acidificada HNO_3	As, B, Ca, Mg, K, SiO_2, Na, Sr, Al
Muestreo Isotópico ^{18}O-^{2}H	60 muestras	muestras de 25 ml (plástico) naturales	$\delta^{18}O$(‰), $\delta^{2}H$(‰)
Muestreo Isotópico ^{13}C	60 muestras	muestras de 40 ml (vidrio) naturales	$\delta^{13}C$(‰) PDB
Medición Niveles Freáticos	30 mediciones	mediciones con pozómetro en pozos	cota NF (msnm)

Tabla 3-1. Especificaciones iniciales de la primera campaña de terreno. Fuente: elaboración propia.

La campaña de terreno se realizó entre los días 21 y 29 de octubre de 2013. El lunes 21 se realizaron todos los preparativos logísticos en Calama. Durante los días 22 y 23 de octubre se muestreó la zona correspondiente a los salares de Ascotán y Carcote. El día 24 de octubre se muestreó la zona noreste de la cuenca del Loa Alto, concretamente las zonas de los municipios de Amincha, Ollagüe, Kosca y Puquios. El

día 25 de octubre se muestreó la zona centro y sur de la cuenca, en particular el río Loa y sus puntos de agua más próximos; desde Lequena hasta Chiu Chiu. El día 26 se realizó el muestreo en la zona norte de la cuenca del Loa Alto; incluyendo el salar de Alconcha y el nacimiento del río Loa a los pies del volcán Miño. Durante el día 27 se recorrió la zona norte y noroeste de la cuenca; desde la zona oeste del nacimiento del río Loa hasta Lequena pasando por Pampa Puno. El lunes 28 de octubre, último día de muestreo, se recorrió la cuenca del río San Pedro además de la zona oeste del salar de Ascotán y el río Chela. El día 29 de octubre se destinó a la recogida de los equipos y traslado de éstos además de la preparación de las muestras para su envío. En la **Figura 3-2** se presenta el mapa de la cuenca del Loa Alto con las rutas diarias de la campaña de terreno de octubre de 2013.

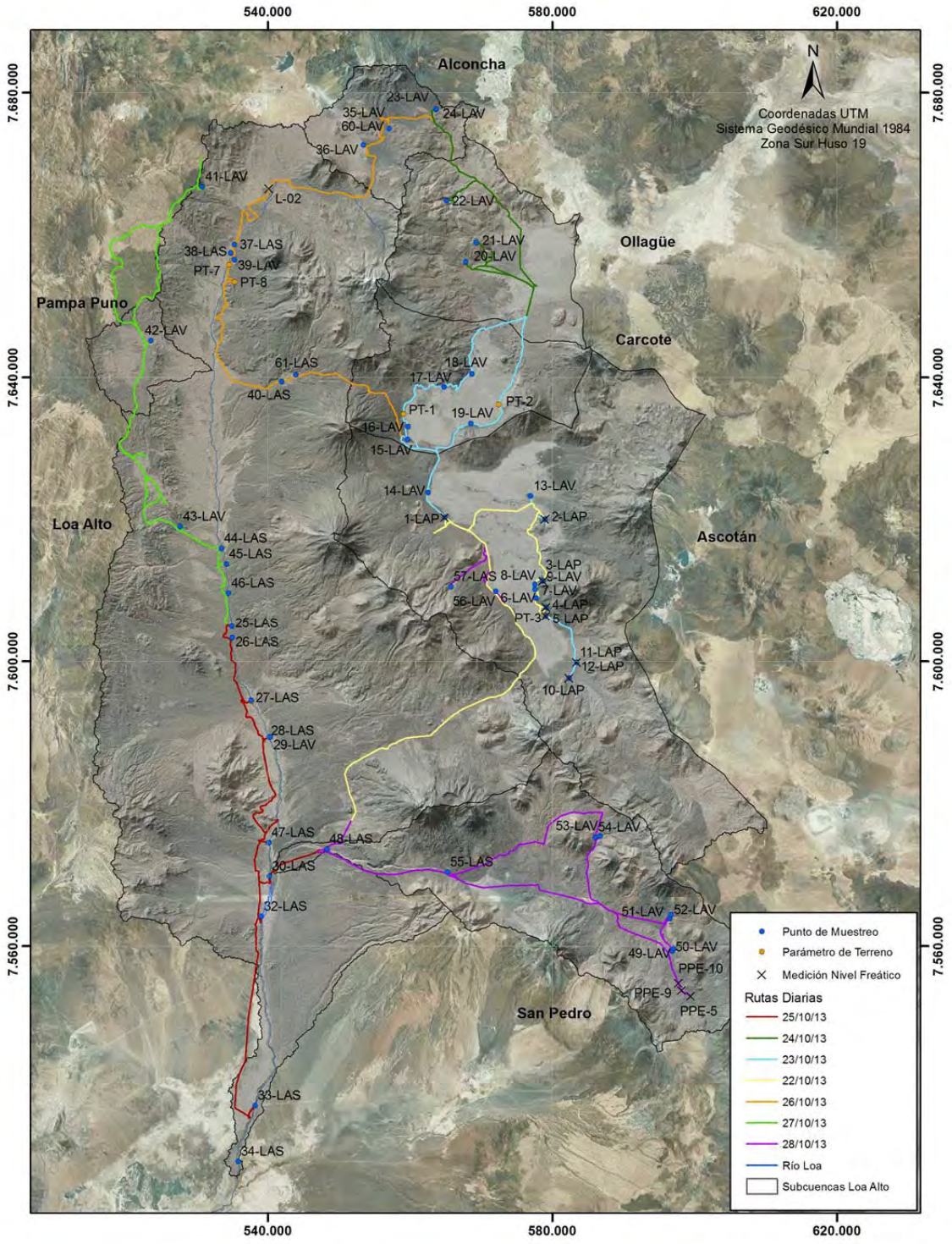


Figura 3-2. Puntos de muestreo y rutas diarias realizadas durante la campaña de terreno de octubre de 2013. Fuente: elaboración propia.

Al término de la primera campaña de terreno se recogieron 60 muestras hidroquímicas, 60 muestras isotópicas para ^{18}O y ^{2}H, 60 muestras isotópicas para ^{13}C, 63 mediciones de parámetros de terreno y 11 mediciones de niveles freáticos en pozos.

El número total de niveles freáticos medidos en pozos no llegó al objetivo propuesto en las bases técnicas, la razón principal fue que sólo se tuvo acceso a un número reducido de pozos privados. Estos fueron los pozos que la Sociedad Contractual Minera el Abra posee en la subcuenca de Ascotán.

En la **Tabla 3-2** se presenta el listado de los puntos de muestreo visitados en la campaña de terreno de octubre de 2013 indicando sus coordenadas de ubicación y el tipo de muestra tomada.

En la campaña de terreno de octubre se alcanzaron los objetivos específicos de muestreo. Se tomaron las 60 muestras indicadas en las bases técnicas para los 3 tipos de análisis (hidroquímica, molécula del agua y ^{13}C). En el laboratorio se analizaron químicamente los cationes Na^{+}, K^{+}, Ca^{2+}, Mg^{2+} y Si^{4+}, los aniones HCO_3^{-}, SO_4^{-2}, Cl^{-} y los elementos menores y traza Al, B, As y Fe junto con la molécula de CO_2. Los análisis isotópicos consideraron ^{18}O, ^{2}H y ^{13}C.

La distribución de los puntos de muestreo abarcó toda el área de estudio, es decir, incluyendo los salares de Ascotán, Carcote, Ollagüe y Alconcha, las subcuencas de Pampa Puno y de San Pedro y la cuenca principal del río Loa desde su nacimiento hasta la población de Chiu Chiu. La mayor dificultad de esta campaña de muestreo fue la gran extensión de la superficie a recorrer, la altura geográfica en especial por las condiciones meteorológicas que eso implica, la accidentabilidad de la zona que hace inaccesible muchos lugares (por ejemplo vertientes en las partes altas de los volcanes o cursos superficiales dentro de profundas quebradas). Estos condicionantes hicieron que el muestreo del curso superficial del río Loa tuviera un tramo de alrededor de 40 km sin muestrear.

Nombre	X-UTM[1]	Y-UTM[1]	P.T.[2]	N.F.[3]	Química	^{18}O-^{2}H	^{13}C	Rept.[4]
1-LAP	564.870	7.620.337	X	X	X	X	X	
2-LAP	578.967	7.620.088	X	X	X	X	X	
3-LAP	578.704	7.611.416	X	X	X	X	X	
4-LAP	579.157	7.607.703	X	X		X	X	
5-LAP	579.109	7.606.479	X	X	X	X	X	
6-LAV	577.761	7.608.986	X		X	X	X	
7-LAV	577.602	7.610.205	X		X	X	X	
8-LAV	577.597	7.610.942	X		X	X	X	
9-LAV	578.605	7.611.488	X		X	X	X	
10-LAP	582.339	7.597.658	X	X	X	X	X	
11-LAP	583.460	7.599.843	X	X	X	X	X	
12-LAP	583.460	7.599.843	X	X	X			X
13-LAV	576.946	7.623.339	X		X	X	X	
14-LAV	562.511	7.623.849	X		X	X	X	
15-LAV	559.620	7.631.300	X		X	X	X	
16-LAV	559.714	7.633.103	X		X	X	X	
17-LAV	564.757	7.638.685	X		X	X	X	
18-LAV	568.678	7.640.504	X		X	X	X	
19-LAV	568.560	7.633.487	X		X	X	X	
20-LAV	567.864	7.656.257	X		X	X	X	
21-LAV	569.314	7.658.950	X		X	X	X	
22-LAV	565.111	7.664.867	X		X	X	X	
23-LAV	563.635	7.677.670	X		X	X	X	
24-LAV	563.676	7.677.701	X		X	X	X	
25-LAS	534.956	7.604.952	X		X	X	X	
26-LAS	534.993	7.603.320	X		X	X	X	
27-LAS	537.686	7.594.506	X		X	X	X	
29-LAV	540.216	7.589.336	X		X	X	X	
28-LAS	540.350	7.589.374	X		X	X	X	
30-LAS	540.228	7.569.804	X		X	X	X	
31-LAS	540.228	7.569.804	X		X	X	X	X
32-LAS	539.080	7.564.134	X		X	X	X	
33-LAS	538.199	7.537.590	X		X	X	X	
34-LAS	535.825	7.529.735	X		X	X	X	
35-LAV	557.051	7.674.973	X		X	X	X	
36-LAV	553.421	7.672.667	X		X	X	X	
37-LAV	535.301	7.658.655	X		X	X	X	
38-LAS	534.763	7.657.504	X		X	X	X	
39-LAV	535.318	7.656.542	X		X	X	X	
40-LAS	541.941	7.639.418	X		X	X	X	
41-LAV	530.770	7.666.787	X		X	X	X	
42-LAV	523.549	7.645.193	X		X	X	X	
43-LAV	527.671	7.619.038	X		X	X	X	
44-LAS	533.459	7.616.002	X		X	X	X	
45-LAS	534.157	7.613.776	X		X	X	X	
46-LAS	534.470	7.609.684	X		X	X	X	
47-LAS	540.147	7.574.494	X		X	X	X	
48-LAS	548.324	7.573.583	X		X	X	X	

Nombre	X-UTM[1]	Y-UTM[1]	P.T.[2]	N.F.[3]	Química	^{18}O-^{2}H	^{13}C	Rept.[4]
49-LAV	596.883	7.559.275	X		X	X	X	
50-LAV	597.062	7.559.679	X		X	X	X	
51-LAV	596.522	7.563.884	X		X	X	X	
52-LAV	596.654	7.564.410	X		X	X	X	
53-LAV	586.731	7.575.420	X		X	X	X	
54-LAV	586.036	7.575.267	X		X	X	X	
55-LAS	565.245	7.570.388	X		X	X	X	
56-LAV	572.045	7.609.958	X		X	X	X	
57-LAS	565.757	7.610.590	X		X	X	X	
58-LAV	597.062	7.559.679	X		X	X	X	X
59-LAV	527.671	7.619.038	X		X	X	X	X
60-LAV	553.421	7.672.667	X		X	X	X	X
61-LAS	543.892	7.640.407	X		X	X	X	
PT-1	559.081	7.634.830	X					
PT-2	572.451	7.636.196	X					
PT-3	578.881	7.606.562	X					
PT-4	537.723	7.594.345	X					
PT-6	540.147	7.574.494	X					
PT-7	534.580	7.655.830	X					
PT-8	535.311	7.653.428	X					
PPE-10	597.737	7.554.810		X				
PPE-5	599.470	7.552.954		X				
PPE-9	598.175	7.553.738		X				
L-02	540.159	7.666.551		X				

[1] Coordenadas UTM WGS 84

[2] Medición de parámetros de terreno

[3] Medición de nivel freático en pozos

[4] Muestras que son repeticiones para validación de análisis

Tabla 3-2. Resumen de muestras y mediciones tomadas de la campaña de terreno de octubre de 2013. Fuente: elaboración propia.

Se midió el nivel en 7 pozos del salar de Ascotán y 3 pozos en Pampa Peineta (cuenca río San Pedro) y un pozo en el nacimiento del río Loa.

3.3 CAMPAÑA DE TERRENO DICIEMBRE 2013

La segunda etapa del proyecto incluyó una segunda campaña de terreno realizada en diciembre de 2013 con el fin de contrastar los resultados obtenidos en la campaña de octubre de 2013. La segunda campaña tuvo como objetivo inicial tomar 60 muestras para su análisis hidroquímico, 60 muestras para el análisis isotópico de las moléculas de ^{18}O y ^{2}H, el aforo de 10 secciones de ríos y la medición de 30 niveles freáticos de agua en pozos (**Tabla 3-3**).

Actividad	Previsto	Descripción	Datos obtenidos
Muestreo Hidroquímico	60 muestras	muestras de 500 ml natural	pH, CE, Alc., HCO_3, Cl, SO_4, CO_2
		muestras de 500 ml filtrada (45 µm) y acidificada HNO_3	As, B, Ca, Mg, K, SiO_2, Na, Sr, Al
Muestreo Isotópico ^{18}O-^{2}H	60 muestras	muestras de 40 ml (vidrio) naturales	$\delta^{18}O$(‰), $\delta^{2}H$(‰)
Aforos	10 muestras	Mediciones con molinete en cauces superficiales	Caudal (l/s)
Medición Niveles Freáticos	30 mediciones	mediciones con pozómetro en pozos	cota NF (msnm)

Tabla 3-3. Especificaciones iniciales de la campaña de terreno de diciembre de 2013. Fuente: elaboración propia.

Esta segunda campaña de terreno tuvo una duración de 12 días con inicio el día 9 de diciembre y final el 20 de diciembre del 2013. El primer día de campaña fue dedicado al transporte de los técnicos de terreno y material a Calama. El segundo día de terreno, 10 de diciembre, se comenzó la campaña de muestreo por el sector noroeste del río Loa desde su nacimiento hasta la represa de Lequena. En uno de los puntos se realizó un aforo en el cauce del río Loa. En el tercer día de terreno, 11 de diciembre, el recorrido fue en el sector del río Loa desde la represa de Lequena hasta Chiu Chiu donde, además de la toma de muestras, se realizó un aforo en el río Loa después de la represa de Lequena. La jornada del día 12 de diciembre estuvo focalizada en el muestreó de vertientes y pozos en el salar de Ascotán. El quinto día, 13 de diciembre, se muestreó la zona de cabecera del río Loa donde además se realizaron 4 aforos. Al siguiente día, 14 de diciembre, la zona de muestreo fue en la cuenca del río San Pedro a su paso por Estación San Pedro y en el borde este del salar de Carcote. Además, en este mismo día se viajó a Calama para hacer un cambio de profesional del equipo

técnico. El 15 de diciembre se muestreó el sector de quebrada Sapunta, vega Chela, el oeste del salar de Carcote y la quebrada del Inca en la periferia del salar de Ollagüe. En este recorrido, además del muestreo de aguas, se efectuaron 2 aforos en el río Loa, uno antes y otro después de la confluencia con quebrada Sapunta. El día 16 se muestreó la vertiente ubicada en quebrada Kosca al norte de la zona de estudio, se completó el muestreo en el salar de Ascotán y se finalizó el día en el embalse de Conchi. A lo largo del siguiente día, 17 de diciembre, se realizó el muestreo en la cuenca de San Pedro y en el río Loa en el vado de Taira. El día 18 se dedicó a medir los parámetros de terreno en el río Loa antes y después de quebrada Taira además de 3 aforos en el cauce del río Loa, uno en la confluencia con quebrada Seca, otro después de quebrada Taira y finalmente otro justo antes de la confluencia con el río Salado. El último día de muestreo, día 19 de diciembre, se tomó una muestra en las aguas termales de Baños Taira y los parámetros de terreno en el cauce del río Loa antes y después de esta vertiente. Además, este día también se realizó un aforo en el río Loa a aproximadamente 4,5 km aguas arriba de Baños Taira. El último día de terreno se destinó al envío de las muestras de hidroquímica al laboratorio y a la desmovilización del equipo técnico. Las muestras de isótopos fueron enviadas el 31 de diciembre por estar el laboratorio en periodo vacacional y hasta ese día las botellas correspondientes fueron almacenadas refrigeradas. En la **Figura 3-3** se presenta el mapa del área de estudio con la ruta diaria realizada durante la campaña de terreno de diciembre de 2013.

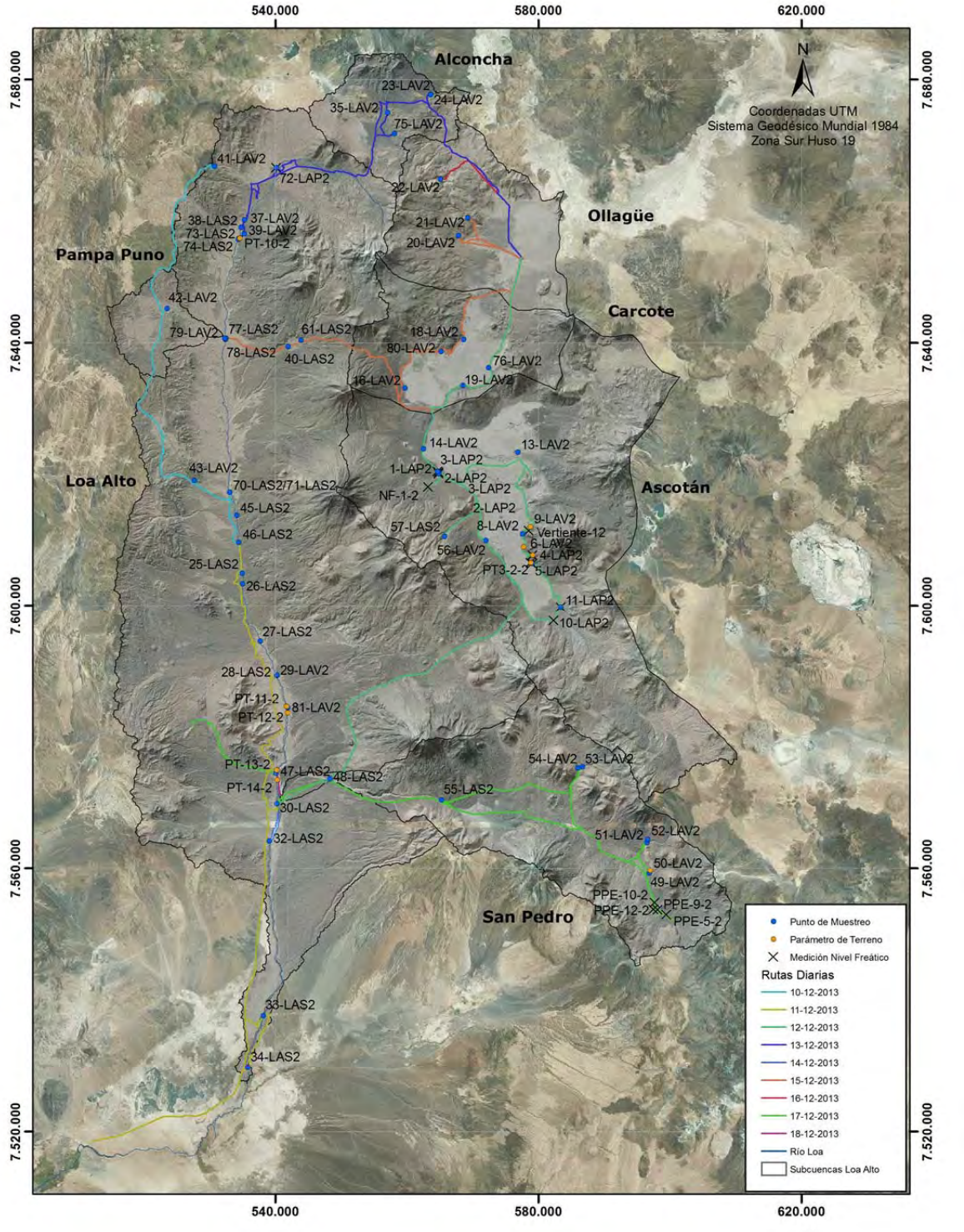


Figura 3-3. Puntos de muestreo y rutas diarias realizadas durante la campaña de terreno de diciembre de 2013. Fuente: elaboración propia.

En la **Tabla 3-4** se presentan los puntos donde se midieron parámetros de terreno, se tomó muestra de agua y/o se realizó registro de nivel freático

En la campaña de diciembre de 2013 se tomaron 48 muestras en las mismas vertientes, cursos superficiales y pozos que en la primera campaña de terreno. Sin embargo, 12 muestras adicionales fueron tomadas en puntos nuevos con el fin de obtener un mayor detalle hidroquímico de algunos sectores específicos del área de estudio.

Nombre	X-UTM[1]	Y-UTM[1]	P.T.[2]	N.F.[3]	Química	^{18}O-^{2}H	Rept.[4]
1-LAP2	564.863	7.620.336	X	X	X	X	
2-LAP2	564.864	7.620.087	X	X	X	X	
3-LAP2	564.702	7.620.415	X	X	X	X	
4-LAP2	579.157	7.607.703	X	X			
5-LAP2	579.109	7.606.473	X	X	X	X	
6-LAV2	577.762	7.608.982	X				
8-LAV2	577.597	7.610.939	X		X	X	
9-LAV2	578.626	7.611.505	X				
10-LAP2	582.339	7.597.658		X			
11-LAP2	583.460	7.599.843	X	X	X	X	
13-LAV2	576.941	7.623.341	X		X	X	
14-LAV2	562.511	7.623.845	X		X	X	
16-LAV2	559.713	7.633.107			X	X	
18-LAV2	568.680	7.640.500	X		X	X	
19-LAV2	568.561	7.633.487			X	X	
20-LAV2	567.866	7.656.259	X		X	X	
21-LAV2	569.309	7.658.945	X		X	X	
22-LAV2	565.109	7.664.868	X		X	X	
23-LAV2	563.634	7.677.665	X		X	X	
24-LAV2	563.677	7.677.693	X		X	X	
25-LAS2	534.955	7.604.950	X		X	X	
26-LAS2	534.992	7.603.322	X		X	X	
27-LAS2	537.691	7.594.509	X		X	X	
28-LAS2	540.206	7.589.331	X		X	X	
29-LAV2	540.298	7.589.372	X		X	X	X
30-LAS2	540.230	7.569.803	X		X	X	
32-LAS2	539.081	7.564.127	X		X	X	
33-LAS2	538.157	7.537.596	X		X	X	
34-LAS2	535.819	7.529.734	X		X	X	
35-LAV2	557.079	7.674.931	X		X	X	X
37-LAV2	535.302	7.658.651	X		X	X	
38-LAS2	534.762	7.657.512	X		X	X	
39-LAV2	535.317	7.656.539	X		X	X	
40-LAS2	541.956	7.639.402	X		X	X	
41-LAV2	530.772	7.666.787	X		X	X	
42-LAV2	523.552	7.645.192	X		X	X	
43-LAV2	527.668	7.619.037	X		X	X	
45-LAS2	534.147	7.613.783	X		X	X	
46-LAS2	534.471	7.609.683	X		X	X	
47-LAS2	540.130	7.574.478	X		X	X	

Nombre	X-UTM[1]	Y-UTM[1]	P.T.[2]	N.F.[3]	Química	^{18}O-^{2}H	Rept.[4]
48-LAS2	548.328	7.573.575	X		X	X	
49-LAV2	596.883	7.559.269	X		X	X	
50-LAV2	597.063	7.559.681	X				
51-LAV2	596.522	7.563.885	X		X	X	
52-LAV2	596.648	7.564.433	X		X	X	
53-LAV2	586.732	7.575.420	X		X	X	
54-LAV2	586.035	7.575.265	X		X	X	
55-LAS2	565.254	7.570.375	X		X	X	
56-LAV2	572.048	7.609.958	X		X	X	
57-LAS2	565.761	7.610.587	X		X	X	
61-LAS2	543.875	7.640.402	X		X	X	
70-LAS2[5]	533.095	7.617.271	X		X	X	X
72-LAP2[5]	540.158	7.666.551	X	X	X	X	
73-LAS2[5]	534.441	7.655.782	X		X	X	
74-LAS2[5]	534.358	7.655.681	X		X	X	
75-LAV2[5]	558.139	7.671.784	X		X	X	
76-LAV2[5]	572.451	7.636.194			X	X	
77-LAS2[5]	532.466	7.640.649	X		X	X	
78-LAS2[5]	532.408	7.640.507	X		X	X	
79-LAV2[5]	532.309	7.640.660	X		X	X	
80-LAV2[5]	565.211	7.638.644			X	X	
81-LAV2[5]	541.889	7.584.408	X		X	X	
V-12	578.574	7.611.424		X			
NF-1-2	563.263	7.618.073		X			
PT-10-2	534.599	7.655.826	X				
PT3-2-2	578.887	7.606.565	X	X			
PPE-5-2	599.472	7.552.955		X			
PPE-9-2	598.174	7.553.738		X			
PPE-12-2	597.544	7.553.773		X			
PPE-10-2	597.738	7.554.809		X			
PT-11-2	541.740	7.584.620	X				
PT-12-2	541.880	7.583.603	X				
PT-13-2	540.227	7.574.906	X				
PT-14-2	540.270	7.573.446	X				

[1] Coordenadas UTM WGS 84

[2] Medición de parámetros de terreno

[3] Medición de nivel freático en pozos

[4] Muestras que son repeticiones para validación de análisis

[5] Muestras incorporadas en el análisis químico e isotópico en la segunda campaña de terreno

Tabla 3-4. Resumen de muestras y mediciones tomadas de la campaña de terreno de diciembre de 2013. Fuente: elaboración propia.

En relación con los aforos, el objetivo inicial de la segunda campaña de terreno contemplaba la medición de 10 secciones a lo largo del río Loa. Finalmente, se llevaron a cabo 11 mediciones en el río Loa, desde su nacimiento hasta antes de la confluencia con el río Salado y 1 medición adicional en un afluente del río Loa situado en la zona de cabecera del río Loa en la cara oeste del volcán Miño. (**Figura 3-4**).

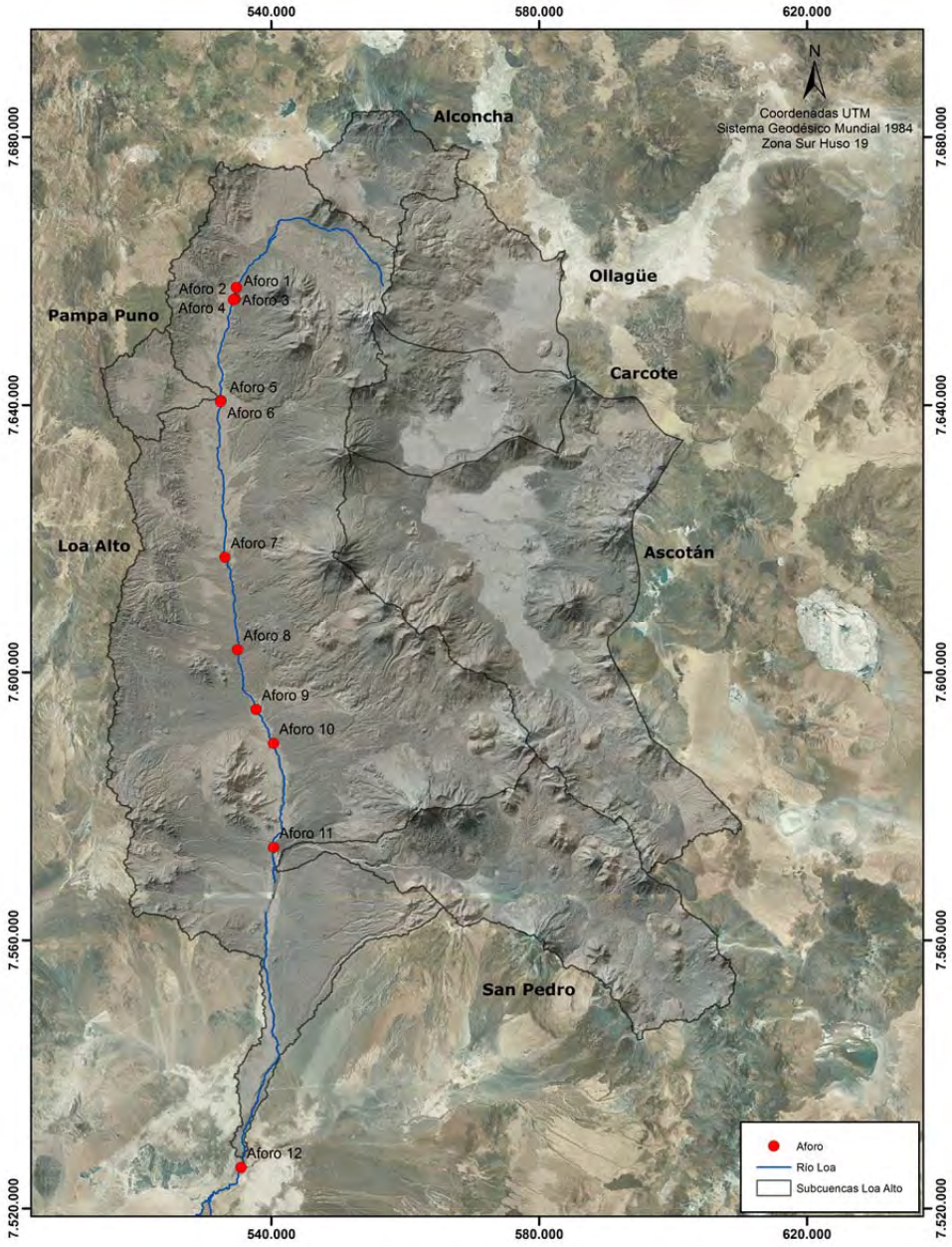


Figura 3-4. Mapa de ubicación de los puntos de aforo realizados en la campaña de terreno de diciembre de 2013. Fuente: elaboración propia.

Las características de cada uno de los aforos se muestran en la **Tabla 3-5**. Los aforos 1 y 2 son aforos aproximados con divisiones del ancho del cauce superiores al 10% o 20% del ancho total según el protocolo previo determinado. Estos aforos se calcularon de forma aproximada por estar ubicados en tramos de río con presencia de dos o más cauces secundarios. De este modo, los valores de caudal de estos aforos representan un porcentaje del caudal total.

Nombre	X-UTM[1]	Y-UTM[1]	Muestra	Ancho (cm)	Divisiones	Caudal (l/s)
Aforo 1	534.762	7.657.512	38-LAS	40	4	4,3
Aforo 2	534.599	7.655.826	PT-10	90	3	210,6
Aforo 3	534.441	7.655.782	73-LAS	55	5	17,6
Aforo 4	534.358	7.655.681	74-LAS	110	5	292,9
Aforo 5	532.466	7.640.649	77-LAS	200	10	386,8
Aforo 6	532.408	7.640.507	78-LAS	200	10	380,6
Aforo 7	533.095	7.617.271	70-LAS	250	10	545,2
Aforo 8	534.992	7.603.322	26-LAS	72	5	20,6
Aforo 9	537.720	7.594.427	27-LAS	500	10	129,5
Aforo 10	540.311	7.589.356	29-LAS	275	10	334,4
Aforo 11	540.312	7.573.829	PT-12	150	10	134,1
Aforo 12	535.476	7.526.071	-	540	10	528,7

[1] Coordenadas UTM WGS 84

Tabla 3-5. Características de los aforos de la campaña de diciembre de 2013. Fuente: elaboración propia.

4 CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA

4.1 GEOMORFOLOGÍA

En este capítulo se describe la geomorfología de la región para explicar el contexto geológico, y a continuación la historia y unidades geológicas que afloran en la zona de estudio, así como las estructuras que les afectan. Debido a la extensión regional del área de estudio, la caracterización geológica se presenta en función de las unidades geomorfológicas definidas en la zona. En este sentido, se desarrolla una descripción por secciones según:

- Sierra del Medio;
- Depresión del río Loa;
- Cordillera de los Andes.

La elaboración de la caracterización geológica de la región se ha realizado en base a seis informes:

- RAMÍREZ, Carlos .F. y HUETE, Carlos. Hoja Ollagüe, Región de Antofagasta. Serie Carta Geológica de Chile escala 1:250.000. Instituto de Investigaciones Geológicas (IIG). Santiago, 1981. 47 p.;
- CICA INGENIEROS CONSULTORES. Estudios Ambientales por extracción de aguas subterráneas en la cuenca del salar de Ascotán. Corporación Nacional del Cobre-División Chuquicamata, Santiago, 1998. 400 p.;
- TOMLINSON, Andrew J.; BLANCO P, Nicolás; MAKSAEV J., Víctor; DILLES, John H.; GRUNDER, Anita L.; LADINO U., Marco. Geología de la precordillera Andina de Quebrada Blanca-Chuquicamata, Regiones I y II (20º30'-22º30'S). Servicio Nacional de Geología y Minería. Santiago, 2001. 455 p.;
- IGSA CONSULTORES. Evaluación de Impacto Ambiental Proyecto Extracción Minera en Salar de Carcote. Sociedad Química y Minera de Chile (SQM). Santiago. 311 p.;
- DICTUC. Hidrogeología de la II región y asesoría para la revisión de informes de estudios de evaluación de recursos hídricos. Dirección General de Aguas (DGA), Santiago, 2005. 309 p.;
- SGA LIMITADA. Declaración de Impacto Ambiental Proyecto Estudio hidrogeológicos salar de Alconcha. Anexo Nº3, Estudio de Línea Base. Cía Minera Quebrada Blanca. Santiago, 2007. 112 p.

La cuenca del Loa Alto engloba principalmente tres unidades geomorfológicas con una orientación aproximadamente norte-sur. Estas unidades corresponden desde poniente a oriente con la Sierra del Medio; la depresión donde nace el río Loa; y la Cordillera de los Andes, constituida por una cadena oriental de volcanes, las depresiones de los salares y la cadena occidental de volcanes. Matraz ha definido estas tres unidades geomorfológicas a escala local, **Figura 4-1**, en función de la topografía y características geológicas del sector.

La caracterización geológica se compone de la definición de las unidades geológicas y de las estructuras que controlan la disposición de cada unidad. En la **Figura 4-2** se presenta el mapa geológico de la región, y en la **Figura 4-3** se muestran 3 cortes transversales, de dirección este-oeste. La composición mineralógica de cada unidad geológica condiciona la composición química del agua subterránea que circula por esta unidad, por lo tanto el conocimiento de sus características es sustantivo para la comprensión de la evolución del agua superficial y subterránea.

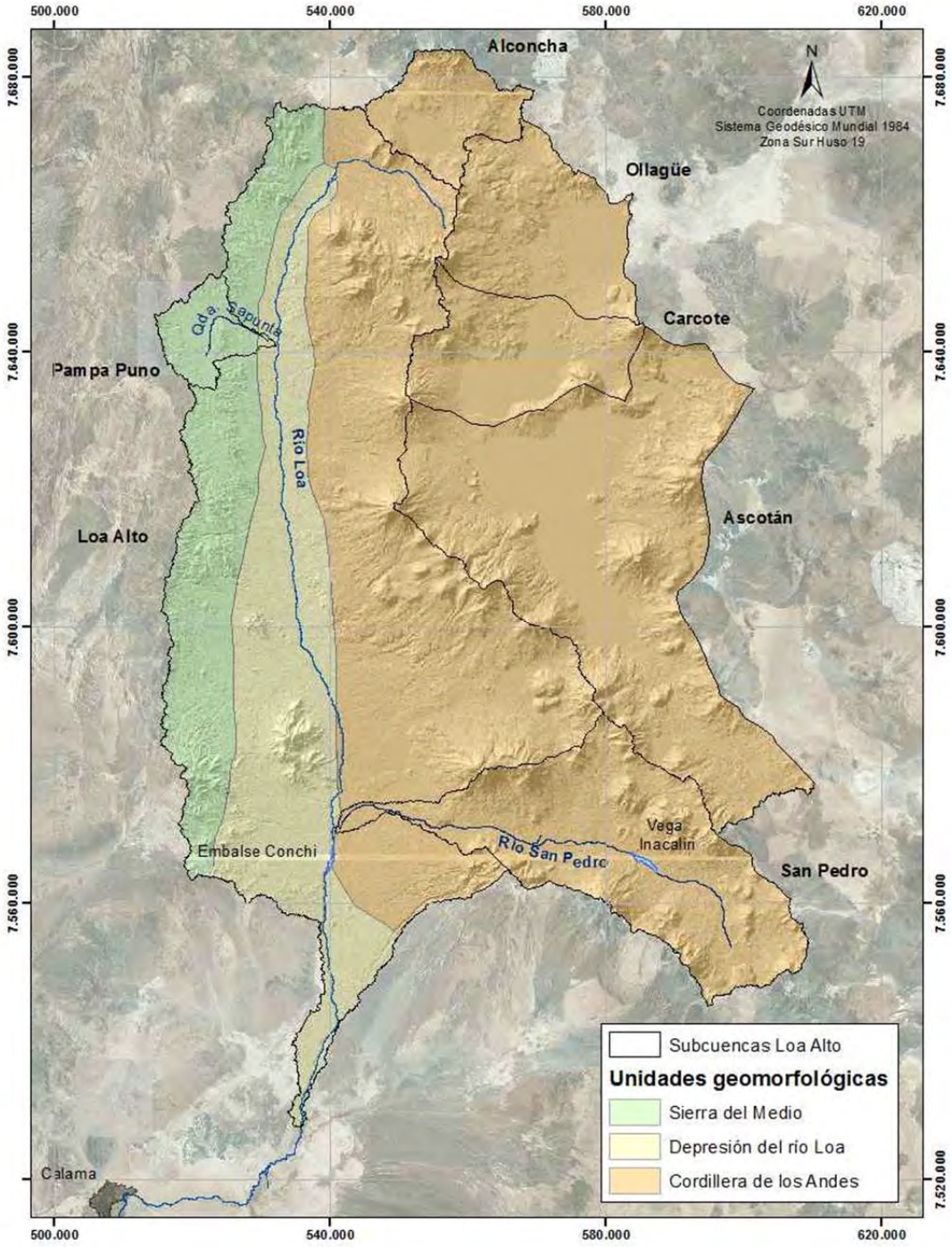


Figura 4-1. Mapa geomorfológico de la zona de estudio. Fuente: elaboración propia.

.

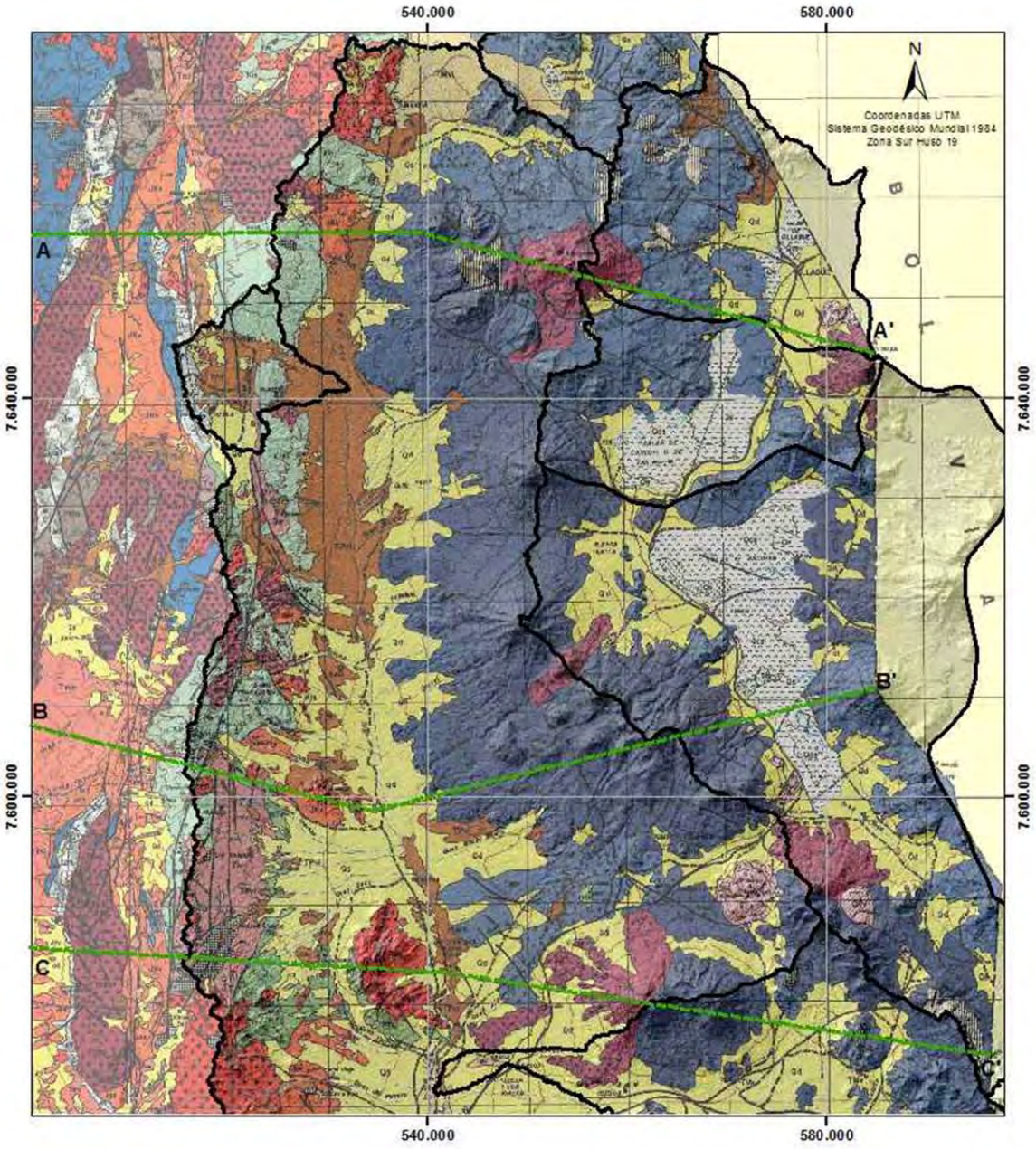


Figura 4-2. Mapa geológico del Loa Alto. Fuente: Ramírez y Huete, 1981.

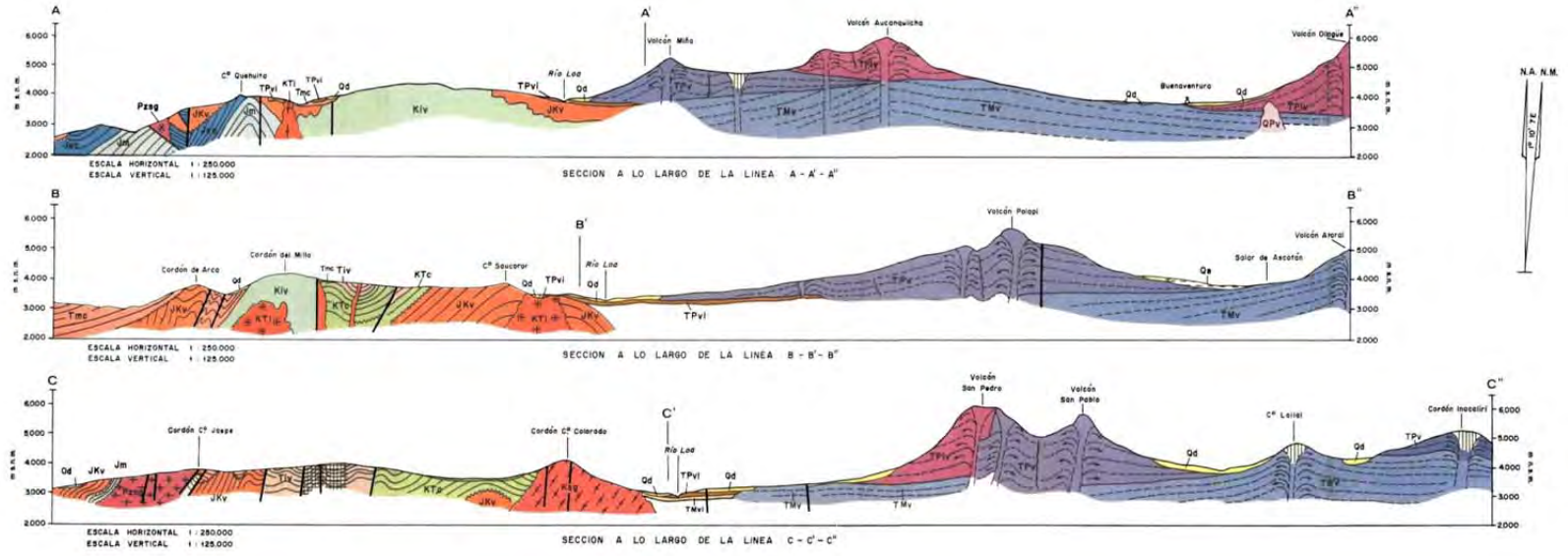


Figura 4-3. Perfiles geológicos de la zona de estudio, se indica su ubicación en el mapa geológico de la figura 4-2. Fuente: Ramírez y Huete, 1981.

4.2 SIERRA DEL MEDIO

En la Sierra del Medio destacan alturas superiores a los 4.000 msnm tales como el cerro Pajonal (4.542 msnm), cordón del Millo (alturas mayores a 4.000 msnm), cerro Yocas (4.537 msnm) y el cerro Yabricoyita (4.896 msnm) (**Figura 4-4**). Las zonas medias a bajas, comprendidas entre 2.000-3.000 msnm, sufren escasas precipitaciones estivales y de origen ciclónico, sin embargo a partir de los 3.000 msnm las precipitaciones aumentan y son principalmente estivales. La Sierra del Medio constituye una divisoria de aguas, al oriente las aguas drenan al río Loa y al occidente se dirigen a la Pampa del Tamarugal.

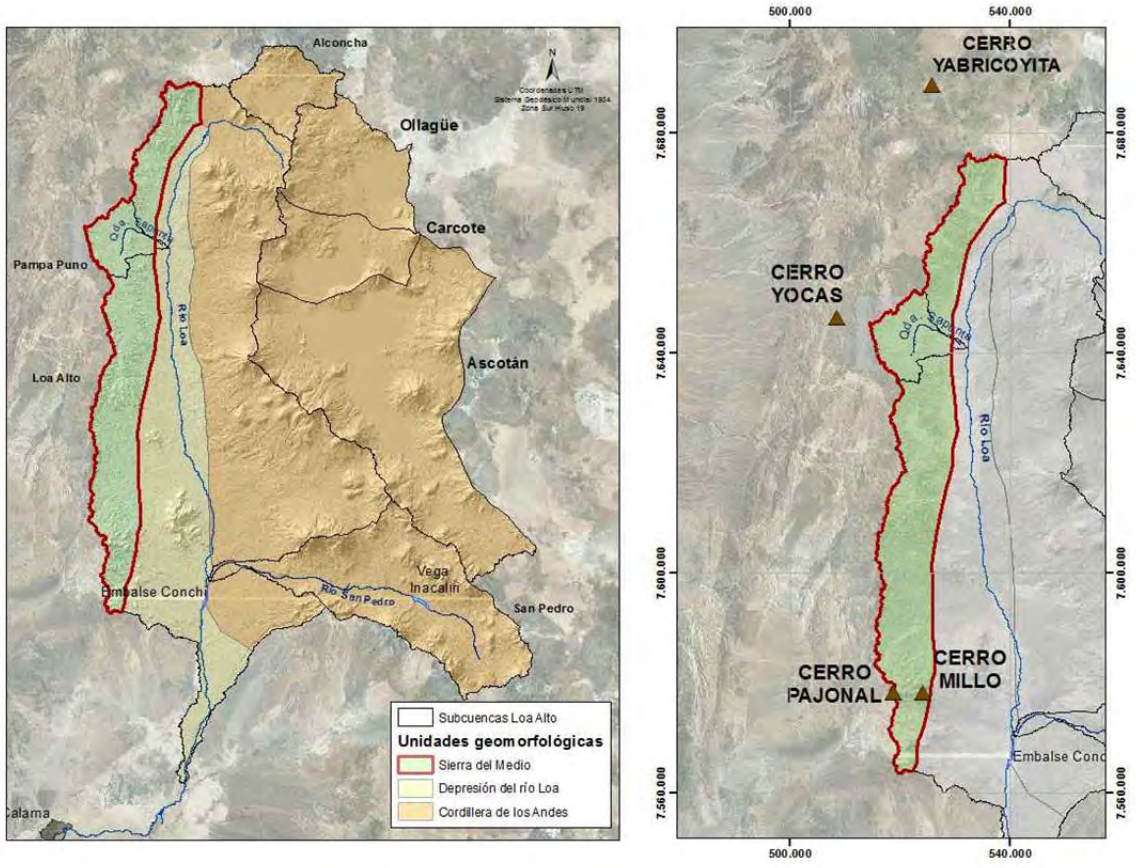


Figura 4-4. Mapa de ubicación de la Sierra del Medio. Fuente: elaboración propia.

Geológicamente destaca el sistema de fallas cuya orientación varía entre NNW-NE y controla la disposición de las unidades geológicas. En la Sierra del Medio afloran rocas que cronológicamente engloba desde el Paleozoico Superior hasta el Cuaternario. Los cortes geológicos que se observan en la **Figura 4-3**, ubicados en el mapa geológico de

la **Figura 4-2**, muestra la complejidad estructural que posee la zona de estudio, especialmente las familias de fallas de la Sierra de Medio.

Los granitoides afectados por estos sistemas de fallas poseen una alteración hidrotermal de tipo propilitización, argilización y silicificación, y en menor proporción cuarzo-sericítica, potásica y turmalina, cuya mineralización metálica corresponde a pirita, hematita, calcopirita, calcosina y, con un moderado a débil desarrollo de óxidos de cobre y limonitas.

Según RAMÍREZ Y HUETE (Ramírez y Huete, 1981), el basamento metamórfico paleozoico **(Pzim)** de la Sierra del Medio está constituido por esquistos micáceos, gneises, filitas y cuarcitas. Se caracteriza por presentar una fase de metamorfismo regional dinamotermal que provocó el metamorfismo de las secuencias clástico-volcánicas; por una intrusión de un granito de biotita **(Pzig)** que originó las migmatitas en el límite entre el Ordovícico y Silúrico; y por la una intrusión de granitoides **(Pzsg)** en el Carbonífero Superior y Pérmico Inferior, constituidos por granodiorita, granito y diorita. En la **Figura 4-5** se muestra la disposición y las discordancias existentes desde el Paleozoico hasta el Mioceno en el área de estudio de un modo esquemático.

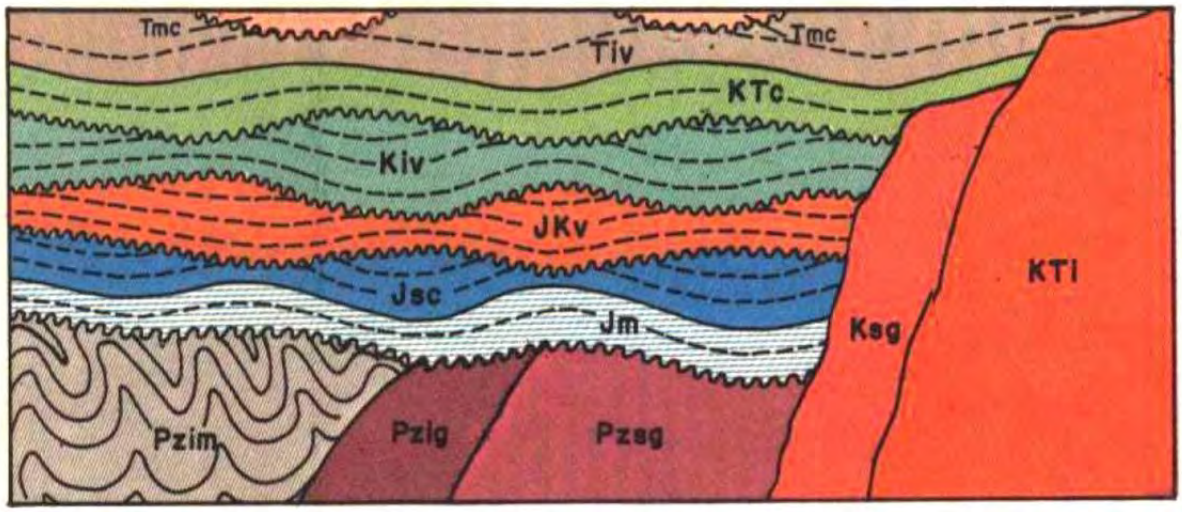


Figura 4-5. Esquema de la disposición y relación de las unidades geológicas desde el Paleozoico hasta el Mioceno. Fuente: Ramírez y Huete, 1981.

Durante el Lías Medio (Sinemuriano o Pliensbachiano) habría una transgresión sobre las rocas paleozoicas que originó una unidad sedimentaria marina del Jurásico **(Jm)** formada por conglomerados, areniscas calcáreas, lutitas y calizas. Sin embargo, en el

Oxfordiano una regresión del nivel del mar semicerró las cuencas, depositándose las capas de yeso.

A continuación, en el Jurásico Superior (Kimmeridgiano) se depositaría una secuencia sedimentaria, clástica, de carácter aluvial y continental, **(Jsc)**, formada por areniscas, lutitas y conglomerados de color rojizo. La imbricación de los clastos en las capas de los conglomerados y la estratigrafía cruzada en las areniscas muestran un transporte de oeste a este.

Posteriormente, una fase tectónica compresiva pliega suavemente las rocas sedimentarias continentales del Jurásico Superior y luego una etapa de erosión dio lugar a la discordancia que separa estas rocas de la unidad volcánica y sedimentario-volcánica del Jurásico Superior-Cretácico Inferior **(JKv)**. Esta última unidad está constituida por andesitas, andesitas brechosas, tobas dacíticas, brechas tobáceas, conglomerados y areniscas.

En el Mesozoico hubo dos eventos intrusivos, que dieron lugar a un plutón en el Cretácico Inferior **(Kig)** y a otros cuerpos en el Cretácico Superior **(Ksg)** constituidos por granodiorita, granito, pórfido cuarzo-diorítico y anortosita.

Cabe destacar que en función de la unidad intrusiva por la que se produzca la interacción agua-roca y el tiempo de residencia del agua, el agua subterránea se enriquece en unos elementos químicos o en otros. Entre las unidades intrusivas existentes, es decir granito, granodiorita y tonalita va aumentando progresivamente el contenido de plagioclasa y disminuyendo la presencia de feldespato alcalino. Por lo tanto, al ser la plagioclasa un mineral más soluble que el feldespato potásico, el agua que ha interaccionado con la tonalita presentará mayor concentración de sodio y/o calcio, y menor concentración de cationes de potasio que el granito.

Durante el Cretácico Inferior se produce una actividad subvolcánica que origina una unidad, **(Kiv),** formada por lavas e ignimbritas, cuya composición pasa gradualmente de riolitas y dacitas a pórfidos intrusivos riolíticos.

En la parte suroriental de Sierra del Medio aflora una secuencia de areniscas rojas, con intercalaciones de conglomerados del mismo color y brechas en la base que componen las rocas sedimentarias continentales del Cretácico Superior-Paleoceno **(Ktc).** En TOMLINSON (Tomlinson, 2001) se presenta la **Figura 2-4** que muestra la columna estratigráfica de la Formación Tolar y la interpretación de las facies de cada miembro que constituyen esta formación.

En el Eoceno, un ciclo volcánico origina las rocas volcánicas y volcanoclásticas **(Tiv)**, constituidas por andesitas porfíricas y afaníticas, y en menor proporción por lavas andesíticas brechosas y aglomerados. Inicialmente eran volcanes aislados, con cuencas cerradas entre ellos, y luego se fueron depositando coladas de lavas. Después, se produjo una intrusión de stocks de granodiorita y granito **(KTi)**, y finalmente una fase tectónica compresiva afecta a toda la unidad.

Después habría una etapa compresiva y sucesivamente otra etapa erosiva que dio como resultado la discordancia entre las rocas volcánicas del Eoceno y las rocas sedimentarias del Oligoceno-Mioceno Medio. Las rocas sedimentarias del Oligoceno-Mioceno **(Tmc)** están formadas por conglomerados gruesos, brechas, areniscas y limolitas mal consolidadas que indican sedimentación de tipo aluvial, y yeso, que muestra la existencia de cuencas cerradas. En el Oligoceno Inferior la intrusión de granitoides origina procesos hidrotermales acompañados de mineralización cuprífera y polimetálica. Se muestra la columna estratigráfica y litología detallada de esta unidad en la **Figura 4-6**, cuya simbología indica: 1, paleocorrientes; 2, engrane lateral de facies; 3, megaestratificación cruzada; 4, grietas de resecamiento; 5, trazas de anélidos; 6, lutitas; 7, yeso; 8, conglomerados; 9, areniscas; 10, brecha volcánica; 11, brecha sedimentaria; 12, toba ignimbrítica; 13, datación radiométrica; y 14, estratificación en artezas, y presenta la descripción litológica y el ambiente correspondiente de cada miembro. En el informe RAMÍREZ Y HUETE (Ramírez y Huete, 1981), se menciona que MAKSAEV (Maksaev, 1978) denomina esta unidad como Formación Sichal mientras que VERGARA (Vergara, 1978) la menciona como Formación Papajoy.

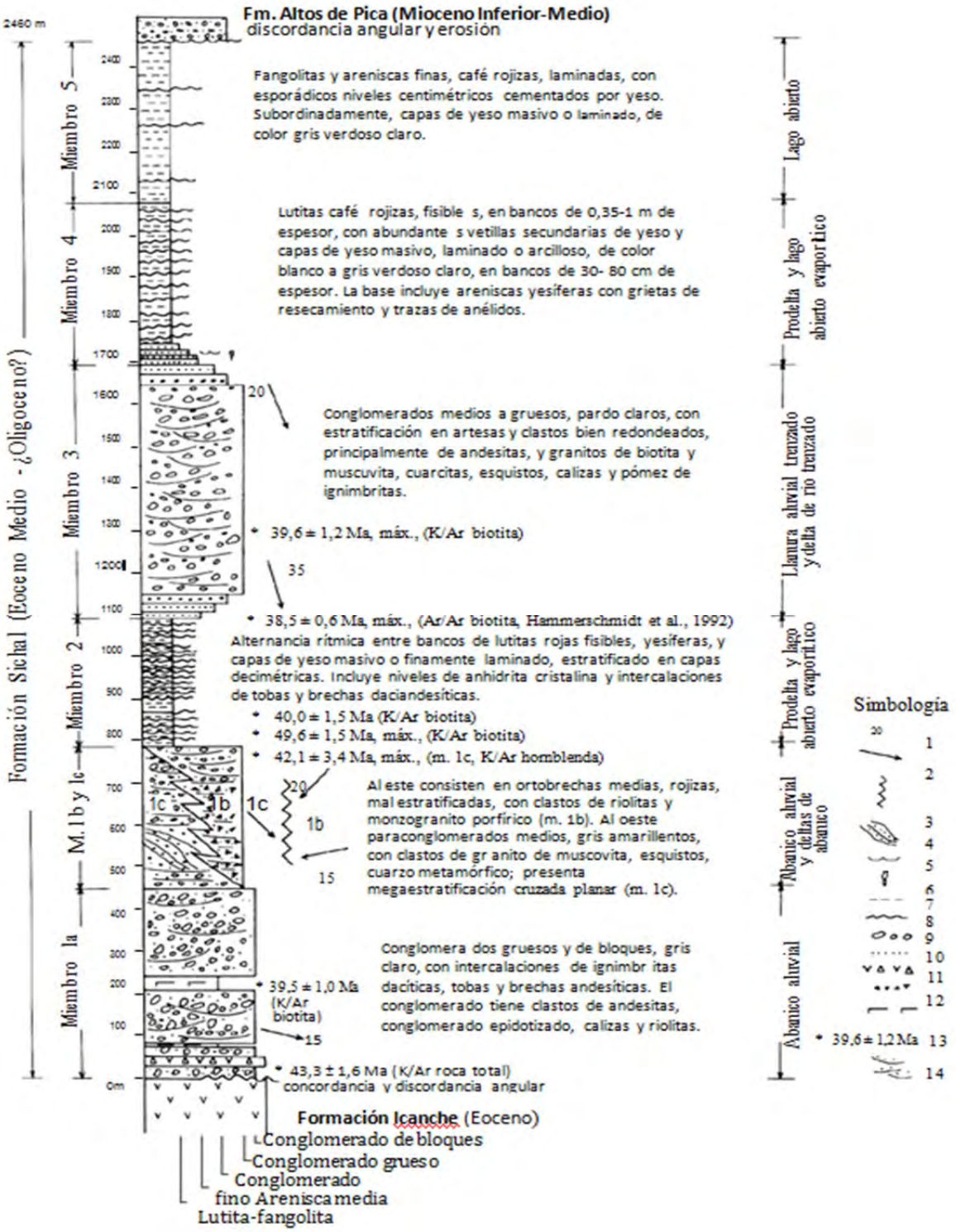


Figura 4-6. Columna estratigráfica Formación Sinchal. Fuente: Tomlinson *et al.*, 2001.

4.3 DEPRESIÓN DEL RÍO LOA

La Depresión del río Loa se caracteriza por el gran cañón que se ha originado gracias a la erosión del propio río. Las precipitaciones son escasas sobre todo en la zona situada al sur de la confluencia del río Loa con el río San Pedro; en cambio el nacimiento del río Loa está influenciado por las precipitaciones estivales, ya que la cota de este sector varía entre los 4.000 msnm a los 3.000 msnm. Esta depresión separa la Sierra del Medio de la Cordillera de los Andes (**Figura 4-7**).

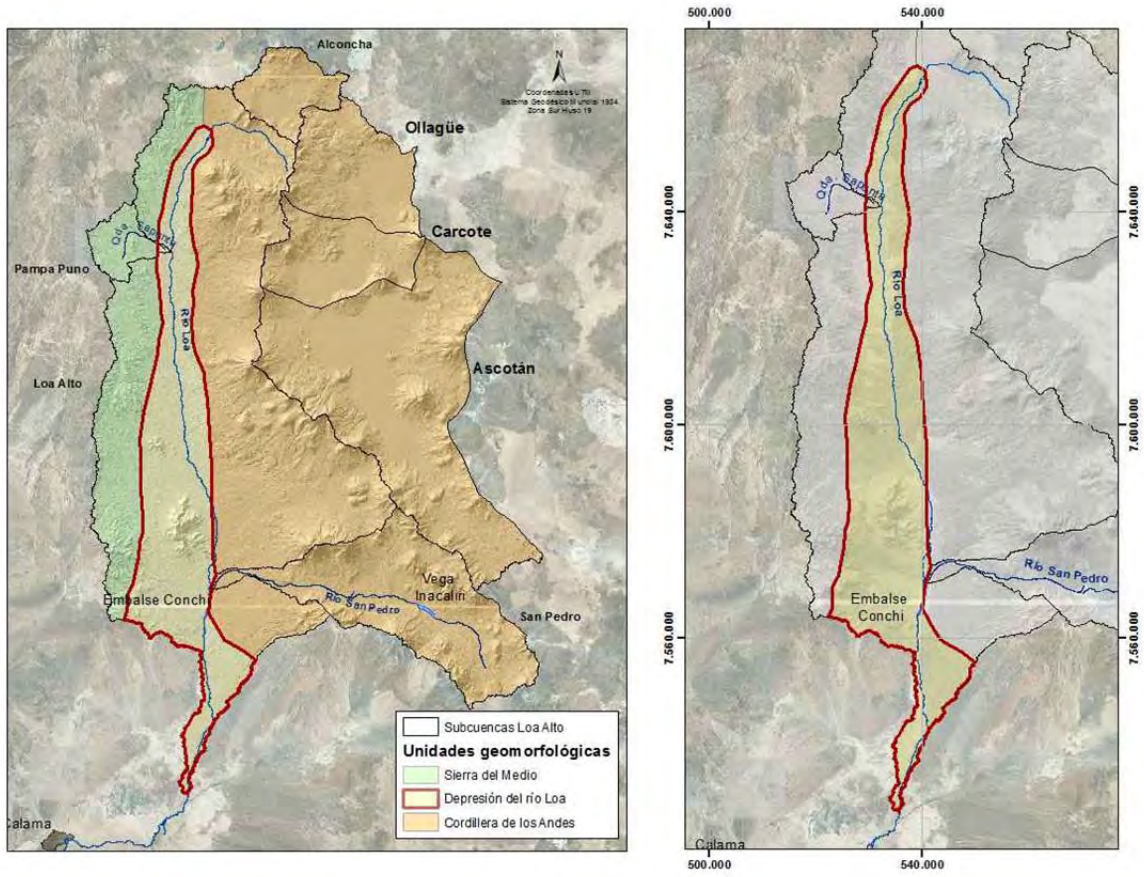


Figura 4-7. Mapa de ubicación de la Depresión del río Loa. Fuente: elaboración propia.

En este sector afloran en el extremo norte las ignimbritas riolíticas y dacíticas **(TMvi),** correspondiente a una toba con fenocristales de plagioclasa, biotita, cuarzo y piroxeno, de colores rosados a blanco-gris con un *soleamiento* (Arcadis, 2011) de moderado a alto porosidad variable, con tendencia a disminuir hacia la parte inferior. Esta unidad se caracteriza por presentar fracturación horizontal, resultado de la compactación al depositarse (Arcadis, 2011).

Las ignimbritas del Mioceno Superior están cubiertas por ignimbritas riolíticas dacíticas pliocénicas **(TPvi).** Esta unidad posee bajo grado de *soleamiento* (Arcadis, 2011), con una baja proporción de fenocristales de plagioclasa y biotita. En el sector oriental de la zona de estudio se interdigitan con los estratovolcanes, mientras que en Sierra del Medio cubren las todas las unidades anteriores, originando una discordancia angular y de erosión. Según ARCADIS (Arcadis, 2011) esta unidad posee 4-5 fracturas por cada 10 m^2, en general subverticales, frecuentemente con relleno de sílice y sin desplazamiento. Este tipo de fracturación sería causado por la contracción térmica del depósito por enfriamiento, durante o después de su deposición.

En la **Figura 4-8** se muestra la distribución de las afloramientos de la ignimbrita miocénica que corresponde a la Ignimbrita Ujina y la pliocénica se nombra como Ignimbrita Carcote.

En el sector de confluencia del río San Pedro y el río Loa estos flujos de ignimbritas se engranan con las rocas sedimentarias del Terciario Superior **(Tsc)**, compuestas por limos, chert y areniscas calcáreas que definen la “Caliza de El Loa” o Formación El Loa. En el estudio de MAY (May, G. et al, 2005) se eleva la Formación Loa a la categoría de grupo y le adjudica unas edades comprendidas entre el Mioceno Inferior y el Plioceno Superior. De este modo, al Grupo Loa se le atribuyen cuatro nuevas formaciones denominadas Formación Jalquinche, Opache, Lasana y Chiquinaputo. La interacción agua-roca, en esta unidad origina un enriquecimiento del agua que circula en el ión calcio.

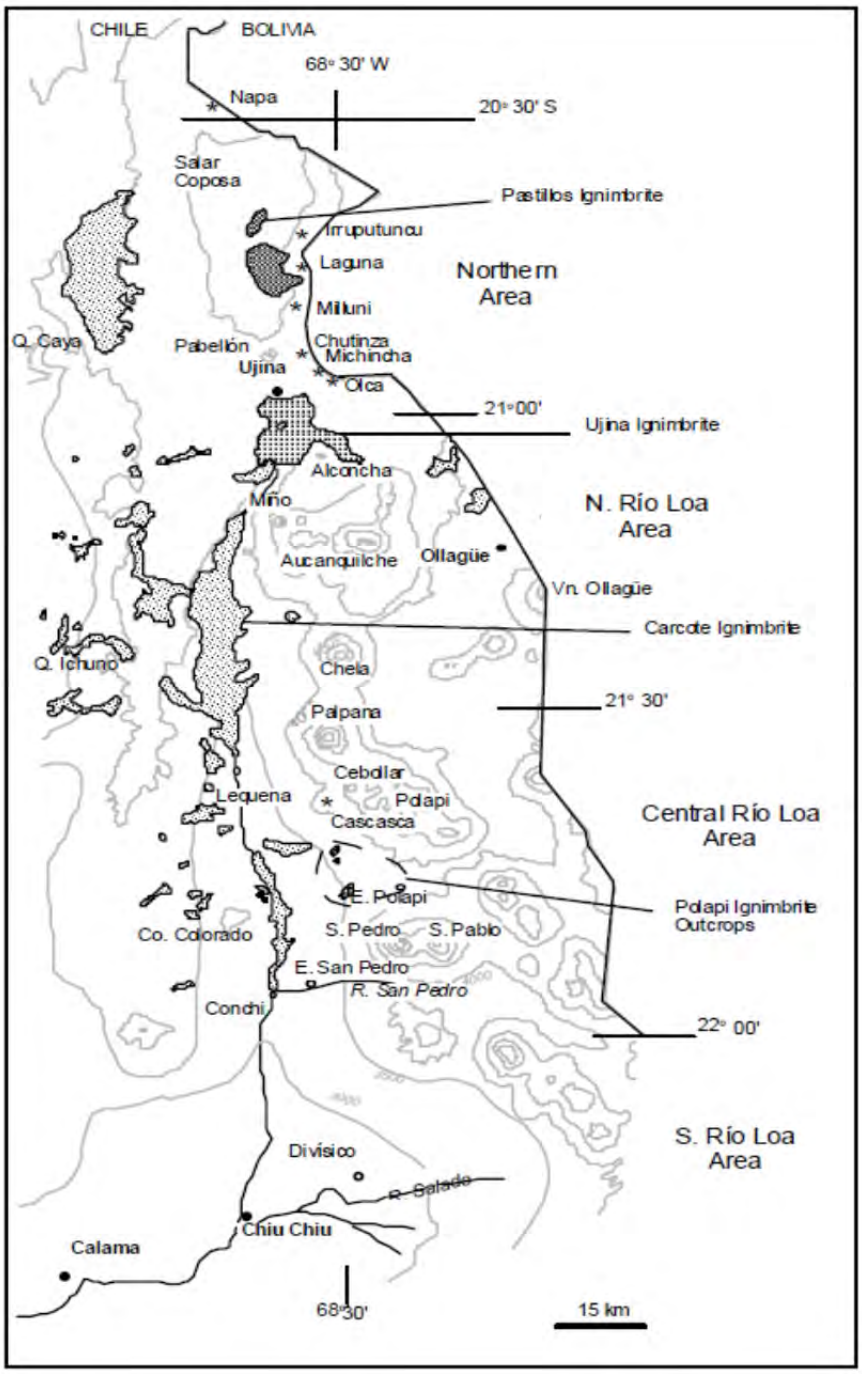


Figura 4-8. Mapa con la distribución de la unidad de ignimbrita riolítica dacítica miocénica (Ignimbrita Ujina) y la ignimbrita pliocénica (Ignimbrita Carcote). Fuente: Tomlinson *et al.*, 2001.

4.4 CORDILLERA DE LOS ANDES

En el límite fronterizo con Bolivia se localiza la cordillera de los Andes constituida por una cadena de volcanes de dirección NNW-SSE, entre los que destacan los volcanes Ollagüe (5.863 msnm) y Ascotán (5.478 msnm). La cordillera de los Andes también incluye las depresiones de las subcuencas del salar de Alconcha, Ollagüe, Carcote y Ascotán, cuya cota media es de 3.700 msnm, y el borde occidente de los salares, que se corresponde con una cadena de volcanes de orientación norte-sur que constituye la divisoria de aguas entre el cauce del río Loa y los salares. En esta cadena de volcanes destacan las cumbres de los volcanes Aucanquilcha (6.176 msnm), Palpana (6.023 msnm), San Pedro (6.141 msnm) y San Pablo (6.092 msnm) (**Figura 4-9**).

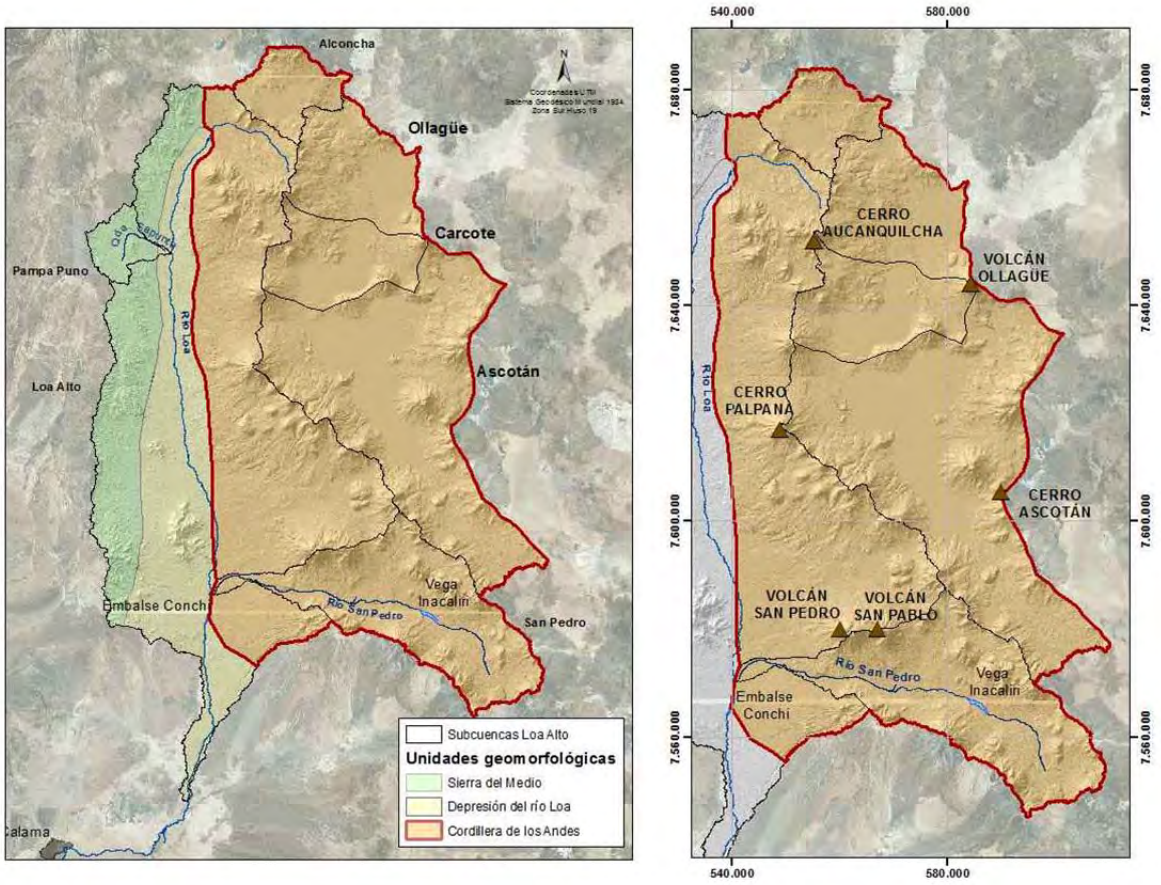


Figura 4-9. Mapa de ubicación de la Cordillera de los Andes. Fuente: elaboración propia.

La cordillera de los Andes es el sector con mayor régimen de precipitaciones de la zona de estudio, alcanzando los 300 mm/año, e incluso en las cumbres que sobrepasan los 5.700 msnm tienen nieves permanentes.

La ubicación alineada de los estratovolcanes indica la presencia de zonas de fallas inversas y normales que favorecieron las erupciones volcánicas, pero quedaron posteriormente cubiertos por gruesos espesores de rocas volcánicas. En la **Figura 2-3** se muestra la estratigrafía y la estructura que existe en el salar Ascotán según CICA (CICA, 1998).

El sector del salar Ojos de San Pedro se caracteriza por tener una estructura tipo *graben* originada por una fase tectónica de expansión, **Figura 2-2**. La depresión creada por las fallas normales se encuentra rellena por sedimentos de diferentes granulometrías. Esta estructura es detectada en los perfiles geofísicos de GEODATOS (Geodatos, 1986).

En el área de la cordillera de los Andes afloran desde rocas del Mioceno Superior hasta cuaternarias. En el Mioceno Superior, se originan los estratovolcanes andesíticos intensamente erosionados **(TMv).** Son volcanes andesíticos y andesíticos de hornblenda y de piroxeno, que corresponden a Tres Moños y Chigliapichina y al cerro Alconcha. El elevado grado de erosión que han sufrido ha alcanzado el núcleo de estos volcanes, mostrando la alteración hidrotermal solfatárica. Por la sublimación de los gases emanados de las solfataras se originan altas concentraciones de azufre. Este tipo de alteración hidrotermal origina argilización, silicificación y en menor proporción, propilitización, siendo favorables a la existencia de yacimientos polimetálicos veriformes de cobre, plata y oro. Esta unidad está engranada con las ignimbritas del Mioceno Superior, y cubiertas por las ignimbritas del Plioceno y los estratovolcanes moderadamente erosionados.

Posteriormente, en el Plioceno otra actividad volcánica da origen a estratovolcanes andesíticos moderadamente erosionados **(TPv).** Esta unidad pliocénica está constituida por andesitas de piroxeno y horblenda, y en menor proporción por riolitas, dacitas y niveles de escoria y pómez. El volcán representativo de esta unidad es el volcán San Pedro, en el que se diferencian tres tipos de lavas: la parte inferior son lavas andesíticas de hornblenda y piroxenos, con elevada escoria; la parte intermedia son coladas de andesitas de piroxeno y andesitas de horblenda, separadas por escoria roja; y la parte superior son coladas de andesitas de piroxeno rojizas.

Durante el Plio-Pleistoceno, se produce la última actividad volcánica andesítica-dacítica **(TPlv)** de la cordillera de los Andes, **Figura 4-10.** Esta unidad corresponde a los volcanes San Pedro y Ollagüe. Estos volcanes se caracterizan por presentar coladas que pueden individualizarse, por tener cráteres no erosionados intensamente y por

cubrir las rocas cenozoicas. La lava del volcán San Pedro está constituida por andesitas de piroxeno y hornblenda, mientras que la lava del volcán de Ollagüe es andesitísica de piroxeno.

Desde el punto de vista hidroquímico, la composición mineralógica de estas unidades volcánicas condiciona la composición química del agua subterránea por la interacción agua-roca. La interacción agua-roca origina diferentes resultados de la composición química del agua dependiendo de la roca que se trate y del tiempo de residencia del agua subterránea. La andesita y dacita cuando interaccionan con el agua subterránea libera cationes de sodio y/o calcio, ya que es una roca constituida con un elevado porcentaje de plagioclasa. Por último, las unidades riolíticas pueden enriquecer las aguas subterráneas con cationes de potasio. Es decir, las rocas andesíticas son más básicas que las rocas riolíticas, siendo las rocas dacíticas intermedias a las anteriores.

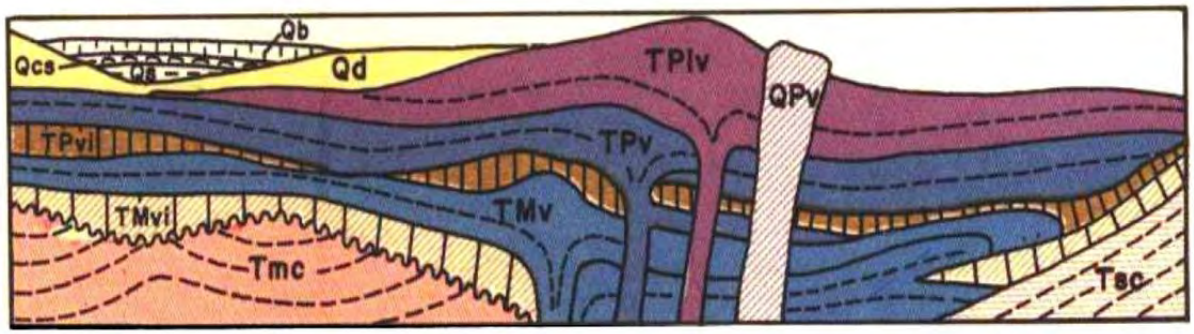


Figura 4-10. Esquema de la disposición y relación de las unidades geológicas desde el Mioceno hasta la actualidad. Fuente: Ramírez y Huete, 1981.

En el sector de los salares destacan los domos dacíticos porfíricos cuaternarios distribuidos preferentemente en el sector del salar de Ascotán **(QPv)** y los depósitos salinos **(Qs, Qcs, Qb)** en los salares orientales, formados por sulfatos de calcio, carbonatos de calcio, cloruro de sodio y boratos. Estos depósitos son horizontes, delgados e interestratificados con sedimentos limo-arcillosos y salinos, destaca el mineral ulexita ($B_2 0_3$) en el salar de Ascotán.

Los depósitos **no consolidados (Qc),** constituidos por sedimentos de origen aluvial y fluvioglacial, por morrenas, lahares y depósitos de piroclastos, se distribuyen por toda la zona de estudio.

Al este de la Estación San Pedro existen unos mantos de diatomitas, de contenido de 76-88% de SiO_2, intercalados en los depósitos no consolidados del Pleistoceno-Holoceno.

5 CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA

En este capítulo se presenta una caracterización de la hidrología del Loa Alto, área ubicada en la Región de Antofagasta. Se expone el contexto hidroclimático en que está situada la zona, se analizan los datos de las estaciones meteorológicas, así como las peculiaridades climáticas que las caracterizan. Finalmente se realiza un análisis hidrológico aplicado, donde se describen los parámetros que definen la cuenca de estudio y se cuantifican las diferentes variables climáticas para realizar el balance hidrológico.

5.1 CONTEXTO HIDROCLIMÁTICO

Las características climáticas de una zona están condicionadas por su situación y la altura geográfica. La región de Antofagasta presenta características climáticas similares a la primera Región. Una extrema aridez que se manifiesta especialmente en la depresión intermedia y en las cuencas intermontanas. La distancia del mar y las alturas del interior contribuyen a crear variaciones climáticas dispuestas en franjas longitudinales que son las siguientes (**Figura 5-1**):

Clima desértico con nublados abundantes: este clima abarca todo el litoral de la Región en las áreas ubicadas bajo los 1.000 msnm. Una característica es la gran nubosidad que se intensifica en el invierno y la alta humedad recibida desde el mar, la que en contacto con los farellones costeros, permite un aprovechamiento de las camanchacas. Esta alta humedad, la proximidad del mar y el efecto moderador de la corriente de Humboldt, producen bajas amplitudes térmicas tanto diarias como anuales. En Antofagasta, ambas son del orden de 6 a 7ºC. Esta influencia oceánica no alcanza más allá de unos 40 o 50 Km hacia el interior.

Clima desértico normal: se presenta este clima a partir de los 1.000 msnm, caracterizado por la muy baja humedad relativa, donde la influencia marítima no alcanza a manifestarse, 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 de barrera de la cordillera de los Andes, que impide la entrada de las masas de aire húmedas que provienen del sector tropical continental. El clima en este lugar está condicionado por

factores radiactivos. La fuerte radiación solar y la emisión nocturna de radiación infrarroja desde la superficie explican el fuerte contraste térmico entre el día y la noche. La ausencia casi total de precipitación y las condiciones extremadamente secas del ambiente hacen imposible el desarrollo de la vida vegetal.

Clima desértico marginal de altura: se presenta por el centro de la región, entre los 2.000 y 3.000 msnm. Este clima es el que se encuentra en las zonas más bajas del área de estudio, concretamente en la zona media-baja de la cuenca del Loa Alto. En este clima el régimen de precipitaciones se presenta mezclado observándose precipitaciones estivales y también de origen ciclónico, aunque escasas en ambos casos. Las de origen ciclonal, 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 más frías y la misma altura atenúa las oscilaciones térmicas anuales, pero aumenta las diarias. Calama presenta 6,5ºC de diferencia entre las temperaturas medias del mes más cálido y el más frío y de sólo 3,8ºC en las temperaturas máximas, en cambio presenta hasta 22ºC de diferencia entre las máximas y las mínimas, pero en días particulares pueden registrarse hasta 30ºC de diferencia. La humedad relativa es muy baja.

Clima de estepa de altura: se sitúa a partir de los 3.000 msnm, comprendiendo la Puna de Atacama. En el resto de la cuenca de estudio se encuentra este tipo de clima. La elevada altitud hace que las temperaturas sean muy frías, las temperaturas medias no sobrepasan los 5ºC y producen una gran amplitud térmica entre el día y la noche. La principal característica es el aumento de las precipitaciones que pueden alcanzar hasta los 300 mm de agua caída en el año. La altura hace que muchas de las precipitaciones sean de nieve. A partir de los 5.700 msnm, las bajas temperaturas hacen que las nieves sean eternas, caracterizando las cumbres más elevados de la región.

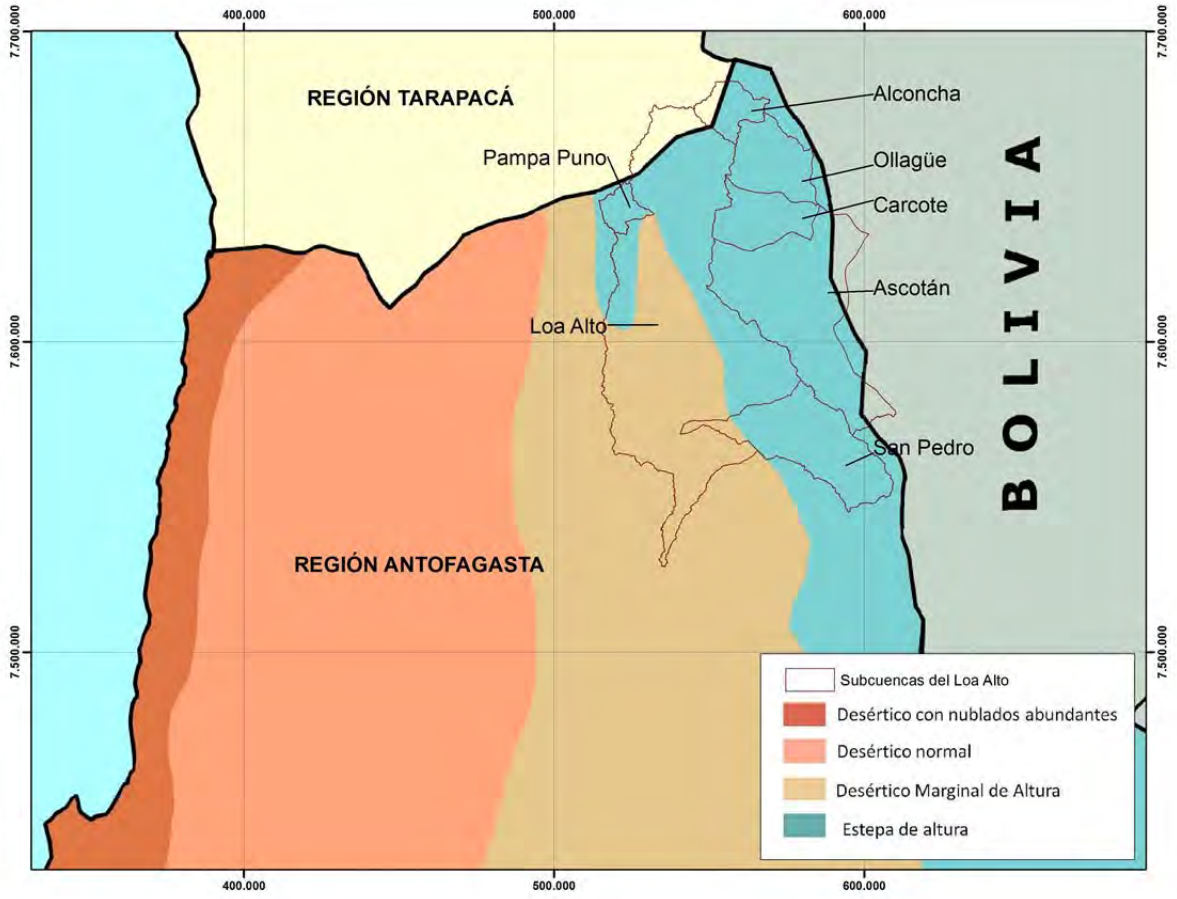


Figura 5-1. Clasificación del clima en la Región de Antofagasta. Fuente: elaboración propia.

5.2 ANÁLISIS DE VARIABLES METEOROLÓGICAS

En este apartado se realiza un análisis de los datos de partida para realizar el estudio hidrológico. Se han utilizado los informes de DGA (DGA, 2003), DICTUC (DICTUC, 2008) y DGA (DGA, 1986). También se han empleado las estaciones pluviométricas y fluviométricas de la DGA. Esta es la información base para obtener datos de: precipitaciones medias, temperatura, evaporación, evapotranspiración y caudales medios.

5.2.1 PRECIPITACIONES MEDIAS

Se realizó un primer análisis para caracterizar las precipitaciones medias anuales utilizando las isoyetas generadas por DICTUC (DICTUC, 2008). Sin embargo, en una reunión de trabajo sostenida con la Dirección General de Aguas se nos comunicó que estas isoyetas poseen errores de distribución espacial. Por tanto, se ha vuelto a

realizar el análisis esta vez empleando las isoyetas del Balance Hidrológico de Chile del año 1986, facilitadas por la propia DGA. Adicionalmente, se realiza una comparación sobre los valores obtenidos mediante las dos fuentes de precipitación.

ISOYETAS DICTUC 2008

En el informe de DICTUC (DICTUC, 2008) se caracterizan las precipitaciones del norte de Chile y se consideran datos disponibles tanto de Chile como de Argentina, Bolivia y Perú. Lo han realizado de este modo, ya que la cuenca del Loa Alto contiene cuencas altiplánicas que se ubican en el límite nororiental. Algunas de ellas, como Ollagüe y Ascotán, tienen el área de drenaje compartida con el país vecino de Bolivia, debido a las características geomorfológicas y a la división político-administrativa establecida en la zona. Por consiguiente, para una adecuada descripción del comportamiento de las precipitaciones en dichas hoyas hidrográficas es necesario contar con información tanto nacional como aquella disponible en organismos de países vecinos o internacionales.

El trazado de las isoyetas que realizó DICTUC fue mediante la interpolación espacial de las precipitaci ones medias anuales para el año hidrológico, después de un previo relleno de datos ausentes. Prácticamente todas las estaciones se han rellenado hasta el año 2007, algunas de ellas poseen datos desde el año 1960. En promedio, prácticamente todas las estaciones tienen datos desde el año 1970 hasta el año 2007.

Una vez realizado el relleno de datos ausentes, DICTUC (DICTUC, 2008) trazó isoyetas para posteriormente corregirlas en base a la topografía y a los gradientes de la precipitación con la altura.

A partir de estas isoyetas y mediante el software ArcGIS 10.1 hemos generado el Modelo Digital de Precipitaciones (**Figura 5-2**), calculado mediante la técnica de interpolación de “Vecino Natural” (Natural Neighbor). Mediante esta técnica se interpola una superficie de ráster a partir de los puntos de las isoyetas y es muy utilizada para interpolación de datos meteorológicos.

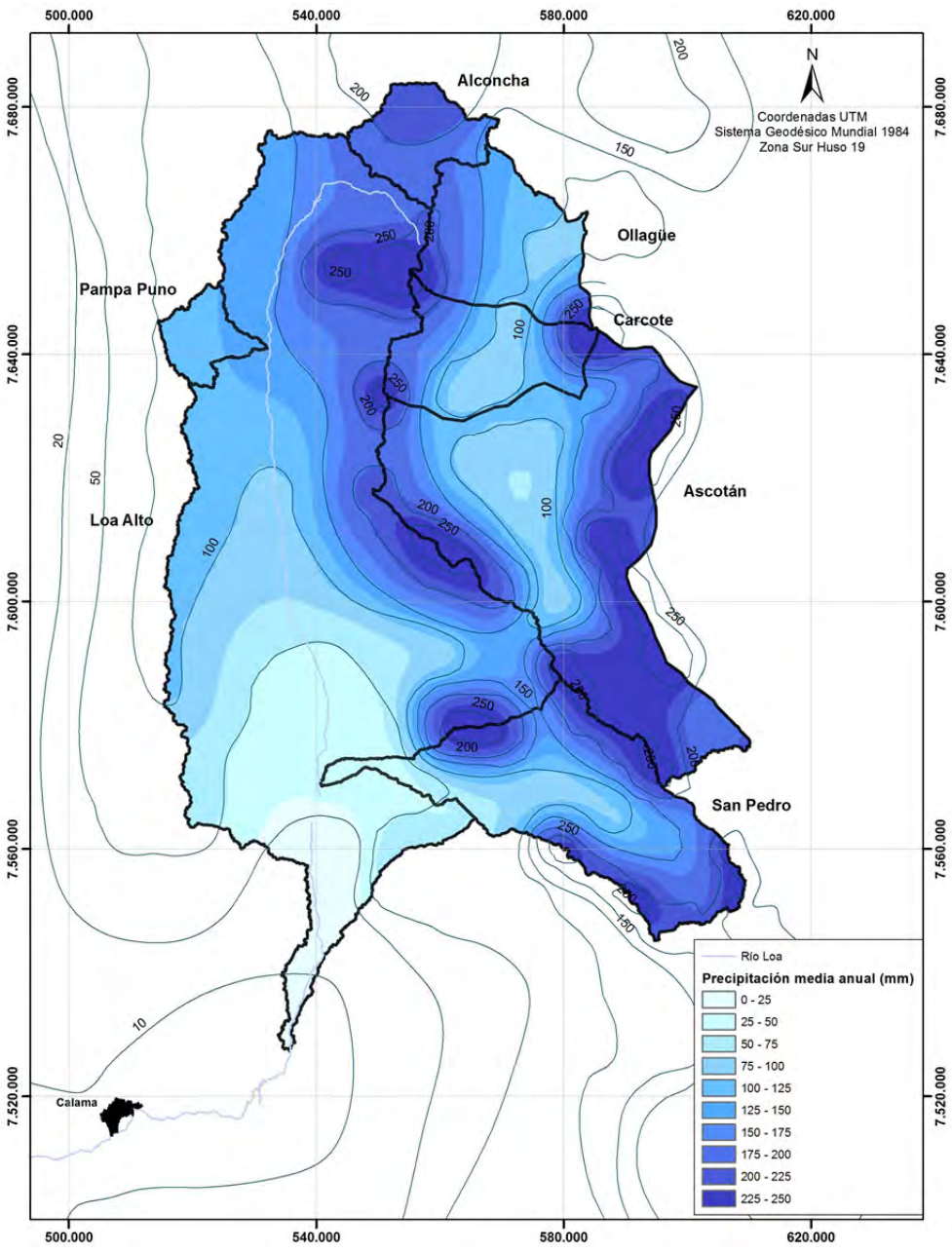


Figura 5-2. Modelo Digital de Precipitaciones Medias Anuales de la Cuenca del Loa Alto. Fuente: elaboración propia.

Para conocer la precipitación media anual en la cuenca del Loa Alto, se ha dividido el Modelo Digital de Elevaciones en bandas hipsométricas, cada 200 metros. En la **Tabla 5-1** se muestra la precipitación media anual para cada banda hipsométrica o rango de altitudes. Se observa claramente la relación existente entre la precipitación y la altitud, a medida que aumenta la elevación también lo hacen las precipitaciones.

Banda hipsométrica	Altitud (msnm)	Altitud media (msnm)	$P_{Media\ anual}$ (mm)
1	2.507-2.600	2.554	9
2	2.600-2.800	2.700	10
3	2.800-3.000	2.900	13
4	3.000-3.200	3.100	25
5	3.200-3.400	3.300	52
6	3.400-3.600	3.500	75
7	3.600-3.800	3.700	101
8	3.800-4.000	3.900	129
9	4.000-4.200	4.100	150
10	4.200-4.400	4.300	181
11	4.400-4.600	4.500	197
12	4.600-4.800	4.700	212
13	4.800-5.000	4.900	224
14	5.000-5.200	5.100	237
15	5.200-5.400	5.300	238
16	5.400-5.600	5.500	246
17	5.600-5.800	5.700	241
18	5.800-6.000	5.900	232
19	6.000-6.164	6.082	253
CUENCA DEL LOA ALTO			**146**

Tabla 5-1. Bandas hipsométricas en la cuenca del Loa Alto y precipitación media anual asociada a cada rango de altitudes. Donde "$P_{Media\ anual}$" es precipitación media anual. Calculado a partir de las isoyetas de DICTUC (DICTUC, 2008). Fuente: elaboración propia.

ISOYETAS BALANCE HIDROLÓGICO DE CHILE 1987

A continuación se analizan las isoyetas del informe de DGA (DGA, 1986). Para contrastar los valores de las precipitaciones medias anuales de las isoyetas, se ha recurrido al informe de GCF (GCF, 2010). En dicho estudio se ha realizado un rellenado y extendido de las series de precipitación. Aplicaron un modelo estocástico multivariado sencillo, que propone conservar la estructura espacial, la media y las desviaciones en magnitud que se observan en las precipitaciones de la zona, simulando valores que, dentro de ese marco, varíen aleatoriamente. Finalmente obtienen el valor de precipitación promedio anual en diversas estaciones de la DGA de la segunda región.

Para analizar las isoyetas del DGA (DGA, 1986), éstas se comparan con los valores de precipitación media anual que muestran las estaciones de la DGA en el informe de GCF (GCF, 2010). En la **Figura 5-3** se muestran las isoyetas y las estaciones en la cuenca del Loa Alto, con los valores de precipitación media anual. Se puede observar que prácticamente todas las estaciones muestran un valor que se encuentra en el intervalo de la isoyeta que está por encima y la que está por debajo. Por ejemplo, la estación en Embalse Conchi tiene una precipitación de 18 mm y se encuentra entre la isoyeta de 10 mm y la de 25 mm. Sólo dos estaciones no muestran correlación con las isoyetas, éstas se han marcado en color rojo en la **Figura 5-3**:

- Estación Lequena: tiene un valor de 90,4 mm y se encuentra entre las isoyetas de 100 mm y 150 mm. El error no se considera muy elevado, ya que la estación está muy próxima a la isoyeta con valor de 100 mm.
- Estación Ascotán: tiene un valor de 69 mm y se encuentra entre dos isoyetas de 150.

Después de realizar este análisis se considera que la distribución espacial y los valores que muestran las isoyetas del informe de DGA (DGA, 1986) son adecuados para la zona estudio, correspondiente a la cuenca del Loa Alto. Se ha considerado de esta forma ya que prácticamente todas las estaciones que se encuentran en la zona de estudio presentan buena correlación con las isoyetas del informe de DGA (DGA, 1986).

La metodología para cuantificar las precipitaciones medias en la zona de estudio es la misma que la empleada para las isoyetas de DICTUC (DICTUC, 2008). En primer lugar se obtiene el Modelo Digital de Precipitaciones y a continuación se divide en bandas hipsométricas o rangos de altitud para calcular la precipitación media anual. El Modelo Digital de Precipitaciones se ha obtenido ampliando las isoyetas del Balance Hidrológico Nacional del año 1987 con las isoyetas de DICTUC (DICTUC, 2008). Esto se ha realizado porque por el límite oriental, correspondiente a la frontera de Chile con Bolivia, las isoyetas no abarcan toda la superficie de estudio. De esta forma se genera un Modelo Digital de Precipitaciones más preciso en esta zona, principalmente en las cuencas de Ollagüe, Carcote y Ascotán. En la **Figura 5-4** se muestra el Modelo Digital de Precipitaciones obtenido, las isoyetas del informe de DGA (DGA, 1986) y las isoyetas de DICTUC (DICTUC, 2008) que han servido para complementar los datos de precipitación en la frontera con Bolivia.

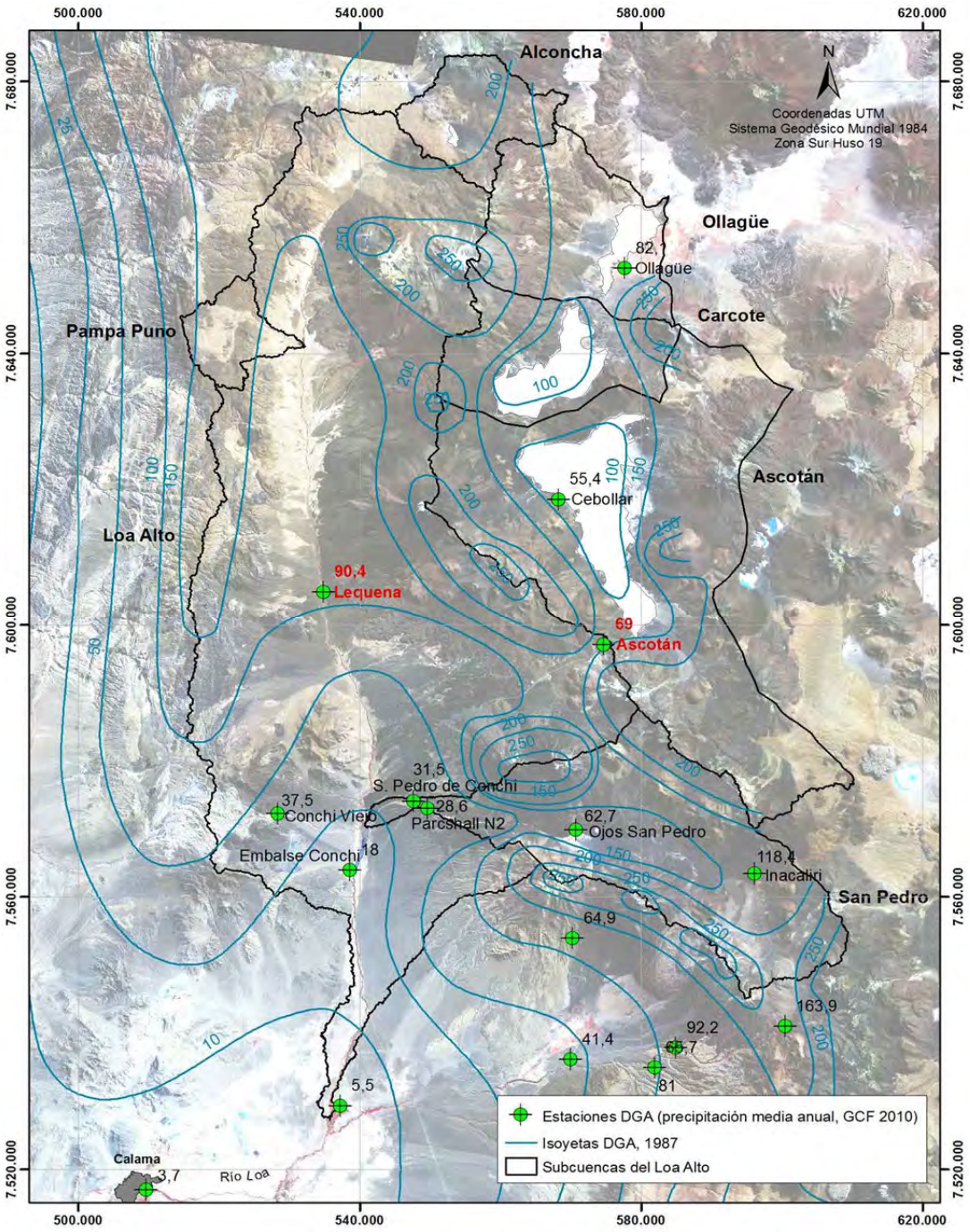


Figura 5-3. Comparación entre isoyetas de precipitación media anual del informe de DGA (DGA, 1986) y los valores en las estaciones DGA. Fuente: elaboración propia.

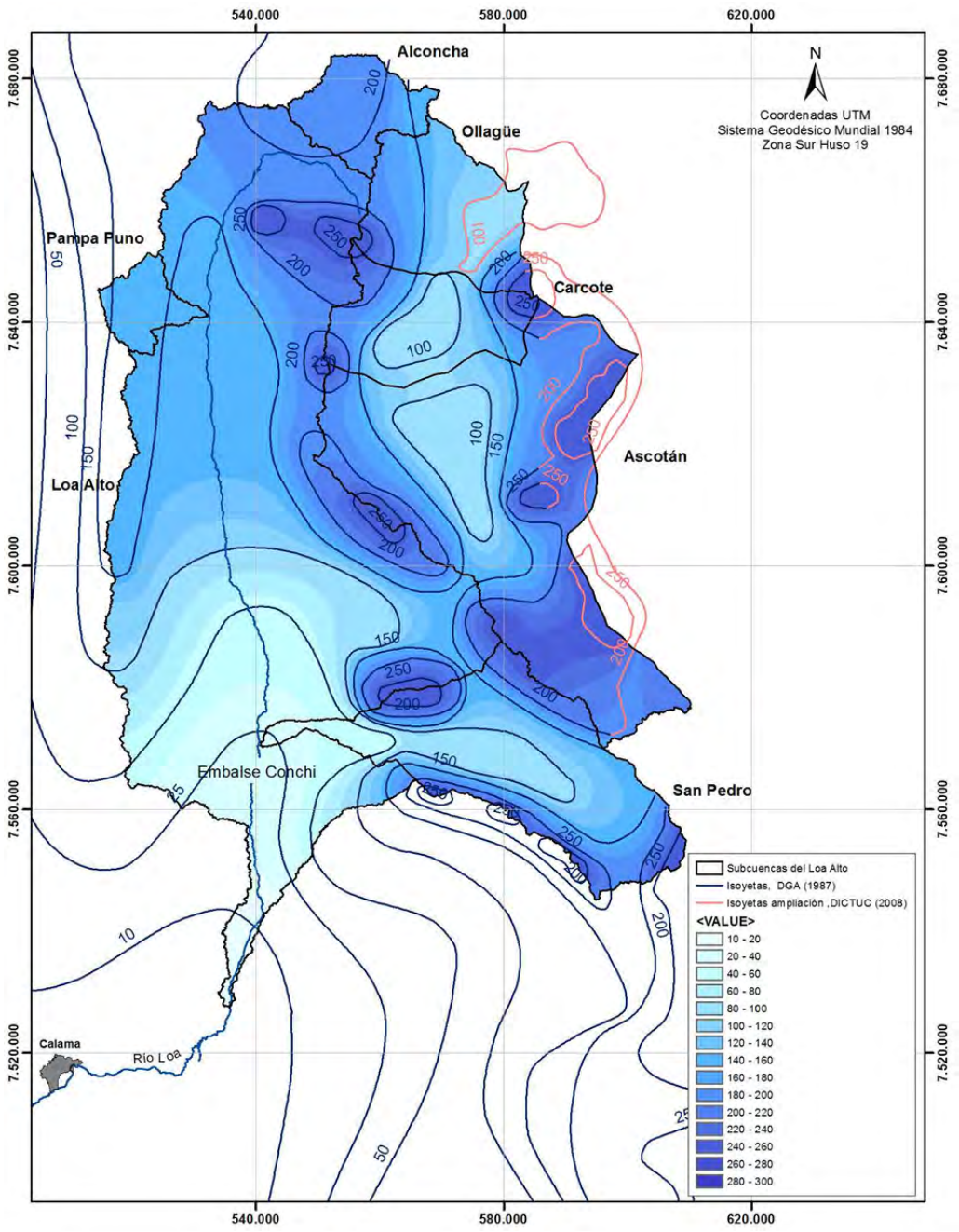


Figura 5-4. Modelo Digital de Precipitaciones medias anuales obtenido a partir de las isoyetas del informe de DGA (DGA, 1986) (color azul). Las isoyetas se han ampliado en la frontera con Bolivia a partir de las isoyetas de DICTUC (DICTUC, 2008) (color rojo). Fuente: elaboración propia.

Las bandas hipsométricas de la cuenca del Loa Alto que se relacionan con la precipitación media anual se puede observar en la **Tabla 5-2.** Estos son los datos que

se han utilizado para calcular las precipitaciones medias anuales en la zona de estudio (**Apartado 5.3.2**).

Banda hipsométrica	Altitud (msnm)	Altitud media (msnm)	$P_{Media\ anual}$ (mm)
1	2.507-2.600	2.554	10
2	2.600-2.800	2.700	12
3	2.800-3.000	2.900	23
4	3.000-3.200	3.100	29
5	3.200-3.400	3.300	58
6	3.400-3.600	3.500	92
7	3.600-3.800	3.700	111
8	3.800-4.000	3.900	135
9	4.000-4.200	4.100	159
10	4.200-4.400	4.300	189
11	4.400-4.600	4.500	200
12	4.600-4.800	4.700	211
13	4.800-5.000	4.900	221
14	5.000-5.200	5.100	225
15	5.200-5.400	5.300	233
16	5.400-5.600	5.500	241
17	5.600-5.800	5.700	243
18	5.800-6.000	5.900	245
19	6.000-6.164	6.082	250

Tabla 5-2. Bandas hipsométricas en la cuenca del Loa Alto y precipitación media anual asociada a cada rango de altitudes. Donde "$P_{Media\ anual}$" es precipitación media anual. Calculado a partir de las isoyetas del informe de DGA (DGA, 1986) y ampliado por la frontera con Bolivia a partir de las isoyetas de DICTUC (DICTUC, 2008). Fuente: elaboración propia.

Se asume que la precipitación sobre la cuenca constituye la principal fuente de recursos hídricos renovables, superficiales y subterráneos. Para conocer la distribución de las precipitaciones medias mensuales y analizar la estacionalidad existente, se han seleccionado estaciones de la Dirección General de Aguas (DGA) situadas dentro de la cuenca de estudio y a diferentes altitudes. En la **Figura 5-5** se puede observar el mapa de localización de las estaciones seleccionadas.

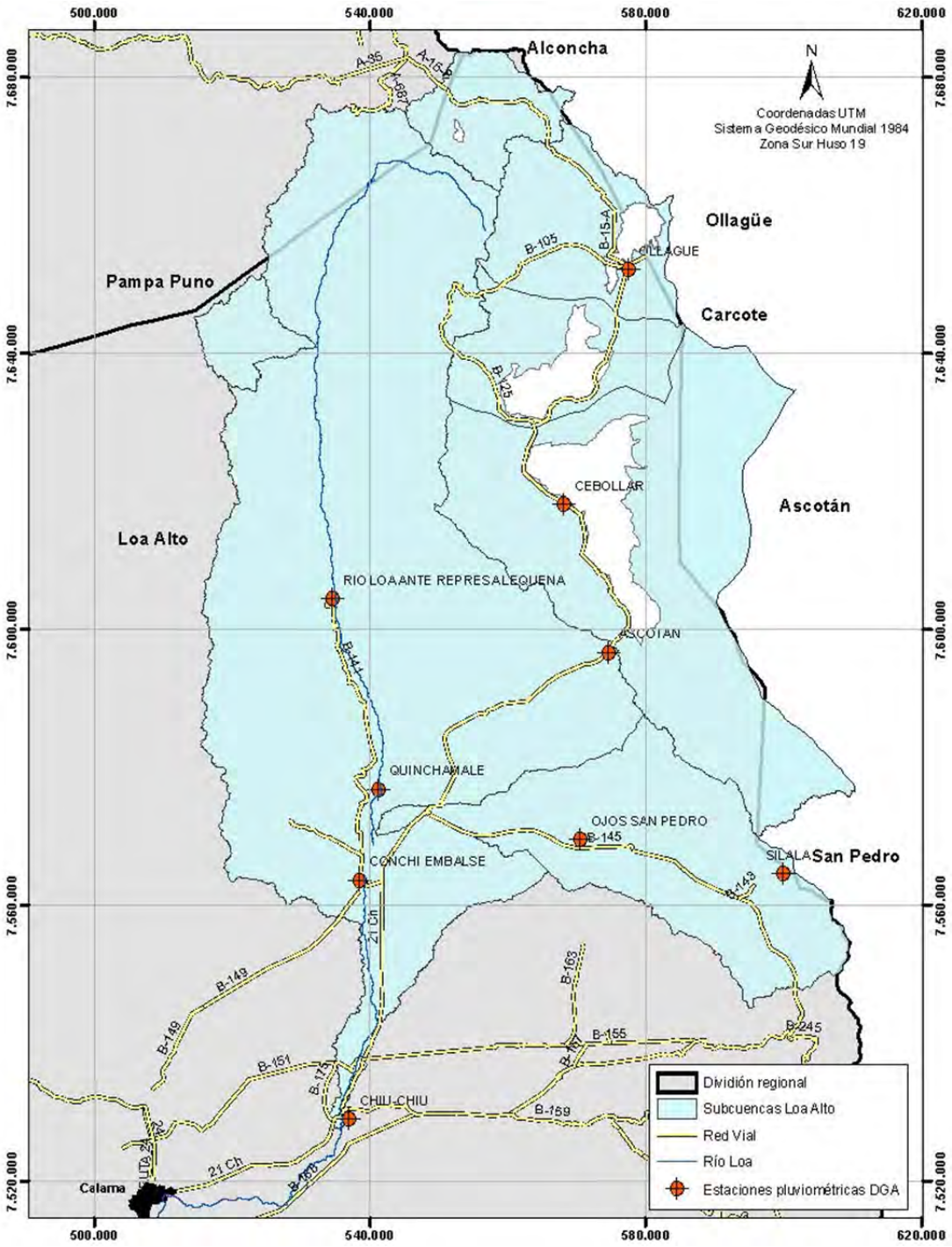


Figura 5-5. Estaciones pluviométricas seleccionadas de la Dirección General de Aguas, para representar las precipitaciones medias mensuales. Fuente: elaboración propia.

En la **Tabla 5-3** se presentan las estaciones seleccionadas, las coordenadas en el Sistema Geodésico Mundial (WGS) 1984, Zona 19 Sur, la altitud, los valores medios

mensuales de precipitación y el valor medio anual. En la **Figura 5-6** se han representado los datos en un gráfico.

Estación pluviométrica	WGS 1984, 19 S		Altitud	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	AÑO
	X	Y	[msnm]													
Chiu Chiu	537.023	7.528.988	2.524	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	5
Conchi embalse	538.396	7.563.605	3.010	6	6	3	0	0	1	0	1	0	0	0	1	16
Río Loa Antes Represa Lequena	541.298	7.576.850	3.020	24	22	16	1	1	1	2	2	1	0	0	2	71
Quinchamale	534.558	7.604.475	3.020	8	7	5	0	1	1	0	1	1	0	0	0	21
Ollagüe	577.498	7.652.196	3.650	36	27	13	1	2	2	1	2	1	1	1	9	91
Cebollar	568.102	7.618.172	3.730	20	17	8	0	1	1	1	1	0	0	1	6	54
Ojos	570.560	7.569.520	3.800	19	26	16	0	2	2	0	1	1	0	0	3	66
Ascotan	574.531	7.596.652	3.956	22	26	12	0	1	1	0	1	1	1	1	8	72
Silala	599.841	7.564.564	4.315	31	41	21	1	2	0	1	2	0	0	0	2	100

Tabla 5-3. Precipitaciones medias mensuales de estaciones pluviométricas de la Dirección General de Aguas situadas dentro de la Cuenca del Loa Alto. Fuente: elaboración propia.

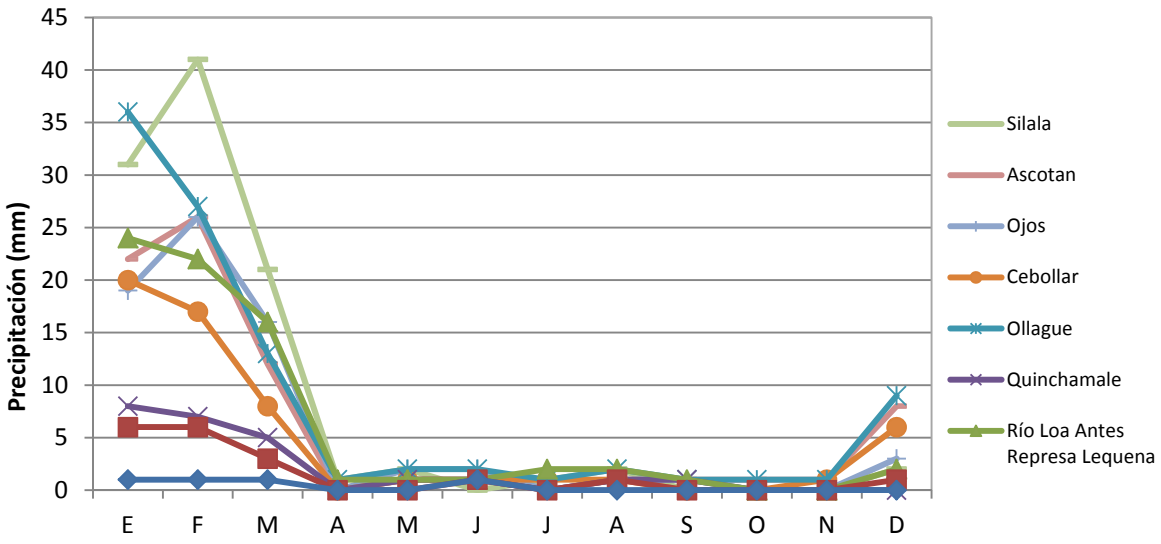


Figura 5-6. Representación de las precipitaciones medias mensuales de estaciones fluviométricas de la Dirección General de Aguas. Fuente: elaboración propia.

Se puede observar que existe una marcada estacionalidad en las precipitaciones. Los meses más húmedos son enero y febrero, mostrando una fuerte influencia tropical presente en la zona, a causa del invierno altiplánico. En la **Tabla 5-4** se ha cuantificado la distribución estacional de la precipitación, dividida entre los periodos de

Diciembre-Marzo y Abril-Noviembre. Se observa que entre el 75% y el 95% de la precipitación anual está concentrada en el periodo de Diciembre-Marzo, y el resto corresponde a un periodo seco en el que llueve muy poco, entre el 6% y el 25% de la precipitación media anual.

Estación pluviométrica	Diciembre-Marzo	Abril - Noviembre
Chiu Chiu	75%	25%
Conchi embalse	89%	11%
Río Loa Antes Represa Lequena	89%	11%
Quinchamale	83%	17%
Ollagüe	89%	10%
Cebollar	91%	7%
Ojos	91%	9%
Ascotan	92%	7%
Silala	94%	6%

Tabla 5-4. Distribución de las precipitaciones durante los periodos de diciembre a marzo y de abril a noviembre. Fuente: elaboración propia.

5.2.2 TEMPERATURAS MEDIAS

La altura geográfica también tiene una influencia directa en las temperaturas medias, de forma que las temperaturas promedio disminuyen al aumentar la cota geográfica. Todas las estaciones utilizadas para caracterizar la temperatura media del área de estudio corresponden a la Dirección General de Aguas (DGA). Se han seleccionado las estaciones del informe de DGA (DGA, 2003), ya que realizan el balance en toda la cuenca del Loa Alto y son representativas de ésta. No se ha considerado la estación Coya Sur por estar a 1.300 msnm y no ser representativa de la zona de estudio, ya que la altitud más baja corresponde a los 2.500 msnm aproximadamente. En la **Figura 5-7** se muestra la localización de dichas estaciones, así como el Modelo Digital de Temperaturas. En la **Tabla 5-5** se presenta la lista de las estaciones seleccionadas, junto con la ubicación (coordenadas UTM, Sistema Geodésico Mundial (WGS) 1984, Zona 19 Sur), altitud y temperatura media. En la **Figura 5-8** se muestra el gráfico que relaciona la temperatura con la altitud para obtener la ecuación que permite calcular la temperatura media en el área de estudio, a partir de la cual se ha calculado el Modelo Digital de Temperaturas.

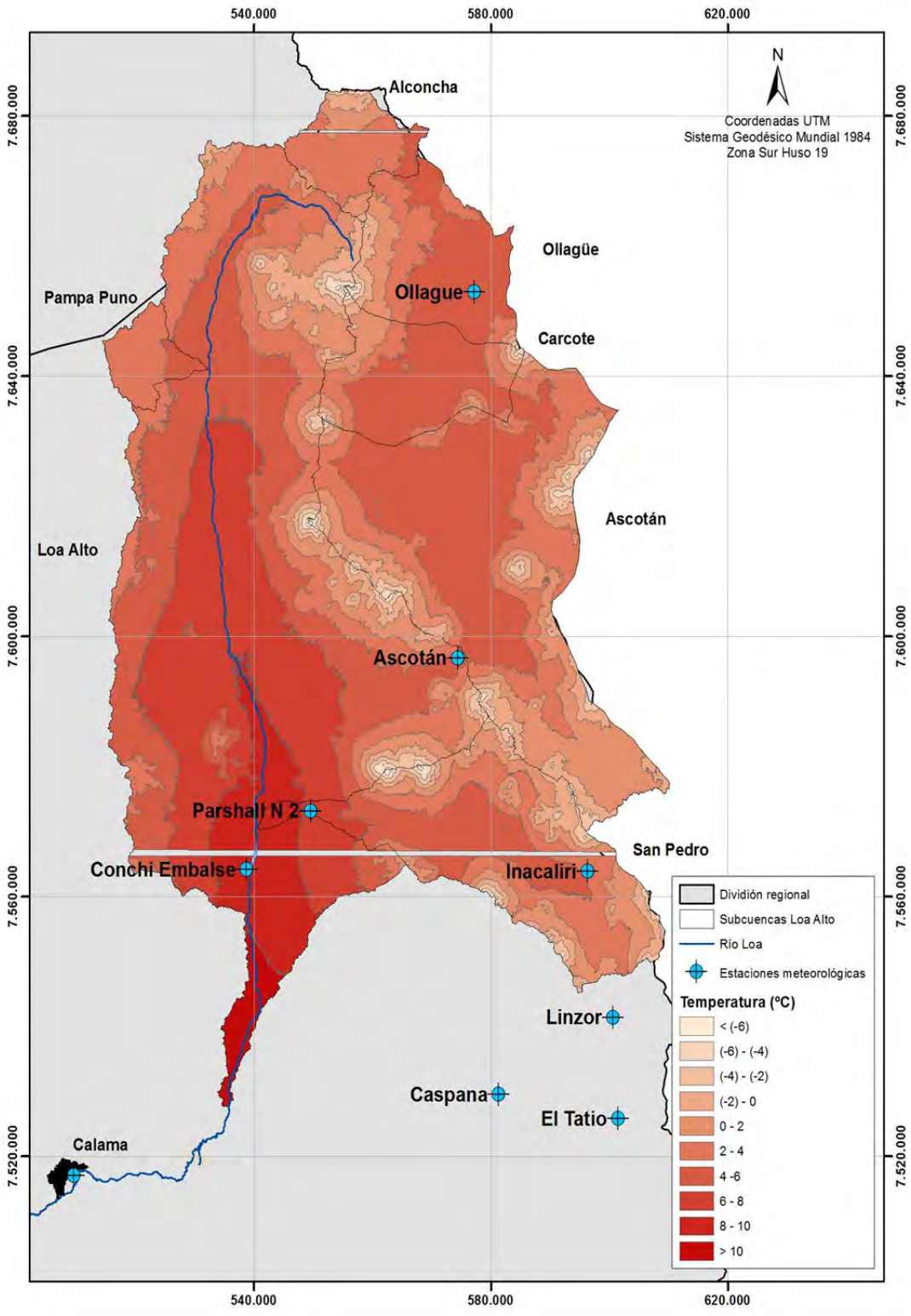


Figura 5-7. Localización de las estaciones meteorológicas DGA para caracterizar la temperatura y Modelo Digital de Temperaturas de la cuenca del Loa Alto. Fuente: elaboración propia.

Nombre estación	WGS 1984. Huso 19		Altitud (msnm)	Temperatura media (°C)
	UTM ESTE	UTM NORTE		
Calama	509.635	7.517.056	2.260	12,2
Conchi Emb.	538.796	7.564.136	3.010	9
Caspana	581.373	7.529.526	3.260	8,8
Parshall 2	549.598	7.573.123	3.318	8,5
Ollagüe	577.250	7.652.885	3.650	5,8
Ascotan	574.717	7.597.020	3.956	4,6
Linzor	600.705	7.541.410	4.096	1,1
Inacaliri	596.380	7.563.854	4.100	3
El Tatio	601.521	7.525.807	4.320	0,8

Tabla 5-5. Nombre de las estaciones meteorológicas seleccionadas para determinar la temperatura media en la zona de estudio, coordenada UTM en el Sistema Geodésico Mundial (WGS) 1984, altitud y temperatura. Fuente: elaboración propia.

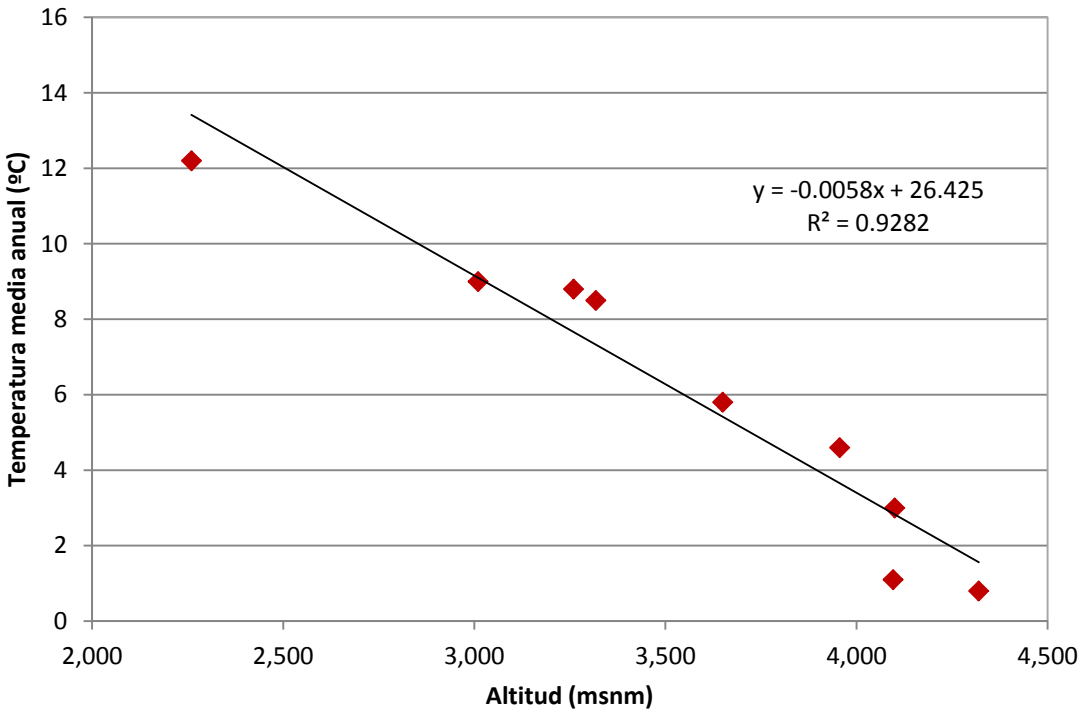


Figura 5-8. Relación entre la temperatura y la altitud de las estaciones seleccionadas para el estudio de la temperatura en la cuenca del Loa Alto. Fuente: elaboración propia.

5.2.3 VARIACIÓN TEMPORAL DE LA TEMPERATURA

En la **Tabla 5-6** se muestra las temperaturas medias mensuales de las estaciones meteorológicas seleccionadas. En el gráfico de la **Figura 5-9** se han representado algunas de ellas. Se observa que los meses de junio, julio y agosto las temperaturas alcanzan los valores mínimos durante el año. En cambio, durante diciembre, enero y febrero las temperaturas alcanzan los valores máximos, además, también se aprecia el descenso de las temperaturas medias con la altitud.

Estación	Altitud	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Calama	2.260	15,2	15,2	14,8	13,2	11,1	10,1	9,8	10,7	12,2	13,7	14,6	15,7
Conchi Emb.	3.010	12,8	12,5	12,2	10,2	8,1	6,7	6,4	7,1	8,9	10,8	11,8	12,8
Caspana	3.260	11,2	10,9	10,5	9,3	7,8	6,2	6,6	7,7	8,5	9,6	10,5	11,3
Ollagüe	3.650	10,3	9,4	9,2	6,6	5,6	1,3	1,2	2,7	4,4	7,2	10,7	10,1
Linzor	4.096	5,8	5,6	5,3	3,4	0,8	-1,3	-1,1	0,2	1,5	3,5	5,1	5,8
Inacaliri	4.100	7,4	7,5	7,5	5,8	3,1	1,5	1,1	1,8	3,1	5,2	6,4	7,5
El Tatio	4.320	5,5	5,5	5,5	2,4	0,9	-1,4	-2,6	-0,4	-0,1	3,1	4,6	5,4

Tabla 5-6. Temperatura media mensual de las estaciones seleccionadas. Fuente: elaboración propia.

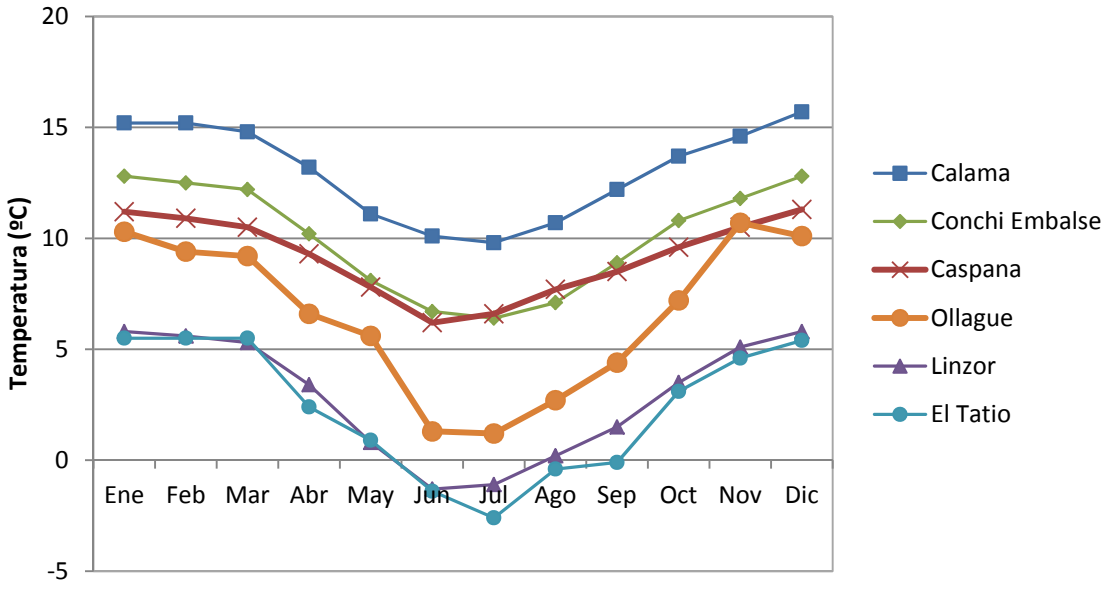


Figura 5-9. Variación de la temperatura media mensual de algunas estaciones de la zona de estudio. Fuente: elaboración propia.

5.2.4 EVAPOTRANSPIRACIÓN Y EVAPORACIÓN

Se ha considerado como evaporación únicamente la que se presenta en los salares. No se ha incluido la evaporación desde los cauces, ya que según el informe de DGA (DGA, 2003), que está fundamentado en el estudio de Balance Hidrológico de la II Región, sólo hay evaporación desde los cauces desde Calama hacia aguas abajo, es decir, en los ríos Salvador y Loa Bajo. Por tanto, no se considera este factor, ya que las zonas donde existe se encuentran fuera del área de estudio.

Las cuencas endorreicas en las que están situadas los salares forman un sistema en equilibrio. Según MARDONES (Mardones, 1998), toda el agua que precipita en los salares es evaporada a la atmósfera. De este modo, la salida por evaporación corresponderá a toda la precipitación que cae en las superficies de los salares de Alconcha, Ollagüe, Carcote y Ascotán.

Pero no todo el recurso aportado por la precipitación se pierde por evaporación. En las zonas altas de la cuenca, donde la evaporación no compromete el total de la precipitación, queda un remanente que infiltra o escurre, dando lugar a la escorrentía superficial y subterránea que se manifiesta y se observa hacia aguas abajo en la cuenca.

La evaporación que se produce realmente, desde las superficies naturales (sin incluir los salares) se llama evapotranspiración natural. Dicho valor se estima en función de la precipitación media anual y de la temperatura media anual. Una aproximación razonable de la evapotranspiración, dadas las condiciones climáticas de la zona, se obtiene con la fórmula de Turc, basada en observaciones realizadas en 254 cuencas distribuidas por todos los climas del mundo (cálido, templado, frío).

A partir de la siguiente expresión, se obtiene la evapotranspiración natural o real para cada rango de altitudes de la cuenca del Loa Alto:

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0{,}9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

Donde: ETR: evapotranspiración natural o real

L= función de la temperatura media mensual

$L = 300 + 25T + 0{,}05T^3$

T = temperatura media anual en ºC

P = precipitación media anual en mm

5.3 ANÁLISIS HIDROLÓGICO

Para realizar el análisis hidrológico se va a describir en primer lugar las características morfológicas de las subcuencas de estudio. A continuación se calculan las precipitaciones medias, la evaporación, la evapotranspiración y la escorrentía, en función del análisis de los datos realizado en el apartado anterior y de las características morfológicas de las subcuencas. Finalmente se muestra un balance hidrológico para las diferentes subcuencas de la cuenca del Loa Alto.

5.3.1 CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS

Las características morfológicas, como indica su nombre, definen la morfología de la cuenca. Para delimitar la cuenca hidrográfica y las diferentes subcuencas se ha recurrido a los Sistemas de Información Geográfica, concretamente el software ArcGIS 10.1. el estudio se ha iniciado a partir de un Modelo Digital de Elevaciones (MDE), obtenido de satélite ASTER de la NASA.

La morfología de cualquier cuenca hidrográfica queda definida por tres tipos de parámetros, los relativos a la forma, al relieve y a la red hidrográfica.

- **Parámetros de forma**

El área (A) es el parámetro más importante, ya que regula la intensidad de varios fenómenos hidrológicos como el volumen de precipitación y el caudal entre otros. Con este valor y con el del perímetro (P) se puede hallar el **Coeficiente de Gravelius** o **Coeficiente de Compacidad**. Este índice indica la irregularidad de la cuenca, cuanto mayor sea, más irregular es; cuando es igual a uno, indica que la cuenca es perfectamente regular, puede alcanzar el valor de tres en cuencas muy alargadas. En la **Tabla 5-7** se muestra la clasificación de cuencas en función del coeficiente de Gravelius y a continuación se observa la ecuación para calcularlo:

$$K_G = 0{,}28\frac{P}{\sqrt{A}}$$

Donde: P: perímetro (Km)

A: Área (Km^2)

K_G	Forma	Tendencia de crecidas
1,00-1,25	Redonda	Alta
1,25-1,50	Ovalada	Media
1,50-1,75	Oblonga	Baja
>1,75	Rectangular	Muy baja

Tabla 5-7. Clasificación de cuencas en función del coeficiente de Gravelius. Fuente: modificado de Fuentes, 2004.

Este factor influye de forma significativa en el tiempo de concentración de la cuenca, ya que cuanto más alargada es la cuenca, por lo general, mayor tiempo va a tardar la escorrentía superficial en llegar al punto de cierre de la cuenca. Además, cuanto más tiempo tarde, se producirán mayores pérdidas por evaporación y por tanto menor recarga. Se puede observar en la **Tabla 5-8** el Coeficiente de Gravelius, la forma y la velocidad de transformación de la lluvia en recarga de las diferentes subcuencas.

Las subcuencas de Alconcha, Ollagüe, Carcote, Ascotán y Pampa Puno tienen un forma entre ovalada y oblonga, es decir, un término medio entre cuencas circulares y rectangulares, considerando que las cuencas redondas, sin tener en cuenta otros factores, responden más rápido a la transformación de lluvia-recarga que las cuencas rectangulares, el coeficiente de forma no va a influir en este sentido, ya que se encuentra en un término medio entre ambos tipos de cuencas. Sin embargo, las cuencas de San Pedro y Loa Alto sí que va a influir, retardando el tiempo de concentración, definido como el tiempo que tarda la gota más alejada hidráulicamente a llegar al punto de cierre de la subcuenca, y por tanto retrasando la transformación de la lluvia en recarga.

Subcuenca	Área (km^2)	Perímetro (km^2)	K_G	Forma	Transformación Lluvia-Recarga
Alconcha	267	92	1,6	Oblonga	Media - Lenta
Ollagüe	541	117	1,4	Ovalada	Rápida - Media
Carcote	481	111	1,4	Ovalada	Rápida - Media
Ascotán	1.874	260	1,7	Oblonga	Media - Lenta
San Pedro	1.054	205	1,8	Rectangular	Lenta
Pampa Puno	143	68	1,6	Oblonga	Media - Lenta
Loa Alto	4.534	541	2,3	Rectangular	Lenta
CUENCA	8.894	-	-	-	-

Tabla 5-8. Clasificación de las subcuencas en función del Coeficiente de Gravelius (K_G). Fuente: elaboración propia.

- **Parámetros de relieve**

Son los parámetros de la energía potencial de la cuenca, estableciendo los gradientes gravitatorios. La influencia del relieve sobre el hidrograma es aún más evidente que los parámetros de forma. A una mayor pendiente le corresponde una menor duración de la concentración de aguas de escorrentía en la red de drenaje y afluentes del curso principal, mientras que en cuencas más llanas se favorece la infiltración del agua.

El **relieve de la cuenca** es la diferencia de cota entre el punto más alto de la divisoria de la cuenca y el punto de salida. La cuenca de estudio tiene una cota máxima de 6.164 msnm y una cota mínima de 2.507 msnm, lo que da lugar a un relieve de 3.657 metros. Aparentemente tiene un relieve pronunciado, pero hay que compararlo con la superficie, es decir, obtener la pendiente media (se calcula más adelante). En la **Figura 5-10** se ha representado el mapa de altitudes de la cuenca del Loa Alto, donde destacan las zonas de mayor altitud en colores rojos más intensos, las cuales coinciden con las divisorias de aguas de las diferentes subcuencas. En la **Tabla 5-9** se muestra la altitud máxima y mínima de cada subcuenca y de toda la cuenca, el relieve y la altitud media.

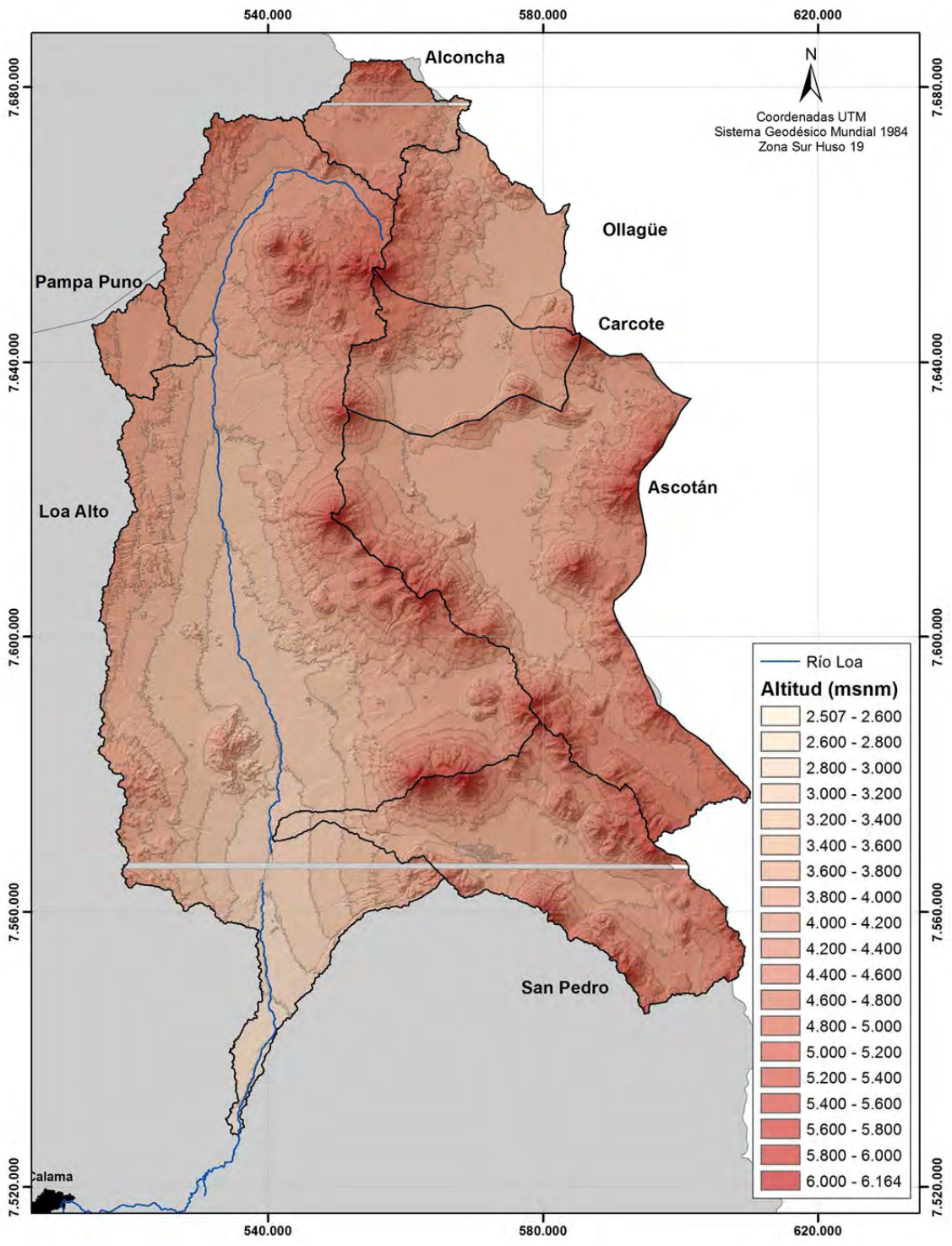


Figura 5-10. Mapa de altitudes de la cuenca del Loa Alto. Fuente: elaboración propia.

Subcuenca	Altitud (msnm)		Relieve (msnm)	Altitud media (msnm)
	Mín	Máx		
Alconcha	3.753	5.425	1.672	4.367
Ollagüe	3.697	6.090	2.393	4.091
Carcote	3.724	6.158	2.434	4.051
Ascotán	3.791	6.037	2.246	4.276
San Pedro	3.015	6.137	3.122	4.317
Pampa Puno	3.725	4.512	787	4.115
Loa Alto	2.507	6.164	3.657	3.845
CUENCA	2.507	6.164	3.657	4.037

Tabla 5-9. Parámetros de relieve de la cuenca del Loa Alto: Altitud máxima, altitud mínima, relieve y altitud media. Fuente: elaboración propia.

Para conocer finalmente cómo influye el rango de altitudes en los estudios hidrológicos, es necesario calcular la **pendiente media**. Si la pendiente es muy elevada, implica que la infiltración en las laderas sea baja, y aumente la escorrentía superficial. Si además se añade una escasa cobertura vegetal, este efecto se verá intensificado.

La cuenca de estudio tiene una pendiente media del 18%, lo que corresponde a una zona moderadamente escarpada, según la Guía para descripción de suelos de la *FAO* (2009) (**Tabla 5-10**). Excepto la subcuenca de Pampa Puno que tiene menor pendiente (12%) y está clasificada como suelo fuertemente inclinado, el resto pertenecen a suelos moderadamente escarpados. Por tanto, debido a la pendiente elevada existente, la infiltración en las laderas será baja. Se puede observar el mapa de clasificación del suelo en función de la pendiente en la **Figura 5-11**. En la **Tabla 5-11** se muestra la pendiente media y la clasificación de cada subcuenca.

Clase	Descripción	Pendiente (%)
1	Plano a muy ligeramente inclinado	0 -2
2	Ligeramente inclinado	2 – 5
3	Inclinado	5 – 10
4	Fuertemente inclinado	10 – 15
5	Moderadamente escarpado	15 – 30
6	Escarpado	30 – 60
7	Muy escarpado	> 60

Tabla 5-10. Clasificación del suelo en función de distintos gradientes de pendiente. Fuente: FAO, 2009.

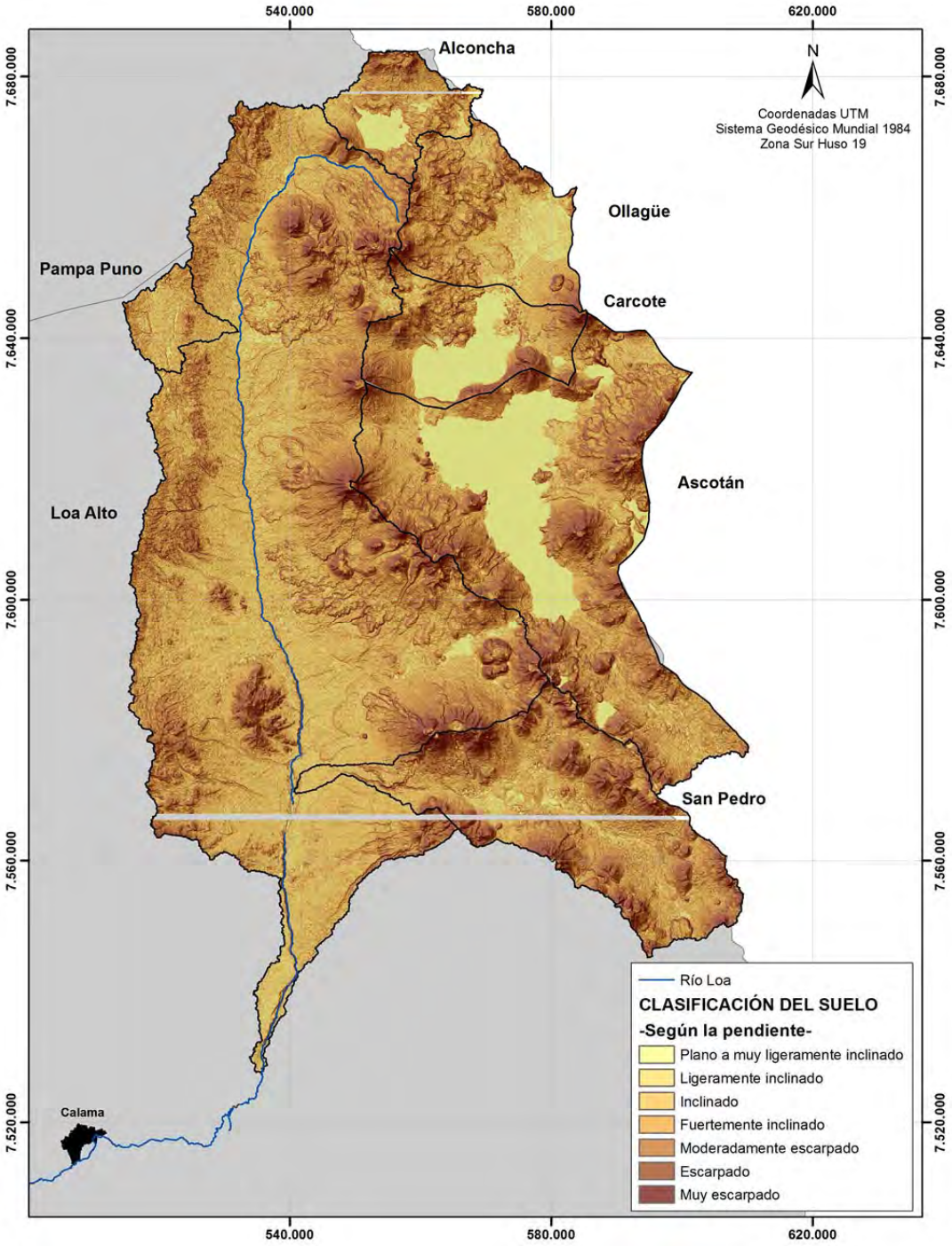


Figura 5-11. Mapa de clasificación del suelo en función de la pendiente de la cuenca del Loa Alto según la Guía de para descripción de suelos de la FAO (2009). Fuente: elaboración propia.

Subcuenca	Pendiente (%)	Descripción
Alconcha	16	Moderadamente escarpado
Ollagüe	16	Moderadamente escarpado
Carcote	16	Moderadamente escarpado
Ascotán	18	Moderadamente escarpado
San Pedro	24	Moderadamente escarpado
Pampa Puno	12	Fuertemente inclinado
Loa Alto	17	Moderadamente escarpado
CUENCA	18	Moderadamente escarpado

Tabla 5-11. Pendiente media de la cuenca y subcuencas del Loa Alto. Fuente: elaboración propia.

- **Parámetros de la red hidrográfica**

Se denomina red hidrográfica al drenaje natural, permanente o temporal, por el que fluyen las aguas de los escurrimientos superficiales o subterráneos. La red hidrográfica se analiza a través de la densidad de drenaje.

La **densidad de drenaje** de una cuenca se define como la relación entre la longitud total de todos los cauces de agua y la superficie total de la cuenca.

$$D = \frac{\sum L_i}{S}$$

Donde: D: densidad de drenaje (km/km^2)
$\sum L_i$: suma de las longitudes de los cursos que se integran en la cuenca (km)
S: Superficie de la cuenca (km^2)

Este parámetro es, en cierto modo, un reflejo de la dinámica de la cuenca, de la estabilidad de la red hidrográfica y del tipo de escorrentía de superficie, así como de la respuesta de la cuenca a una precipitación. Esta respuesta condiciona la forma del hidrograma, más dominante es el flujo en el cauce frente al flujo en ladera, lo que se traduce en un menor tiempo de respuesta de la cuenca, y, por tanto, un menor tiempo al *peak* del hidrograma.

En la **Tabla 5-12** se ha calculado la densidad de drenaje de las subcuencas de la cuenca del Loa Alto. Todas las subcuencas tienen una densidad media entre 0,2 y 0,4 km/km^2. Nos indica por tanto que la cuenca posee una densidad pobre, atendiendo

que a un valor de 0,5 Km/Km^2 correspondería a una densidad de drenaje pobre y 3,5 Km/Km^2 a una densidad de drenaje muy desarrollado.

Subcuenca	Área (km^2)	ΣL_i (km)	D_d (km/km^2)	Clasificación red de drenaje
Alconcha	267	58	0,2	Pobre
Ollagüe	541	164	0,3	Pobre
Carcote	481	133	0,3	Pobre
Ascotán	1.874	389	0,2	Pobre
San Pedro	1.054	315	0,3	Pobre
Pampa Puno	143	39	0,3	Pobre
Loa Alto	4.534	1.814	0,4	Pobre
CUENCA	8.894	2.911	0,3	Pobre

Tabla 5-12. Clasificación de la red de drenaje de la cuenca del Loa Alto en función de su densidad. Fuente: elaboración propia.

En la **Figura 5-12** se muestra el mapa con la red hidrográfica existente en cada subcuenca. Se observa cómo en las cuencas endorreicas de Alconcha, Ollagüe, Carcote y Ascotán, toda el agua que escurre por las laderas desemboca finalmente en la superficie del salar. El resto de subcuencas, tanto Pampa Puno como San Pedro, desembocan directamente en el cauce del río Loa. En el mismo mapa se muestran los nombres de las principales quebradas.

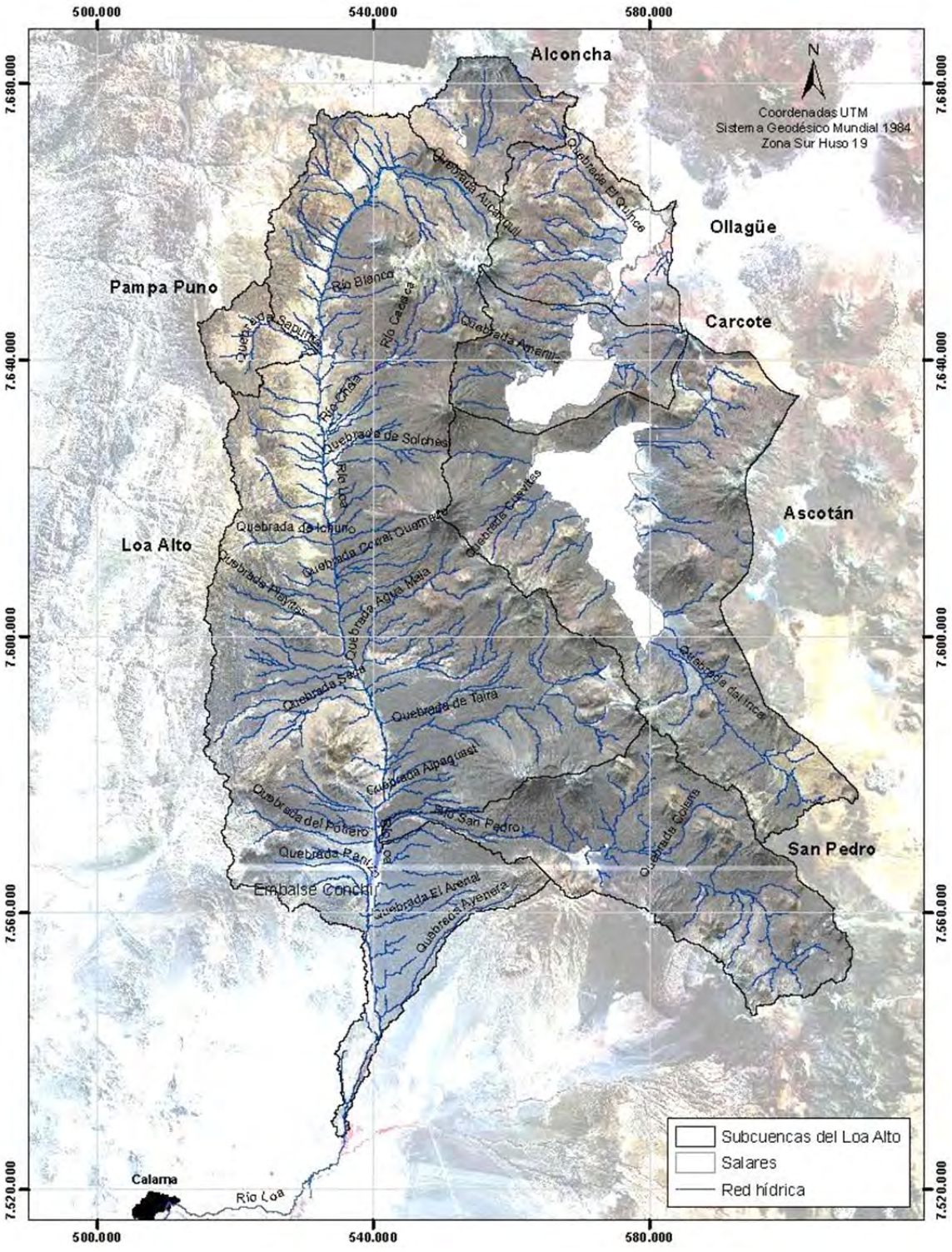


Figura 5-12. Mapa de la red hídrica de la cuenca del Loa Alto. Fuente: elaboración propia.

5.3.2 BALANCE HIDROLÓGICO

El balance hidrológico se plantea a nivel de la cuenca del Loa Alto, con el fin de conocer los caudales que constituyen la escorrentía, que es el recurso renovable de la cuenca. La escorrentía se manifiesta superficial y/o subterráneamente.

En este caso, la escorrentía se genera en las cabeceras de cada una de las subcuencas que la integran, donde la evapotranspiración no es capaz de consumir toda el agua que aporta la precipitación. La escorrentía que se genera ahí, da lugar a los recursos superficiales y subterráneos del valle, los que más abajo pueden ser consumidos por medio de los diferentes usos, o son nuevamente sometidos a evaporación a través de su exposición a la acción de la atmósfera en salares o vegas. Los excedentes de usos y pérdidas naturales finalmente llegan al mar.

La escorrentía constituye el recurso renovable de la cuenca. Por contraste con los recursos renovables, superficiales y subterráneos, también existe un recurso no renovable, almacenado en los acuíferos.

A continuación, se realiza una estimación de la escorrentía renovable mediante la aplicación de un balance hidrológico. Para ello, metodológicamente se ha procedido de la misma manera que el informe de DGA (DGA, 2003), donde se evalúan los recursos hídricos de toda la cuenca del río Loa. El balance se basa en la siguiente ecuación:

Precipitación – Evaporación - Evapotranspiración = Escorrentía total =
Escorrentía Superficial + Escorrentía subterránea renovable

Dicha ecuación no considera fuentes de entrada diferentes a los aportes de la precipitación. Tales fuentes podrían ser aportes subterráneos desde cuencas vecinas, que ocurrirían a través de las cadenas volcánicas que cierran las cuencas endorreicas de los salares de Alconcha, Ollagüe, Carcote y Ascotán. Esta idea se estudiará en la caracterización hidroquímica e isotópica.

Los valores de precipitación, evapotranspiración y evaporación se presentan a continuación.

- **Precipitación**

A partir del análisis realizado en el **Apartado 5.2.1** de la precipitación y del estudio de las características morfológicas de la cuenca del Loa Alto, se obtiene la precipitación aportarte en cada subcuenca. Para ello, en primer lugar se ha dividido cada subcuenca en bandas hipsométricas o rangos de altitudes (cada 200 metros) y se ha obtenido la superficie existente en cada banda y en cada subcuenca (**Tabla 5-13**).

Altitud media (msnm)	Superficie (km^2)							
	Alconcha	Ollagüe	Carcote	Ascotán	San Pedro	Pampa Puno	Loa	CUENCA
2.554	0	0	0	0	0	0	9	9
2.700	0	0	0	0	0	0	63	63
2.900	0	0	0	0	0	0	83	83
3.100	0	0	0	0	17	0	230	247
3.300	0	0	0	0	10	0	550	560
3.500	0	0	0	0	16	0	658	673
3.700	2	172	187	392	49	3	587	1.393
3.900	13	106	94	277	211	16	670	1.387
4.100	23	92	64	256	146	94	564	1.239
4.300	143	63	46	249	172	29	336	1.038
4.500	44	40	30	257	158	1	222	750
4.700	18	30	38	196	113	0	197	592
4.900	9	18	10	118	68	0	127	350
5.100	11	12	5	60	47	0	64	199
5.300	4	4	3	38	29	0	35	112
5.500	0	2	2	21	11	0	21	58
5.700	0	2	1	8	5	0	12	28
5.900	0	2	1	1	3	0	7	13
6.082	0	0	1	0	1	0	1	3
Total	267	541	481	1.874	1.054	143	4.434	8.794

Tabla 5-13. Superficie de cada subcuenca en cada rango de altitudes o banda hipsométrica (cada 200 metros). Fuente: elaboración propia.

La precipitación media en cada rango de altitudes se obtiene a partir del Mapa Digital de Precipitaciones, y para aplicarlo a cada subcuenca se realiza mediante la siguiente expresión:

$$P\left(\frac{l}{s}\right) = P_{Media}\left(mm = \frac{l}{m^2}\right) \cdot Sup\ (km^2) \cdot \frac{1.000.000\ m^2}{1\ km^2} \cdot \frac{1}{\text{año}} \cdot \frac{1\ \text{año}}{365\ días} \cdot \frac{1\ día}{24\ h} \frac{1\ h}{3.600\ s}$$

Donde: $P_{Media\ anual}$: precipitación media asociada a una altitud media

Sup: superficie de cada subcuenca y rango de altitudes, en km^2

En la **Tabla 5-14** se muestra el caudal afluente por precipitación en cada subcuenca y banda hipsométrica y en la cuenca completa del Loa Alto.

Altitud media (msnm)	$P_{Media\ anual}$ (mm)	Precipitación media (m^3/s)							Cuenca
		Alconcha	Ollagüe	Carcote	Ascotán	San Pedro	Pampa Puno	Loa	
2.554	10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2.700	12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00
2.900	23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	0,00
3.100	29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,21	0,02
3.300	58	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	1,01	0,02
3.500	92	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,00	1,92	0,05
3.700	111	0,01	0,61	0,66	1,38	0,17	0,01	2,07	2,84
3.900	135	0,06	0,45	0,40	1,19	0,90	0,07	2,87	3,07
4.100	159	0,12	0,46	0,32	1,29	0,74	0,47	2,84	3,40
4.300	189	0,86	0,38	0,27	1,49	1,03	0,17	2,01	4,21
4.500	200	0,28	0,25	0,19	1,63	1,00	0,00	1,41	3,35
4.700	211	0,12	0,20	0,26	1,31	0,76	0,00	1,32	2,64
4.900	221	0,06	0,12	0,07	0,83	0,48	0,00	0,89	1,56
5.100	225	0,08	0,08	0,03	0,43	0,34	0,00	0,45	0,97
5.300	233	0,03	0,03	0,02	0,28	0,21	0,00	0,26	0,57
5.500	241	0,00	0,02	0,02	0,16	0,09	0,00	0,16	0,28
5.700	243	0,00	0,01	0,01	0,06	0,04	0,00	0,09	0,12
5.900	245	0,00	0,01	0,00	0,01	0,02	0,00	0,05	0,05
6.082	250	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,02
MEDIA	**146**	**1,60**	**2,63**	**2,26**	**10,06**	**5,85**	**0,73**	**17,66**	**23,15**

Tabla 5-14. Precipitación media en cada subcuenca y rango de altitudes o banda hipsométrica (cada 200 metros) y en la salida del Loa Alto (suma de las subcuencas de San Pedro, Pampa Puno y resto del Loa Alto). Fuente: elaboración propia.

- **Evaporación**

Se ha considerado como evaporación únicamente la que se presenta en los salares. No se ha incluido la evaporación desde los cauces, ya que según el informe de DGA (DGA, 2003), que está fundamentado en el estudio de DGA (DGA, 1986), sólo hay evaporación desde los cauces desde Calama hacia aguas abajo, es decir, en los ríos

Salvador y Loa Bajo. Por tanto, no se considera este factor, ya que las zonas donde existe se encuentran fuera del área de estudio.

De este modo, la salida por evaporación corresponde a toda la precipitación que cae en las superficies de los salares de Alconcha, Ollagüe, Carcote y Ascotán. En la **Tabla 5-15** se muestra la evaporación producida por los salares en cada subcuenca.

Altitud media (msnm)	Alconcha		Ollagüe		Carcote		Ascotán	
	Sup (km^2)	EV (m^3/s)	Sup (km^2)	Ev (m^3/s)	Sup (km^2)	EV (m^3/s)	Sup (km^2)	EV (m^3/s)
2.554	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2.700	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2.900	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3.100	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3.300	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3.500	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3.700	0,00	0,00	47,55	**0,17**	115,83	**0,41**	242,33	**0,85**
3.900	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4.100	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4.300	2,74	**0,02**	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4.500	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4.700	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4.900	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5.100	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5.300	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5.500	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5.700	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5.900	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6.082	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Total	2,74	**0,02**	47,55	**0,17**	115,83	**0,41**	242,33	**0,85**

Tabla 5-15. Evaporación producida desde la superficie de los salares en las subcuencas de la cuenca del Loa Alto. Donde “Sup” es superficie y “EV” es evaporación. Fuente: elaboración propia.

- **Evapotranspiración**

La evapotranspiración media se obtiene a partir de la fórmula empírica de Turc, que es función de la temperatura y de la precipitación. Para el cálculo de las área de la evapotranspiración se ha descontado el área de los salares que ha sido utilizada para el cálculo de la evaporación, de esta forma no se cuenta dos veces. Para hallar la

temperatura media se utiliza la ecuación obtenida a partir del análisis de las estaciones de la DGA (**Apartado 5.2.2**) que relaciona la temperatura y la altitud. La precipitación media se obtiene de la **Tabla 5-14** y el factor heliométrico a partir de la temperatura. Calculada la evapotranspiración media en cada rango de altitudes, se aplica a las subcuencas de estudio mediante la siguiente expresión:

$$ETR\left(\frac{l}{s}\right) = ETR\left(mm = \frac{l}{m^2}\right) \cdot Sup\ (km^2) \cdot \frac{1.000.000\ m^2}{1\ km^2} \cdot \frac{1}{\text{año}} \cdot \frac{1\ \text{año}}{365\ días} \cdot \frac{1\ día}{24\ h} \frac{1\ h}{3.600\ s}$$

En la **Tabla 5-16** se observan los valores de la evapotranspiración de las diferentes subcuencas.

Altitud media (msnm)	T (°C)	L	ETR (mm)	Evapotranspiración (m^3/s)							Cuenca
				Alc	Ollagüe	Carcote	Ascotán	S. Pedro	PP	Loa	
2.554	12	669	11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2.700	11	632	13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,03
2.900	10	584	24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	0,06
3.100	8	541	31	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,22	0,24
3.300	7	501	61	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	1,06	1,08
3.500	6	465	95	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,00	1,98	2,03
3.700	5	430	113	0,01	0,45	0,25	0,99	0,18	0,01	2,10	3,99
3.900	4	398	134	0,06	0,45	0,40	1,18	0,89	0,07	2,85	5,89
4.100	3	367	152	0,11	0,44	0,31	1,24	0,71	0,45	2,73	5,99
4.300	1	337	172	0,76	0,34	0,25	1,36	0,93	0,16	1,83	5,63
4.500	0	308	174	0,24	0,22	0,16	1,42	0,87	0,00	1,22	4,14
4.700	-1	279	174	0,10	0,16	0,21	1,08	0,63	0,00	1,09	3,27
4.900	-2	250	170	0,05	0,10	0,05	0,64	0,37	0,00	0,69	1,89
5.100	-3	220	161	0,06	0,06	0,02	0,31	0,24	0,00	0,32	1,02
5.300	-4	188	149	0,02	0,02	0,01	0,18	0,14	0,00	0,16	0,53
5.500	-5	155	132	0,00	0,01	0,01	0,09	0,05	0,00	0,09	0,24
5.700	-7	120	108	0,00	0,01	0,00	0,03	0,02	0,00	0,04	0,10
5.900	-8	81	78	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,02	0,03
6.082	-9	44	43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MEDIA			**133**	**1,40**	**2,26**	**1,70**	**8,50**	**5,10**	**0,70**	**16,49**	36,15

Tabla 5-16. Evapotranspiración natural o real en cada subcuenca de la cuenca del Loa Alto y en toda la cuenca. Fuente: elaboración propia.

- **Balance hidrológico**

A continuación se realiza el balance hidrológico en las subcuencas del Loa Alto y en el punto de cierre. En este punto la escorrentía total de la cuenca del Loa Alto corresponde a la suma de los caudales de las subcuencas de Pampa Puno, San Pedro y resto del Loa Alto, por tener una conexión hidrológica superficial. En las subcuencas endorreicas de los salares se realiza su propio balance. En ambos casos el balance se obtiene mediante la siguiente expresión:

Balance = Precipitación – Evaporación - Evapotranspiración = Escorrentía total

Si el balance es negativo, es decir, la "Precipitación – Evaporación – Evapotranspiración menor a cero", entonces el balance será cero y no se considera negativo (**Tabla 5-17**).

Altitud media msnm	Escorrentía total (m^3/s) = P - EV - ETR							Cuenca
	Alconcha	Ollagüe	Carcote	Ascotán	San Pedro	Pampa Puno	Loa	
2.554	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2.700	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2.900	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3.100	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3.300	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3.500	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3.700	0,0	0,2	0,4	0,4	0,0	0,0	0,0	1,0
3.900	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4.100	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,02	0,1	0,3
4.300	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,02	0,2	0,6
4.500	0,0	0,0	0,0	0,2	0,1	0,0	0,2	0,6
4.700	0,0	0,0	0,0	0,2	0,1	0,0	0,2	0,7
4.900	0,0	0,0	0,0	0,2	0,1	0,0	0,2	0,6
5.100	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,1	0,4
5.300	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,1	0,3
5.500	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,2
5.700	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1
5.900	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1
6.082	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
MEDIA	0,2	0,2	0,2	0,7	0,8	0,04	1,3	**2,1**

Tabla 5-17. Escorrentía total en la cuenca del Loa Alto y en las subcuencas que la conforman. La correspondiente a la salida de la cuenca se obtiene mediante la suma de las subcuencas de San Pedro, Pampa Puno y resto del Loa. Donde: "P" es la precipitación; "EV" es la evaporación y "ETR" es la evapotranspiración natural o real, todos los parámetros en metros cúbicos por segundo. Fuente: elaboración propia.

Para las **subcuencas endorreicas** de los salares, toda el agua de la precipitación que no se evapora va directamente a formar parte de la recarga del salar. Por tanto, la salida del balance hidrológico en las cuencas endorreicas del Loa Alto corresponde a la siguiente expresión:

Recarga = Precipitación – Evaporación - Evapotranspiración

A continuación se van a mostrar los balances para cada cuenca y se van a comparar los valores con los calculados por otros autores.

ALCONCHA

En la **Tabla 5-18** se muestra el balance calculado para la subcuenca de Alconcha correspondiente a la primera columna. En las siguientes columnas se muestran los obtenidos por otros autores. Se ha calculado una recarga de 0,19 m^3/s para la cuenca del salar de Alconcha. SGA (SGA, 2007) muestra en su informe los valores obtenidos por INGEOREC en el año 2007. En el balance 1 se calculó mediante la metodología de Turc y obtuvieron una recarga de 0,04 m^3/s. En el balance 2 lo calcularon mediante Coutange y obtuvieron un valor de 0,09 m^3/s.

Se observan valores diferentes de recarga entre los obtenidos en el presente estudio y el de SGA (SGA, 2007). Estas diferencias pueden ser causa de la delimitación de la subcuenca de Alconcha. Matraz ha obtenido una superficie de 267 Km^2 y SGA (SGA, 2007) una superficie de 133 Km^2. En el informe de SGA (SGA, 2007) no se muestran valores de precipitación, evaporación y evapotranspiración, por lo que no se puede determinar si la diferencia entre los valores de recarga obtenidos están relacionados con el cálculo de estas variables.

Variables	Matraz (2013)	(SGA, 2007) Balance 1	(SGA, 2007) Balance 2
Superficie (km^2)	267	133	133
Precipitación (m^3/s)	1,6	-	-
Evaporación (m^3/s)	0,02	-	-
Evapotranspiración (m^3/s)	1,4	-	-
Recarga (m^3/s)	**0,19**	**0,04**	**0,09**

Tabla 5-18. Salida del balance hidrológico de la subcuenca del salar de Alconcha, equivalente a la recarga. Comparación con otros autores. Fuente: elaboración propia.

OLLAGÜE

En la **Tabla 5-19** se observa el balance calculado para la subcuenca del salar de Ollagüe. Se ha estimado una recarga de 0,2 m^3/s en la cuenca de Ollagüe. Según DICTUC (DICTUC, 2005), la recarga en la corresponde a 0,31 m^3/s.

En la Subcuenca de Ollagüe también se han obtenido diferencias en el valor de la recarga entre la calculada en el presente estudio y el de DICTUC (DICTUC, 2005). Por una parte la superficie calculada por Matraz es de 541 Km^2 y la calculada por DICTUC (DICTUC, 2005) es de 477 Km^2. Pero en el caso de esta subcuenca, la recarga obtenida por Matraz es menor. En el cálculo de la precipitación se observa que la

precipitación calculada en este estudio es mayor, ya que tiene mayor superficie. La principal diferencia se observa en el cálculo de la evapotranspiración. DICTUC (DICTUC, 2005) ha calculado una evaporación de aproximadamente el 85% de la precipitación, y Matraz ha obtenido aproximandamente un 90%. Esto puede ser causado por emplear diferentes estaciones meteorológicas.

Variables	Matraz (2013)	DICTUC (2005)
Superficie (km^2)	541	477
Precipitación (m^3/s)	2,6	2,1
Evaporación (m^3/s)	0,2	1,8
Evapotranspiración (m^3/s)	2,3	-
Recarga (m^3/s)	**0,20**	**0,31**

Tabla 5-19. Salida del balance hidrológico de la subcuenca del salar de Ollagüe, equivalente a la recarga. Comparación con otros autores. Fuente: elaboración propia.

CARCOTE

En la **Tabla 5-20** se muestra el balance estimado para la subcuenca del salar de Carcote. La recarga calculada para esta subcuenca corresponde a 0,16 m^3/s. Según DICTUC (DICTUC, 2005) la recarga es de 0,55 m^3/s.

Se observa una notable diferencia en el cálculo de la recarga de la subcuenca de Carcote entre la obtenida en este estudio y el de DICTUC (DICTUC, 2005). En este caso en el informe de DICTUC (DICTUC, 2005) no se muestra la superficie de la subcuenca, pero al observar la variable precipitación se podría deducir que la subcuenca tiene menor superficie. De la misma forma que en la subcuenca de Ollagüe, se observa que la principal diferencia proviene de la variable evaporación/evapotranspiración. DICTUC (DICTUC, 2005) ha obtenido una evaporación del 60% y Matraz aproximadamente un 90% de la precipitación termina por evaporarse. Por tanto, es probable que la diferencia en el cálculo de la recarga en la subcuenca de Carcote sea por este motivo.

Variables	Matraz (2013)	DICTUC (2005)
Superficie (km^2)	481	-
Precipitación (m^3/s)	2,26	1,40
Evaporación (m^3/s)	0,41	0,85
Evapotranspiración (m^3/s)	1,70	-
Recarga (m^3/s)	**0,16**	**0,55**

Tabla 5-20. Salida del balance hidrológico de la subcuenca del salar de Carcote, equivalente a la recarga. Comparación con otros autores. Fuente: elaboración propia.

ASCOTÁN

La cuenca del Salar de Ascotán es la que tien un volumen mayor antecedentes, por ejemplo MARDONES (Mardones, 1988) realizó su tesis doctoral sobre este salar. Muchos autores se han basado en su tesis para realizar estudios posteriores. En la **Tabla 5-21** se muestra el balance calculado, correspondiente a la primera columna y en las siguientes columnas se muestran los obtenidos por otros autores. Se ha obtenido un balance de 0,71 m^3/s para la cuenca del salar de Ascotán. MARDONES (Mardones, 1998) ha obtenido un valor muy parecido de 0,68 m^3/s. DICTUC (DICTUC, 2005) ha empleado dos metodologías; en el balance 1 obtiene un flujo subterráneo o recarga de 0,89 m^3/s y en el balance 2 considera que todo lo que llueve se evapora, por lo que el balance sería de 0 m^3/s. SCHLUMBERGER (Schlumberger, 2005) ha obtenido una recarga de 0,03 m^3/s.

En los trabajos realizados por el presente estudio, MARDONES (Mardones, 1998) y DICTUC (DICTUC, 2005) se han obtenido valores muy parecidos. La diferencia con *Mardondes (1998)* puede ser causada principalmente por la superficie considerada. Respecto a DICTUC (DICTUC, 2005) no se dispone de los valores de las diferentes variables. SCHLUMBERGER (Schlumberger, 2009) ha obtenido una superficie mucho menor (1.347 Km^2 respecto 1.874 Km^2). Pero por otra parte, la precipitación calculada es muy inferior a la calculada tanto por Matraz como por MARDONES (Mardones, 1998). Por tanto, es probable que las diferencias en el cálculo de la recarga entre Matraz y SCHLUMBERGER (Schlumberger, 2009) sean causadas por la diferencia existente en el cálculo de la variables precipitación.

Variables	Matraz (2013)	Mardones (1998)	DICTUC (2005)	SCHLUMBERGER (2009)
Superficie (km^2)	1.874	1.522	1.522	1.347
Precipitación (m^3/s)	10,1	7,4	-	0,80
Evaporación (m^3/s)	0,9	-	-	0,77
Evapotranspiración (m^3/s)	8,5	6,7	-	-
Recarga (m^3/s)	**0,71**	**0,68**	**0,89**	**0,03**

Tabla 5-21. Salida del balance hidrológico de la subcuenca del salar de Ascotán, equivalente a la recarga. Fuente: elaboración propia.

Las subcuencas de Pampa Puno, San Pedro y resto del Loa son **cuencas exorreicas**, ya que el agua que precipita en ella tiene un punto de salida (punto de desagüe). En este caso el balance no se puede realizar de la misma forma, ya que una porción de la escorrentía total fluye superficialmente y otra parte se infiltra y fluye de forma subterránea.

Para poder cuantificar la cantidad que fluye superficialmente de la que lo hace de forma subterránea se utilizan las estaciones de aforo existentes en la cuenca. Mediante la combinación de estos datos con los usos existentes se podría conocer las proporciones correspondientes.

PAMPA PUNO

En la cuenca de Pampa Puno no se disponen de estaciones de aforo. Por lo tanto no se puede separar el flujo superficial del flujo subterráneo. La escorrentía total calculada es de 0,04 m^3/s (ver **Tabla 5-22**).

Subcuenca	Superficie (km^2)	Escorrentía total (m^3/s)
Pampa Puno	143	0,04

Tabla 5-22. Salida del balance hidrológico de la subcuenca del salar de Ascotán, equivalente a la recarga. Fuente: elaboración propia.

SAN PEDRO

En la **Figura 5-13** se pueden observar cuatro estaciones que pertenecen a la Dirección General de Aguas, tres en la subcuenca de San Pedro y una en la entrada al embalse Conchi.

Tres estaciones se encuentran cercanas al punto de cierre de la subcuenca de San Pedro. La estación "Río San Pedro en Parshall 1" es la que se encuentra más elevada y muestra un caudal medio anual de 0,97 m^3/s. A continuación, la estación "Río San Pedro en Parshall 2" con un caudal de 0,94 m^3/s. Finalmente, en la estación "Río San Pedro en camino Internacional" tiene un caudal de 0,06 m^3/s. Esta disminución se debe principalmente a los derechos de agua concedidos en la subcuenca de San Pedro, donde la escorrentía total está totalmente comprometida con los derechos superficiales y subterráneos ahí constituidos (DGA, 2003) (**Ver Tabla 5-23**).

NOMBRE	WGS 1984, 19 S		Q (m^3/s)
	UTM_Este	UTM_Norte	
RIO SAN PEDRO EN PARSHALL N 1	565.249	7.570.387	0,97
RIO SAN PEDRO EN PARSHALL 2 (Bt. Chilex)	549.933	7.572.703	0,94
RIO SAN PEDRO EN CAMINO INTERNACIONAL	548.015	7.573.694	0,06

Tabla 5-23. Salida del balance hidrológico de la subcuenca del salar de Ascotán, equivalente a la recarga. Fuente: elaboración propia.

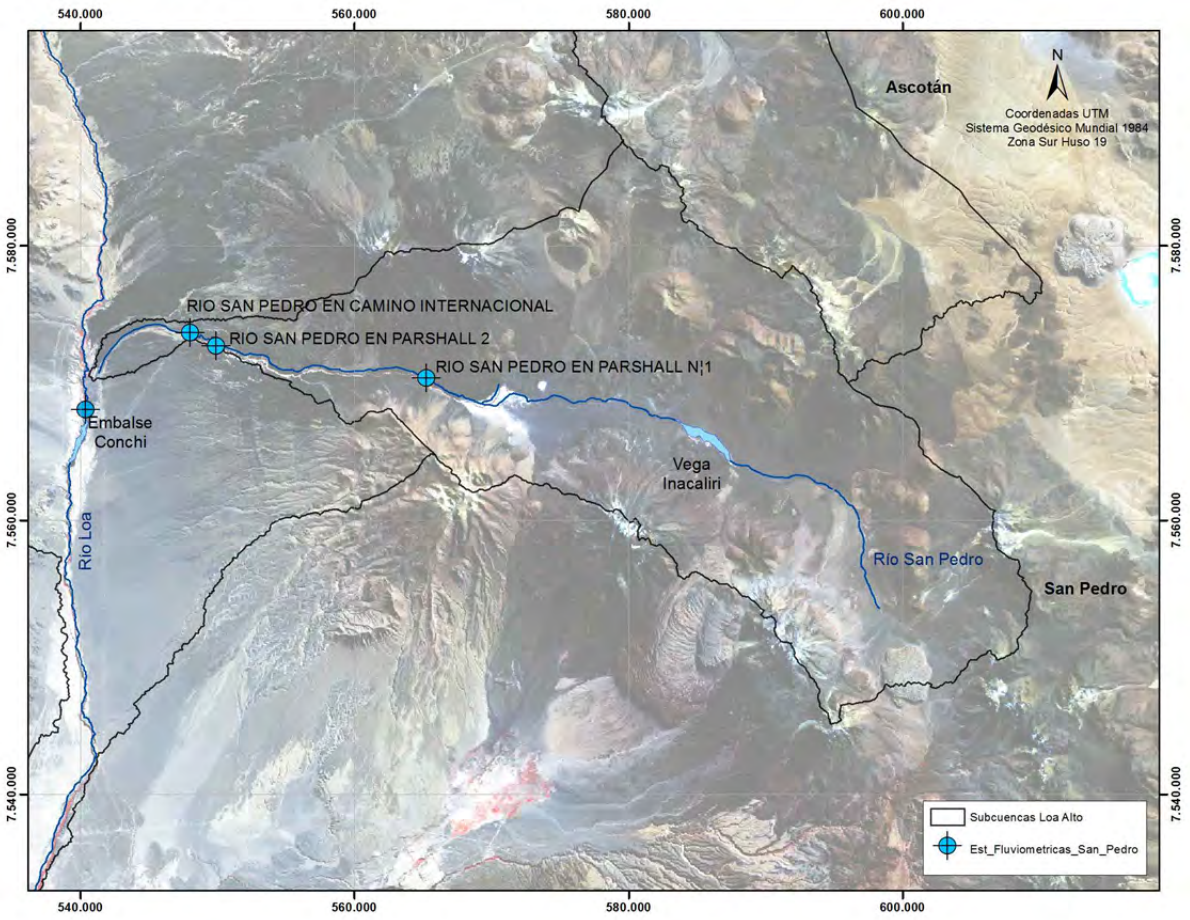


Figura 5-13. Mapa de la localización de estaciones de aforo de la Dirección General de Aguas en la subcuenca de San Pedro. Fuente: elaboración propia.

En la **Tabla 5-24** se compara la escorrentía total calculada en la subcuenca de San Pedro, que es de 0,76 m^3/s. Sin embargo, los caudales aforados en "San Pedro en Parshall 1" y "Parshall 2" muestran valores superiores, de 0,97 m^3/s y 0,94 m^3/s respectivamente.

Superficie (km^2)	1.054
Escorrentía total calculada (m^3/s)	**0,76**
Río San Pedro en Parshall 1 (m^3/s)	0,97
Río San Pedro en Parshall 2 (m^3/s)	0,94
Río San Pedro en Camino Internacional (m^3/s)	0,06

Tabla 5-24. Comparación entre la escorrentía total calculada y las estaciones de aforo en la subcuenca de San Pedro. Fuente: elaboración propia.

RIO LOA

En el caso del Loa existe una similitud con el caso de la cuenca de San Pedro. La escorrentía total en la cuenca del Loa Alto correspondería a la suma de las subcuencas de Pampa Puno, San Pedro y resto del Loa. La escorrentía total suma 2,1 m^3/s. Sin embargo la estación de aforo en el embalse Conchi registra un caudal medio anual de 2,04 m^3/s. El caudal registrado ya incluye las pérdidas por infiltración y por los usos existentes, incluyendo los de la subcuenca de San Pedro, que según DGA (DGA, 2003) no aporta caudal superficial hacia el río Loa (**Tabla 5-25**).

Subcuenca	Área (km^2)	Escorrentía total calculada (m^3/s)	Estación Embalse Conchi (m^3/s)
Pampa Puno	143	0,0	-
San Pedro	1.054	0,8	-
Resto del Loa Alto	4.434	1,3	-
TOTAL	5.632	**2,1**	2,04

Tabla 5-25. Comparación escorrentía total calculada y las estaciones de aforo en la subcuenca de del Loa Alto. Fuente: elaboración propia.

A través de los resultados obtenidos se proponen varias hipótesis:

- La primera se relaciona con una posible sobreestimación de la evapotranspiración. Es posible que la metodología de Turc sobreestime la evapotranspiración y sea necesario mejorarla o realizar mayores trabajos de campo en la zona para poder caracterizarla con mayor precisión.
- También es posible que existan entradas a la cuenca que no se estén considerando y que finalmente contribuyen a la aportación total en la cuenca del Loa Alto. Estos aportes podrían venir tanto de la Sierra Del Medio, de las cuencas de los salares o de otras cuencas vecinas.

5.4 RELACIÓN RÍO LOA – ACUÍFERO

El objetivo que se persigue mediante este análisis es detectar la existencia de aumentos y/o disminuciones de caudales en el río que sean significativos. Si estas variaciones no son causadas únicamente por la recarga de la precipitación en la propia cuenca hidrológica, entonces significa que son reflejo del aporte o descarga que se realiza hacia el acuífero. Fuera de la temporada de lluvias es la época del año en donde las variaciones en los caudales del río se deben a este tipo de interacción río-acuífero.

De este modo se podrían plantear hipótesis preliminares sobre la relación entre los diferentes cuerpos de agua superficial y subterráneo.

Se va a estudiar la relación existente entre los caudales aforados en el río Loa y la precipitación recogida en el área con un determinado punto de cierre. Este análisis se realiza mediante la división en subcuencas hidrológicas y el contraste con la medición del caudal en el punto de cierre. Adicionalmente, se han obtenido relaciones entre los parámetros de la cuenca (superficie, pendiente media, altitud media, longitud red hídrica) y los caudales constituidos a régimen natural. Se realizan dos tipos de análisis: en primer lugar se emplean dos estaciones de aforo de la DGA con datos históricos y en segundo lugar se utilizan seis caudales aforados en la segunda campaña de terreno.

5.4.1 ANÁLISIS CON DOS ESTACIONES FLUVIOMÉTRICAS (DGA)

Se han seleccionado dos estaciones fluviométricas de la DGA, “Río Loa antes represa Lequena” y “Río Loa en Alcantarilla Nº 2”. Se han elegido por tener registros históricos largos y disponer de un periodo en común prolongado, desde el año 1990 hasta el año 2006. En la **Figura 5-14** se puede observar su ubicación y las dos subcuencas generadas que tienen como punto de cierre ambas estaciones. De aquí en adelante, se va a hacer referencia a estas subcuencas como “Subcuenca Lequena” y “Subcuenca Alcantarilla”. También se ha representado el rango de altitudes presente en estas dos subcuencas.

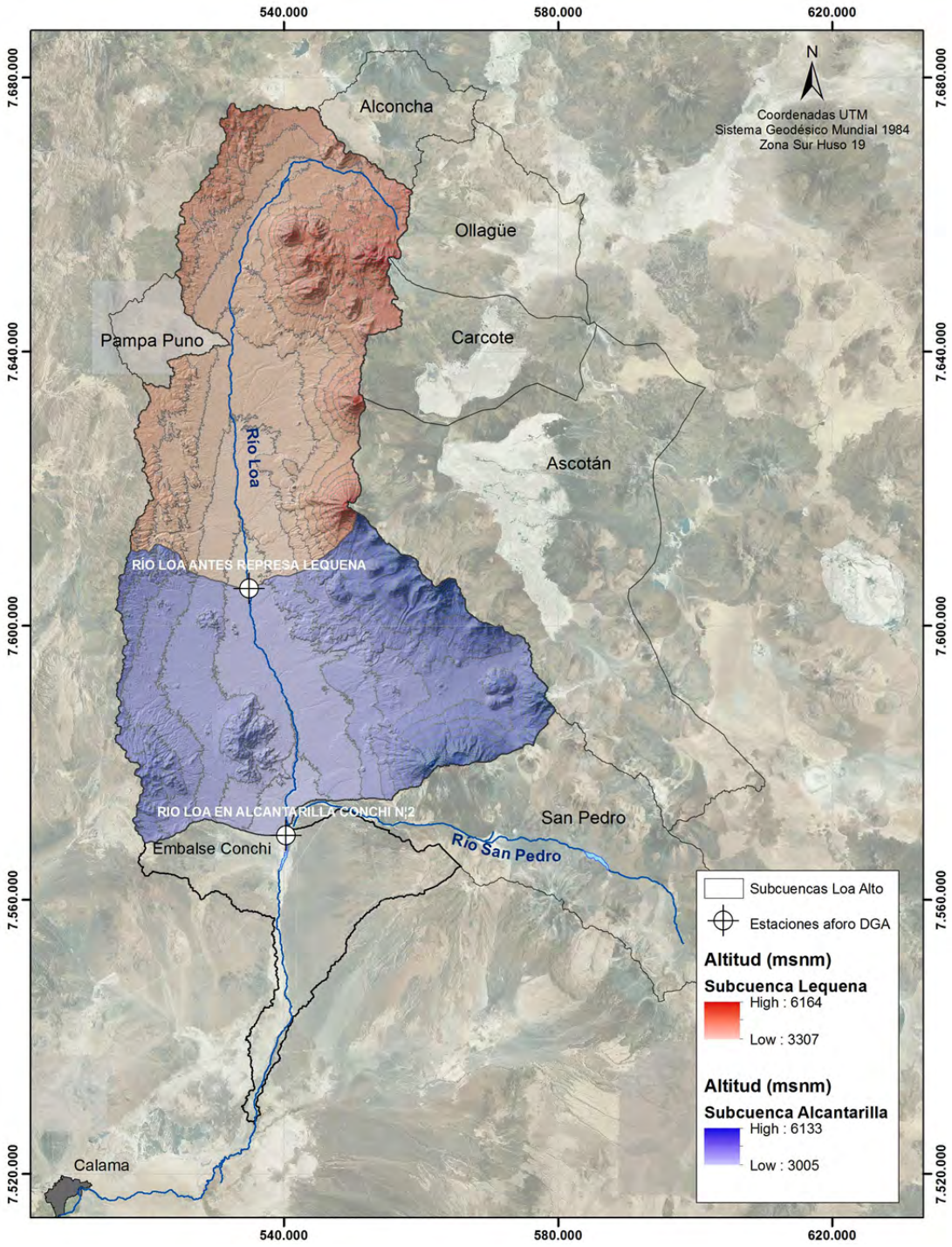


Figura 5-14. Localización de las estaciones fluviométricas de la DGA “Río Loa antes represa Lequena” y “Río Loa en Alcantarilla Nº 2”. Representación del rango de altitudes presente en las subcuencas generadas en estas estaciones. Fuente: elaboración propia.

La metodología para el cálculo de la precipitación que recoge cada subcuenca es la misma que la empleada en el balance hidrológico y se muestra detalla en el **Anexo E-1.**

La precipitación calculada en la subcuenca de Lequena equivale a 9,3 m^3/s y en la Subcuenca Alcantarilla a 7,5 m^3/s.

Para calcular el caudal medio aforado en cada estación fluviométrica de la DGA, se ha considerado el periodo en el que ambas estaciones tienen datos. Este periodo comienza el día 01/01/1990 y finaliza el día 28/03/2006. El caudal medio en la estación de "Río Loa Antes de represa Lequena" es de 0,64 m^3/s. El caudal medio en la estación de "Río Loa en Alcantarilla Nº2" es de 0,60 m^3/s.

Para poder comparar la precipitación con el caudal aforado es necesario incorporar las entradas y salidas de caudal superficial a la subcuenca considerada. De esta forma se obtiene el caudal en régimen natural.

Las únicas entradas superficiales corresponderían a la subcuenca de San Pedro, ya que la estación de "Río Loa en Alcantarilla Nº 2" está situada aguas abajo de la confluencia del río Loa con el Río San Pedro. Estas entradas al cauce del río Loa no se han considerado, ya que el río San Pedro en este punto tiene un caudal superficial prácticamente nulo. Esto se ha corroborado mediante la visita a terreno, y a través del informe de DGA (DGA, 2003) y mediante la revisión de los datos de la estación fluviométrica de "Río San Pedro en Camino Internacional", situada en el río San Pedro antes de la confluencia con el río Loa.

Las salidas superficiales en las subcuencas corresponden a las extracciones antrópicas existentes aguas arriba de la propia estación. Aguas arriba de la estación de "Río Loa antes represa Lequena" no existe ninguna explotación.

Entre la estación "Río Loa antes represa Lequena" y "Río Loa en Alcantarilla Nº2" se localizan dos explotaciones, ambas pertenecientes a la empresa "Aguas Antofagasta". En la **Figura 5-15** se observa en un esquema su localización. La primera, situada inmediatamente después de la estación "Río Loa antes represa Lequena" corresponde a la "Captación Lequena", cuyo caudal asciende a 550 l/s (**Figura 5-16**). A una distancia aproximada de 8 kilómetros aguas arriba de la estación de "Río Loa en Alcantarilla Nº2" se encuentra la "Captación Quinchamale". En este caso el caudal extraído es de 300 l/s (**Figura 5-17**).

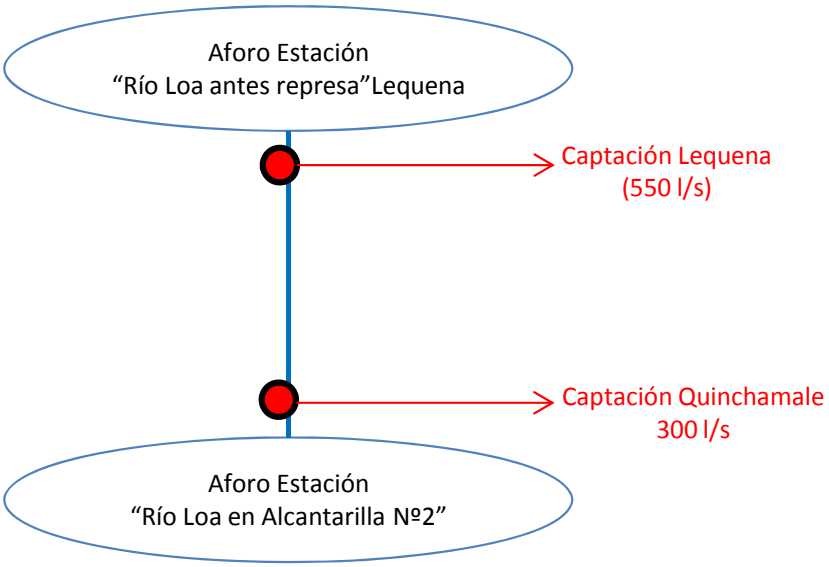


Figura 5-15. Localización esquemática de las explotaciones de la empresa Aguas Antofagasta en la cuenca del Loa Alto. Fuente: elaboración propia.

Figura 5-16. Explotación de "Aguas Antofagasta" en Captación Lequena, aguas arriba de la estación "Río Loa antes represa Lequena",. Fuente: www.elnortero.cl

Figura 5-17. Explotación de "Aguas Antofagasta" en Captación Quinchamale, situada entre la estación fluviométrica de la DGA "Río Loa antes represa Lequena" y "Río Loa en Alcantarilla Nº2". Fuente: elaboración propia.

Con las variables calculadas y recopiladas se realiza el análisis comparativo. En la Subcuenca de Lequena se obtiene el caudal en régimen natural mediante la siguiente expresión:

Caudal Régimen Natural S. Lequena= Caudal aforado en "Lequena"

En la subcuenca de Alcantarilla se tiene que incorporar las captaciones de empresa Aguas Antofagasta:

Caudal Régimen Natural S. Alcantarilla = Caudal aforado en "Alcantarilla" +
Captación Lequena + Captación Quinchamale

Para calcular sólo el caudal que aporta el tramo de la subcuenca Alcantarilla, se resta el caudal aforado en la estación del "Río Loa antes de represa Lequena". Esto es así debido a que la subcuenca de Alcantarilla sólo considera la superficie que se encuentra entre ambas estaciones. Por tanto, hay que restar el caudal aportante aguas arriba de la estación de "Río Loa antes de represa Lequena". La expresión es la siguiente:

Aportación del tramo S. Alcantarilla= Caudal Régimen Natural S. Alcantarilla –
Caudal aforado en "Lequena"

A partir del mapa de altitudes (**Figura 5-10**) se ha obtenido la altitud media de cada subcuenca. La subcuenca Lequena tiene una altitud media de 4.090 msnm y la subcuenca Alcantarilla de 3.797 msnm. A partir del mapa de pendientes (**Figura 5-11**)

se ha obtenido las pendientes medias de cada subcuenca. En la subcuenca de Lequena es del 17% y en la subcuenca de Alcantarilla del 18%.

También se ha calculado la longitud del tramo del río Loa que existe en cada subcuenca. En la subcuenca de Lequena el río Loa tiene una longitud aproximada de 65 kilómetros y en la subcuenca de Alcantarilla es de 43 kilómetros.

En la **Tabla 5-26** se muestra el resumen de las diferentes variables calculadas. Se observa que el caudal medio en régimen natural en la estación de Lequena es de 0,64 m^3/s y en la estación de Alcantarilla, situada aguas abajo, es de 1,45 m^3/s. Por tanto, la subcuenca de Alcantarilla aporta al río Loa con 0,81 m^3/s de media.

Variables	**Subcuencas**	
	Lequena	**Alcantarilla**
$S_{Subcuenca}$ (km^2)	1.911	1.988
$S_{Acumulada}$ (km^2)	1.911	3.900
$P_{Subcuenca}$(m^3/s)	9,29	7,51
$P_{Acumulada}$ (m^3/s)	9,29	16,80
$Q_{Aforado}$ (m^3/s)	0,64	0,60
Captación Lequena (m^3/s)	-	0,55
Captación Quinchamale (m^3/s)	-	0,30
$Q_{Régimen\ Natural}$ (m^3/s)	0,64	1,45
$Q_{Aportación\ Tramo}$ (m^3/s)	0,64	0,81
Altitud media (msnm)	4.090	3.797
Pendiente media (%)	17%	18%
$L_{Tramo\ de\ río}$ (km)	65	43
$L_{Río\ Loa\ acumulado}$ (km)	65	108

Tabla 5-26. Resumen de las variables calculadas para el análisis de caudales de las subcuencas Lequena y Alcantarilla. Donde “S” es superficie, “P” es precipitación, “Q” es caudal y “L” es longitud. Fuente: elaboración propia.

En la **Tabla 5-27** se han obtenido relaciones entre las variables calculadas para encontrar diferencias entre ambas subcuencas. La subcuenca Lequena muestra una relación entre el caudal en régimen natural y la precipitación acumulada de 0,07 y la subcuenca acumulada hasta Alcantarilla de 0,09. Esto significa que la Subcuenca Alcantarilla aporta mayor cantidad de caudal hacia el río Loa. También se ha obtenido la relación entre la aportación del tramo de Alcantarilla y la precipitación en la propia

subcuenca, y ésta asciende a 0,11. Ha aumentado en 0,04 respecto a la subcuenca de Lequena, es decir, un 4%.

La relación entre el caudal aportante del tramo y la superficie de la subcuenca de Lequena es de 0,33 l/s/km^2, lo que equivale a 10,1 mm/año. En la subcuenca Alcantarilla es de 0,41 l/s/km^2, equivalente a 12,5 mm/año También la subcuenca de Alcantarilla muestra mayor aporte de caudal al río Loa respecto a Lequena.

La relación entre el caudal que aporta el tramo por longitud del río es de 9,9 l/s/km en la subcuenca de Lequena y aumenta a 13,5 l/s/km en el tramo acumulado hasta la estación Alcantarilla. También se ha calculado el caudal que aporta el tramo de río sólo de la subcuenca Alcantarilla y el valor asciende a 18,9 l/s/km. Nuevamente se observa el aumento de caudal producido en la subcuenca de Alcantarilla.

Relaciones	**Subcuencas**	
	Lequena	**Alcantarilla**
$Q_{\text{Régimen Natural}} / P_{\text{Acumulada}}$	0,07	0,09
$Q_{\text{Aportación Tramo}} / P_{\text{Subcuenca}}$	0,07	0,11
$Q_{\text{Aportación Tramo}} / S_{\text{Subcuenca}}$ (l/s/km^2)	0,33	0,41
$Q_{\text{Aportación Tramo}} / S_{\text{Subcuenca}}$ (mm/año)	10,1	12,5
$Q_{\text{Régimen Natural}} / L_{\text{Río Loa Acumulado}}$ (l/s/km)	9,9	13,5
$Q_{\text{Aportación Tramo}} / L_{\text{Tramo de río}}$ (l/s/km)	9,9	18,9

Tabla 5-27. Relaciones entre las variables calculadas en las subcuencas Lequena y Alcantarilla. Donde “Q” es caudal, “P” es precipitación, “S” es superficie y “L” es longitud. Fuente: elaboración propia.

En este análisis preliminar se observa que existen diferencias entre la subcuenca de Lequena y la subcuenca de Alcantarilla. Se plantea la posibilidad de que exista mayor aporte desde el acuífero en la Subcuenca de Alcantarilla.

El análisis realizado constituye un “conocimiento preliminar” sobre la parte alta de la cuenca del río Loa, ya que sólo se ha dividido en 2 subcuencas y se han comparado dos puntos de aforo con caudales medios. Por ello, en el apartado siguiente se divide la cuenca en mayor número de subcuencas y se emplean más puntos de aforo.

5.4.2 ANÁLISIS CON AFOROS DE LA CAMPAÑA DE TERRENO “DICIEMBRE 2013”

Se han seleccionado seis puntos donde se han medido los caudales durante la segunda campaña de terreno, en diciembre de 2013. En estos puntos también se ha realizado

muestreo de agua para análisis químico e isotópico. Durante los cuatro días en los que se realizó la medición de los aforos no se produjeron precipitaciones. Por tanto, aunque no se hayan medido los aforos en el mismo momento temporal, la climatología se mantuvo constante y la comparación de los caudales se considera representativa.

Del mismo modo que en el subapartado anterior, se generan subcuencas en los puntos de medición de caudales. El criterio de selección de los puntos de aforo se ha basado en la existencia de muestreo de agua para análisis, con el objetivo de comparar el análisis hidrológico con los resultados del análisis químico e isotópico.

Los puntos de aforo seleccionados (Aforo 4, Aforo 6, Aforo 7, Aforo 8, Aforo 10 y Aforo 11) y las subcuencas generadas (subcuenca A-4, subcuenca A-6, subcuenca A-7, subcuenca A-8, subcuenca A-10 y subcuenca A-11) se pueden observar en la **Figura 5-18**. También se ha representado el rango de altitudes presente.

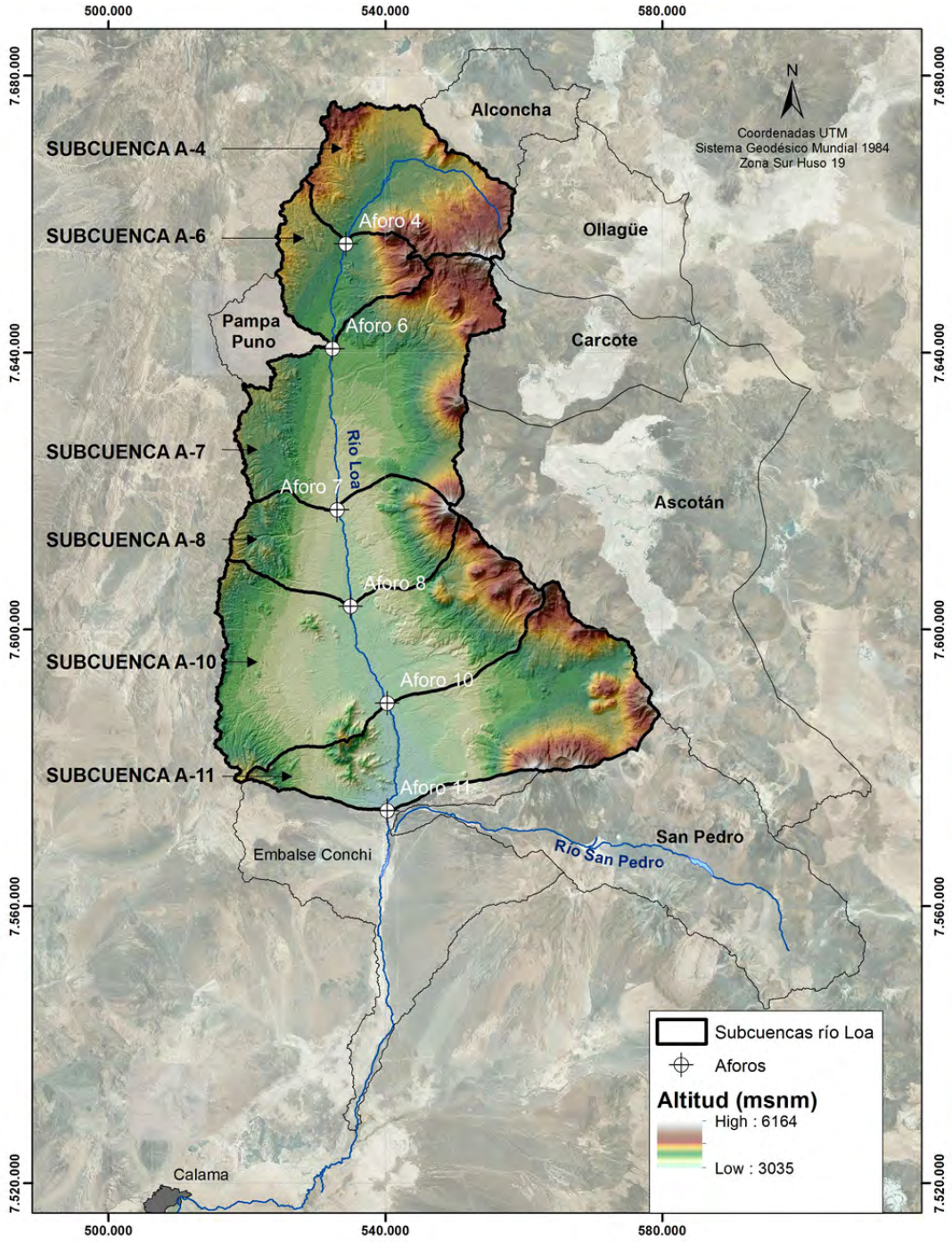


Figura 5-18. Localización de los puntos de aforo seleccionados. Representación del rango de altitudes presente en las subcuencas generadas en estas estaciones. Fuente: elaboración propia.

La metodología para el cálculo de la precipitación que recoge cada subcuenca es la misma que la empleada en el análisis con dos estaciones fluviométricas. Se puede observar el detalle en el **Anexo E-2**.

En la **Tabla 5-28** se muestra el resumen de las variables calculadas para el análisis de las subcuencas generadas a partir de los seis aforos de la segunda campaña de terreno. Del mismo modo que se han calculado las variables en el subapartado 5.4.2, se ha obtenido la superficie de cada subcuenca ($S_{Subcuenca}$) y la superficie acumulada ($S_{Acumulada}$), la precipitación de cada subcuenca ($P_{Subcuenca}$) y la precipitación acumulada ($P_{Acumulada}$) calculada a partir de la precipitación media anual, el caudal aforado en terreno ($Q_{Aforado}$) (**Tabla 3-7**), el caudal en régimen natural ($Q_{Régimen\ Natural}$), el caudal que aporta el tramo del río Loa en cada subcuenca ($Q_{Aportación\ Tramo}$), la altitud media, la pendiente media, la longitud del tramo de río de cada subcuenca ($L_{Tramo\ de\ río}$) y la longitud del río Loa acumulada ($L_{Río\ Loa\ Acumulada}$).

Variables	Subcuencas					
	A-4	**A-6**	**A-7**	**A-8**	**A-10**	**A-11**
$S_{Subcuenca}$ (km^2)	460	262	844	414	920	818
$S_{Acumulada}$ (km^2)	460	721	1.565	1.979	2.898	3.717
$P_{Subcuenca}$ (m^3/s)	2,72	1,35	3,90	1,57	3,32	3,36
$P_{Acumulada}$ (m^3/s)	2,72	4,07	7,98	9,55	12,87	16,23
$Q_{Aforado}$ (m^3/s)	0,29	0,38	0,55	0,02	0,33	0,13
Captación Lequena (m^3/s)	-	-	-	0,55	-	-
Captación Quinchamale (m^3/s)	-	-	-	-	-	0,3
$Q_{Régimen\ Natural}$ (m^3/s)	0,29	0,38	0,55	0,57	0,88	0,98
$Q_{Aportación\ Tramo}$ (m^3/s)	**0,29**	0,09	0,16	0,03	**0,31**	0,10
Altitud media (msnm)	4.407	4.162	4.022	3.781	3.738	3.906
Pendiente media (%)	20%	18%	16%	18%	17%	19%
$L_{Tramo\ de\ río}$ (km)	7	16	25	15	16	17
$L_{Río\ Loa\ Acumulado}$ (km)	7	23	48	63	79	96

Tabla 5-28. Resumen de las variables calculadas para el análisis de caudales de las subcuencas obtenidas con los puntos de aforo seleccionados de la segunda campaña de terreno. Donde "S" es superficie, "P" es precipitación, "Q" es caudal y "L" es longitud. Fuente: elaboración propia.

En la subcuenca A-4 y en la subcuenca A-10 se observa una aportación significativa respecto al resto de subcuencas. La subcuenca A-4 aporta un caudal de 0,29 m^3/s y la

subcuenca A-10 aporta 0,31 m^3/s. Estas magnitudes son notablemente superiores respecto al resto de subcuencas.

Para determinar si el aumento de caudal de la subcuenca A-4 y la subcuenca A-10 es causado por un cambio de pendiente en el cauce, se ha calculado la pendiente del cauce en los puntos de aforo. La pendiente se puede clasificar por intervalos y categorizarla (**Tabla 5-29**).

Pendiente	Tipo de pendiente
<0,1%	Muy baja
0,1%-0,5%	Baja
0,5%-1%	Media
1%-2%	Media-Alta
2%-10%	Alta
>10%	Muy alta

Tabla 5-29. Clasificación de la pendiente de un cauce por intervalos. Fuente: Díaz y Ollero, 2005.

En la **Tabla 5-30** se muestran los valores de altitud de cada aforo, la longitud de tramo de rio en cada subcuenca, la longitud acumulada, la pendiente altitudinal media entre cada punto de aforo, el tipo de pendiente y el caudal en régimen natural. El río Loa nace a una altura aproximada de 3.926 msnm. Desde su nacimiento hasta el Aforo 4 tiene una pendiente clasificada como media y un caudal de 0,29 m^3/s. Después de la subcuenca A-10, ésta subcuenca (subcuenca A-4) es la que mayor caudal aporta hacia el río Loa. En la segunda campaña de terreno se observó que antes del Aforo 4 se encuentra la quebrada Paco Paco (**Figura 5—19**). Aguas arriba de la quebrada Paco Paco el cauce del río Loa presentaba poco caudal, se realizó aforo y se midió 0,02 m^3/s. También se midió el caudal en la quebrada Paco Paco y se obtuvo un valor de 0,2 m^3/s (**Tabla 3-7**). Por tanto, prácticamente todo el caudal medido en el Aforo 4 proviene de la quebrada Paco Paco. Dada la importancia que representa esta quebrada en la aportación de la subcuenca A-4, también se ha calculado la pendiente media de la quebrada Paco-Paco en la **Tabla 5-30**. En la **Figura 5-18** se ha representado el perfil topográfico del río Loa y de la quebrada Paco Paco.

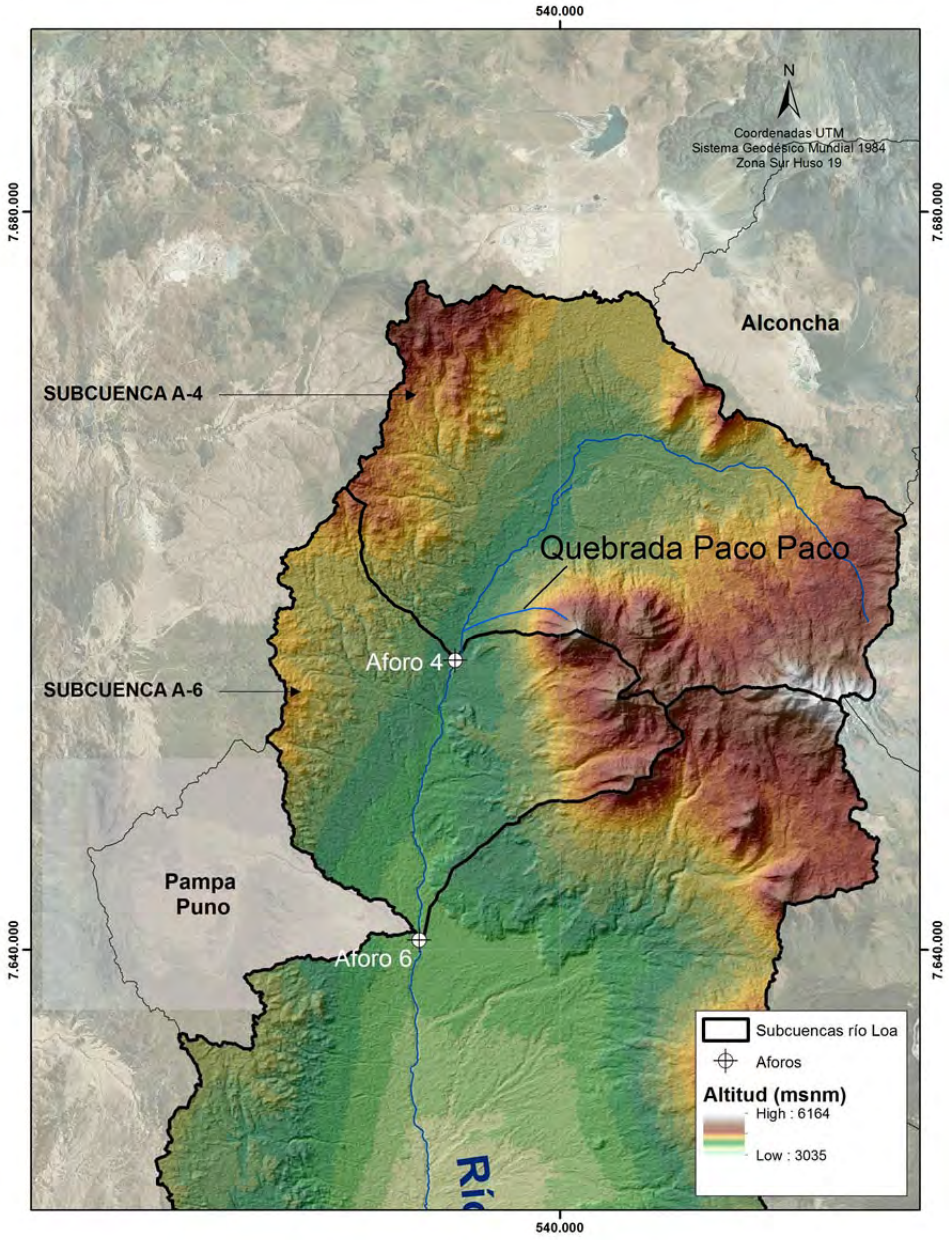


Figura 5-19. Localización de la quebrada Paco Paco en la ubcuenca A-4 del cuenca del Loa Alto. Fuente: elaboración propia.

Cauce	Aforos	Altitud (msnm)	Longitud cauce(m)	Longitud acumulada(m)	Pendiente altitudinal media	Tipo pendiente	Q_{RN} (m^3/s)
Quebrada Paco Paco	Nacimiento Qda. Paco Paco	3.912	0	0	-	-	-
	Aforo Qda. Paco-Paco	3.891	1.012	1.012	2,1%	Alta	0,2
	Confluencia Qda. Paco Paco con río Loa (Aforo 4)	3.882	164	1.176	5,5%	Alta	0,29
Río Loa	Nacimiento Río Loa	3.919	0	0	-	-	-
	Aforo 4	3.882	7.200	7.200	0,51%	Media	0,29
	Aforo 6	3.694	16.201	23.401	1,16%	Media-Alta	0,38
	Aforo 7	3.396	24.722	48.123	1,21%	Media-Alta	0,55
	Aforo 8	3.289	15.149	63.272	0,71%	Media	0,57
	Aforo 10	3.177	16.040	79.312	0,70%	Media	0,88
	Aforo 11	3.039	16.834	96.146	0,82%	Media	0,98

Tabla 5-30. Parámetros para el cálculo del perfil topográfico en los puntos de aforo de la segunda campaña en el río Loa y en la quebrada Paco Paco. Donde "Q_{RN}" es caudal en régimen natural. Fuente: elaboración propia.

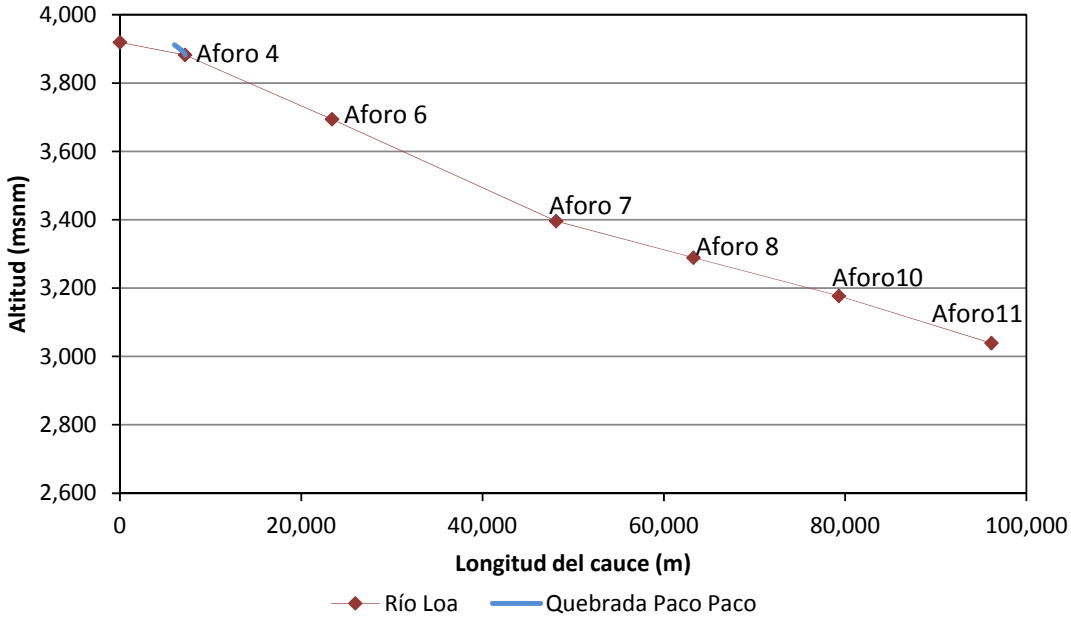


Figura 5-20. Perfil topográfico del río Loa en los puntos de aforo de la segunda campaña de terreno. Fuente: elaboración propia.

Se observa que la quebrada Paco-Paco tiene una pendiente de 2,1% en el primer tramo y de 5,5% en el segundo tramo, ambas pendientes clasificadas como altas. Se ha medido un caudal de 0,2 m^3/s. El caudal elevado puede ser causado por la pendiente alta, que esté provocando un aporte mayor de caudal desde el acuífero hacia la superficie.

Desde el nacimiento del río Loa hasta el Aforo 4 se obtiene una pendiente media (0,51%) y un caudal de 0,29 m^3/s. En el tramo de cauce desde el Aforo 4 hasta el Aforo 6 se produce un aumento de pendiente (1,16%) y ésta se clasifica como media-alta. El caudal aumenta en 0,1 m^3/s. En el tramo siguiente, desde el Aforo 6 hasta el Aforo 7, la pendiente media-alta se mantiene constante (1,21%) y el caudal aumenta en casi 0,2 m^3/s. A continuación se vuelve a producir una disminución de la pendiente (0,71%), en el tramo desde el Aforo 7 al Aforo 8, y la pendiente queda nuevamente clasificada como media. El caudal no cambia prácticamente, sólo aumenta en 0,02 m^3/s. Desde el Aforo 8 hasta el Aforo 10 la pendiente media también se mantiene constante (0,70%) y en este caso se produce un aumento de caudal de 0,3 m^3/s. En el último tramo, desde el Aforo 10 al Aforo 11 la pendiente se mantiene prácticamente constante (0,82%) y sigue clasificada como pendiente media. El caudal aumenta en 0,1 m^3/s.

Mediante el análisis del perf topográfico del río Loa se ha observado que en el tramo de cauce de la subcuenca A-10 no se produce un cambio significativo de pendiente que pueda explicar el aumento del caudal en régimen natural existente.

En la **Tabla 5-31** se analizan las relaciones entre las diferentes variables de las subcuencas. Se observa que al relacionar las variables acumuladas en cada subcuenca (Caudal en régimen natural/Precipitación acumulada, Caudal régimen natural/Superficie acumulada, Caudal en régimen natural/Longitud río Loa Acumulado) se aprecia una tendencia diferente en la subcuenca A-10. Se observa una tendencia de disminución de la aportación al río Loa desde la cabecera de la cuenca hacia aguas abajo. Pero a la altura de la subcuenca A-10 se rompe la tendencia y se produce un aumento.

Al analizar las variables de forma independiente en cada subcuenca (Caudal aportación del tramo/Precipitación subcuenca, Caudal aportación tramo/Superficie subcuenca, Caudal aportación tramo/Longitud tramo) se aprecia notablemente que la subcuenca A-10 presenta un comportamiento diferente. Se observa que la tendencia de la cuenca del río Loa es disminuir el aporte de agua al río a medida que disminuye la altitud. Sin embargo, en la Subcuenca A-10 no se cumple esta tendencia, teniendo un aumento de caudal. En la **Figura 5-20** se observa gráficamente esta tendencia.

Relaciones	**Subcuencas**					
	A-4	**A-6**	**A-7**	**A-8**	**A-10**	**A-11**
$Q_{\text{Régimen Natural}} / P_{\text{Acumulada}}$	11%	9%	7%	6%	7%	6%
$Q_{\text{Aportación Tramo}} / P_{\text{Subcuenca}}$	11%	6%	4%	2%	**9%**	3%
$Q_{\text{Régimen Natural}} / S_{\text{Acumulada}}$ (l/s/km^2)	0,64	0,53	0,35	0,29	0,30	0,26
$Q_{\text{Aportación Tramo}} / S_{\text{Subcuenca}}$ (l/s/km^2)	0,64	0,34	0,19	0,06	**0,34**	0,12
$Q_{\text{Régimen Natural}} / L_{\text{Río Loa Acumulado}}$ (l/s/km)	40,69	16,28	11,33	9,02	11,15	10,23
$Q_{\text{Aportación Tramo}} / L_{\text{Tramo de río}}$ (l/s/km)	40,69	5,43	6,63	1,72	**19,51**	5,94

Tabla 5-31. Relaciones entre las variables calculadas en las subcuencas obtenidas con los puntos de aforo seleccionados de la segunda campaña de terreno. Donde “Q” es caudal, “P” es precipitación, “S” es superficie y “L” es longitud. Fuente: elaboración propia.

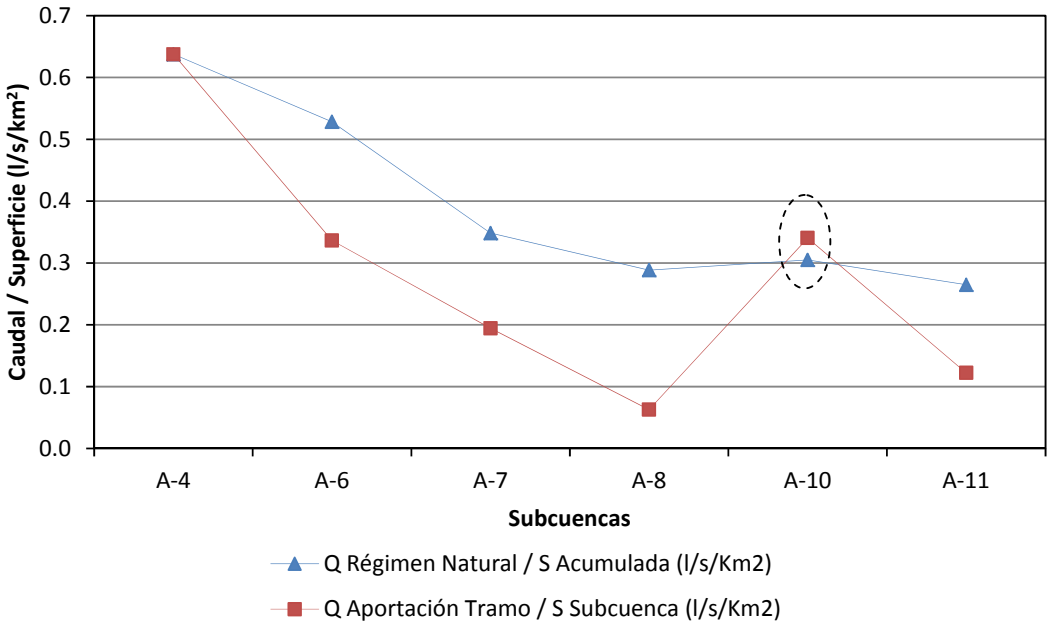


Figura 5-21. Relación del caudal producida por unidad de superficie. Se ha obtenido para el caudal acumulado por subcuencas (serie azul) y la aportación de caudal de cada subcuenca (serie roja). Fuente: elabroación propia.

En resumen, mediante el análisis de la relación existente entre las variables de las diferentes subcuencas se observa una tendencia general de comportamiento del río Loa. La aportación hacia el río Loa disminuye desde la cabecera de la cuenca hacia la parte más baja. Esta tendencia se interrumpe en la subcuenca A-10, en la cual se produce un aumento de caudal de mayor magnitud.

En la **Tabla 5-32** se han calculado coeficientes de correlación entre diferentes variables. Para cada caso se ha comparado la correlación existente entre todas las subcuencas y la correlación excluyendo la subcuenca A-10. El objetivo es corroborar si esta subcuenca tiene un comportamiento diferente y por tanto al excluirla aumenta la correlación entre variables.

Variables comparadas	Coeficiente de Correlación	
	Con todas las subcuencas	Excluyendo Subcuenca A-10
$Q_{Régimen\ Natural}$ vs $S_{Acumulada}$	0,990	0,995
$Q_{Aportación\ Tramo}$ vs Altitud media	0,25	0,86
$Q_{Aportación\ Tramo}$ vs Pendiente media	0,04	0,40

Tabla 5-32. Correlación entre las variables calculadas en las subcuencas obtenidas con los puntos de aforo seleccionados de la segunda campaña de terreno. Donde "Q" es caudal, "P" es precipitación, "S" es superficie y "L" es longitud. Fuente: elaboración propia.

Se observa que el coeficiente más elevado se obtiene de la relación entre el caudal en régimen natural y la superficie acumulada. Esto ocurre ya que en general, cuanto mayor superficie tenga una cuenca mayor cantidad de precipitación va a recoger y por tanto, mayor caudal. En la **Figura 5-19** se observa el aumento del caudal respecto al aumento de superficie, pero no es totalmente proporcional. Si fuese así, el aumento de caudal en la subcuenca A-10 se explicaría mediante un aumento de la superficie.

También se ha obtenido el coeficiente de correlación entre el caudal que aporta el tramo de cada subcuenca y la altitud media. Se obtiene un coeficiente de 0,25 para todas las subcuencas y aumenta a 0,86 al excluir la subcuenca A-10. Para la relación entre el caudal que aporta cada tramo y la pendiente media se ha obtenido un coeficiente de correlación de 0,04 para todas las subcuencas y ha aumentado a 0,4 al excluir la subcuenca A-10.

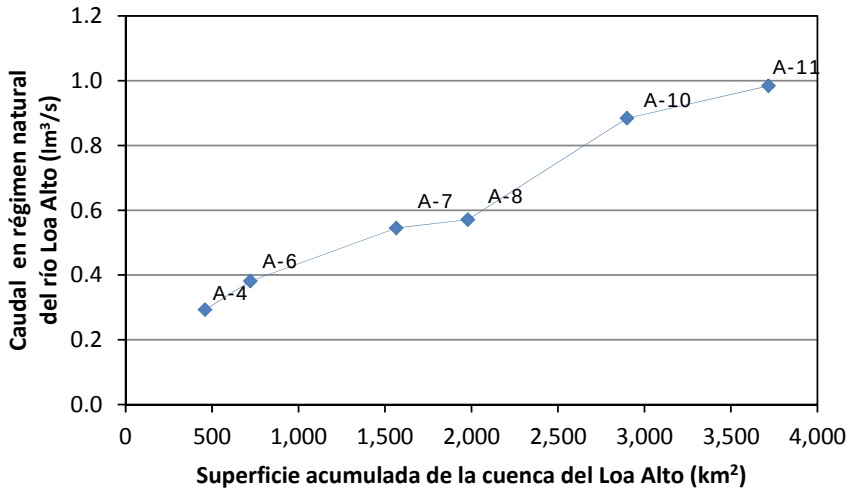


Figura 5-22. Relación entre el caudal del río Loa y la superficie acumulada de la Cuenca del Loa Alto. Fuente: elaboración propia.

A través de este análisis se concluye que la subcuenca A-10 tiene un comportamiento diferente al resto de subcuencas, ya que cuando se excluye, se produce un aumento del coeficiente de correlación.

Se ha observado que la subcuenca A-4 y la subcuenca A-10 producen una aportación hacia el río Loa notablemente superior que el resto de subcuencas. Se ha analizado la pendiente del cauce y se ha observado que la causa del caudal elevado en la subcuenca A-4 puede ser debida a la presencia de la quebrada Paco Paco. Esta quebrada tiene una pendiente elevada. Se establece la hipótesis de un incremento de caudal desde el acuífero hacia la quebrada Paco Paco debido a la pendiente alta existente.

En la subcuenca A-10 se desestima el incremento de caudal causado por un cambio de pendiente en el río Loa. Por tanto, a través del análisis realizado se determina que éste aumento no está relacionado con los parámetros morfológicos de las subcuencas. De este modo, se observa la existencia de un mayor aporte desde el acuífero al río Loa en la subcuenca A-10. Las posibles causas se explican en el modelo conceptual, donde se combina el análisis geológico, hidrológico, hidrogeológico e hidroquímico.

5.4.3 ANÁLISIS CON AFOROS DEL PLAN DE ALERTA TEMPRANA DE PAMPA PUNO

El PAT de Pampa Puno corresponde al programa de control y monitoreo de variables ambientales por la constitución de derechos de explotación de agua por parte de la DGA a Codelco, dentro del proyecto “Suministro, Construcción y Operación Aducción de Agua Pampa Puno” (Res. Nº 2603/2005). Dicho PAT se encuentra en la fase de prebombeo, en el que se caracterizan las condiciones hídricas naturales de la subcuenca de Pampa Puno y del curso del río Loa. De esta forma se podrá ver el posible efecto de la explotación de agua del campo de pozos de Pampa Puno en el sistema hídrico de la subcuenca del Loa Alto. A partir del PAT (Plan de Alerta Temprana) de Pampa Puno descargado del sitio web del SEA (Servicio de Evaluación Ambiental) se obtuvieron los valores de aforos mensuales realizados entre enero de 2005 a mayo de 2007 en 14 puntos del río Loa y 2 en afluentes del Loa (aforos RLA y RLD, ver en **Figura 5-25**).

A partir de los caudales medios aforados y de las extracciones superficiales en Lequena (550 l/s) y Quinchamale (300 l/s) se establece el caudal en régimen

natural promedio con el objetivo de realizar un análisis de la relación río-acuífero a partir de las diferencias de caudal entre las estaciones de aforo consecutivas en el curso del río Loa. De esta forma se identifican los tramos en que el **río** es **ganador** (el acuífero aporta agua al río) y tramos en que el **río** es **perdedor**. Estos incrementos de caudal se comparan con la longitud de cada tramo de río para ver la variación de caudal por unidad de longitud de río y con el gradiente topográfico entre los extremos de cada tramo para ver su relación con la variación de caudal. Los resultados se presentan en la **Tabla 5-33**, la distribución de los puntos de aforo se pueden observar en la **Figura 5-25**.

Para poder estudiar la relación río acuífero del Loa Alto se promediaron los valores de caudal medidos en el río Loa ignorando los aforos realizados durante los meses de invierno altiplánico (Diciembre, Enero, Febrero y Marzo). De esta forma se pretende evitar la medición de incrementos de caudal causados por avenidas torrenciales en parte de las estaciones. La probabilidad de que una avenida torrencial no se mida en todas las estaciones es alta, ya que las mediciones de caudal para un mismo mes varían hasta dos semanas entre ellas.

Puntos	X_UTM	Y_UTM	Z (msnm)	Q Prom (L/s)*	Extr. (L/s)	Q natural (L/s)	ΔQ tramo (L/s)	ΔQ tramo (L/s*km)	Grad. Topo. (‰)
RL-1	534845	7657497	3921	49		49	-	-	-
RLA (afluente)	534809	7656171		197		197	-	-	-
RL-2	534572	7656031	3898	250		250	3	2.2	15
RL-4	532641	7649152	3821	397		397	148	20.7	11
RLB	532709	7644160	3761	432		432	34	7.0	12
RL-6	532653	7641079	3717	414		414	-18	-5.9	14
RLC	532308	7634116	3658	329		329	-85	-12.2	8
RLD (afluente)	534411	7632881		82		82	-	-	-
RLE	533122	7618989	3439	567		567	156	10.3	15
RL-8	534114	7615589	3395	692		692	126	37.4	13
RL-9	534682	7609991	3355	567		567	-126	-22.5	7
RLF	535110	7605667	3320	619		619	53	12.2	8
RL-11	535267	7604491	3307	41	550 (Lequena)	591	-29	-24.3	11
RLG	539327	7592250	3238	296		846	255	20.6	6
RL-12	541101	7576050	3067	371	300 (Quinchamale)	1221	375	23.1	10
RL-13	540494	7569823	3015	547		1397	176	28.5	8

*promedio sin diciembre, enero, febrero y marzo.

Tabla 5-33. Datos aforos promedio entre 2005 y 2007 sin los meses de precipitaciones. Fuente: elaboración propia.

Como se puede observar en la **Figura 5-23** en general el río Loa va aumentando su caudal natural desde su nacimiento (aforo RL-1) hasta su llegada al embalse Conchi (aforo RL-13) de 49 a casi 1400 l/s. Más en detalle se aprecia como el caudal del río disminuye en 3 tramos, como se puede apreciar en los valores de incremento de caudal con signo negativo. Estos valores negativos en el incremento de caudal (río perdedor) del río corresponden a los tramos entre los puntos de aforo RLB y RLC, RL-8 y RL-9, y por último a RLF y RL-11. La pérdida de caudal de mayor magnitud es entre RL-8 y RL-9 con un valor promedio de -126 l/s, mientras que el valor de aumento de caudal mayor es de 375 l/s entre los puntos de aforo RLG y RL-12.

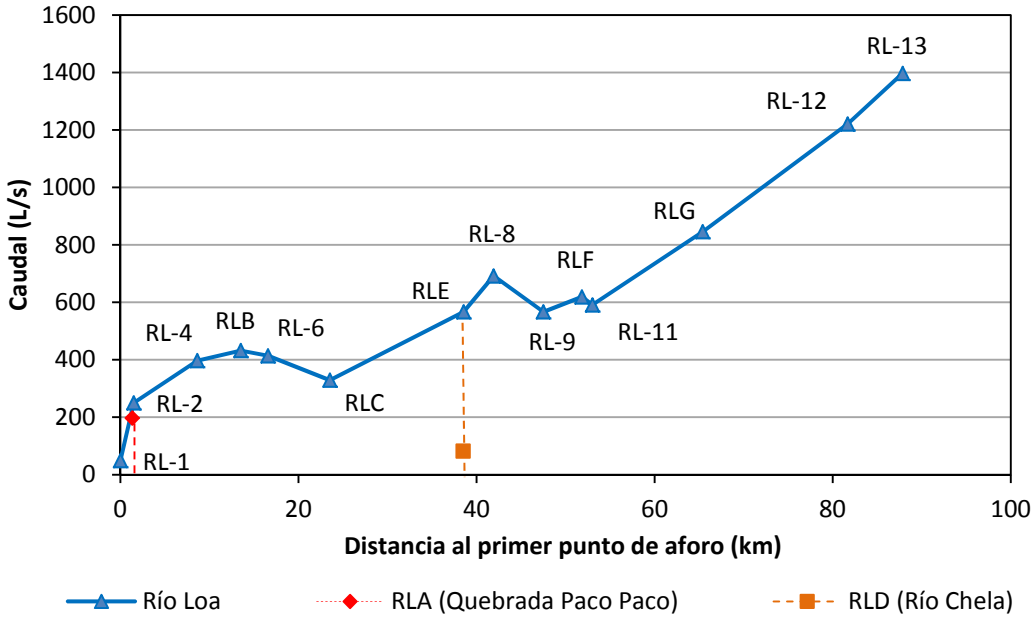


Figura 5-23. Perfil de caudal del río Loa. Fuente: elaboración propia.

Para poder ver las variaciones de caudal por unidad de longitud se han dividido los incrementos de caudal en cada tramo por la distancia entre los puntos de aforo, obteniendo caudal por unidad de longitud (l/s·km), de esta forma se aprecian los tramos con mayor transferencia de caudal entre el curso superficial y el subterráneo (ver **Figura 5-24**). Los valores de transferencia de caudal están comprendidos entre -22,5 a 37,4 l/s·km. Entre los valores positivos el de mayor magnitud es el del primer tramo situado entre RL-1 y RL-2 con un valor de 2,2 l/s, esto es debido a que el incremento de caudal corresponde al aporte superficial del afluente aforado en el punto RLA (Quebrada Paco Paco). Comparando los valores de incremento de caudal por unidad de longitud con el gradiente topográfico expresado en pormilaje no se puede

apreciar una tendencia clara, solamente que en la mayoría de cambios entre tramos de río ganador y río perdedor hay un sensible cambio en la pendiente topográfica.

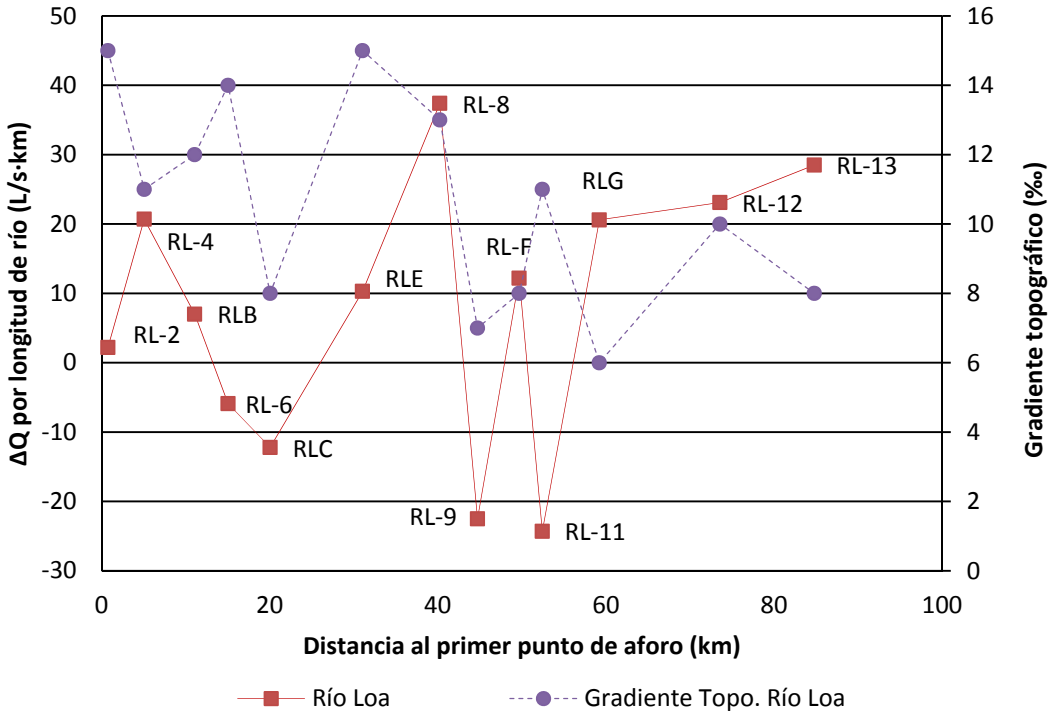


Figura 5-24. Perfil de caudal del río Loa. Fuente: elaboración propia.

En la **Figura 5-25** se presenta el mapa con la distribución de los puntos de aforo, el incremento de caudal y pendiente topográfico en cada tramo. Para resaltar de forma visual los tramos en que el río aporta agua al acuífero (río perdedor) se ha utilizado el color rojo, mientras que en los tramos en que el río recibe agua del acuífero (río ganador) se ha utilizado el color verde. Como se puede ver en la **Figura 5-25** el río Loa hasta su llegada al embalse Conchi va aumentando su caudal, como se observa en la mayoría de su curso representado con trama verde. Los tramos de río perdedor se sitúan aguas arriba de la intersección del río Loa con la Quebrada Sapunta (punto de aforo RLB) y aguas arriba de la intersección del rió Loa y río Chela con un pérdida de caudal de unos 100 l/s. Entre los aforos RL-8 y RL-11 hay una zona en que el río pasa a ser perdedor (-126 l/s), ganador entre RL-9 y RLF (56 l/s) y perdedor (-29 l/s). Este último tramo coincide con la represa Lequena y la extracción de 550 l/s del cauce superficial, el estancamiento del agua en la represa puede ser la causa de la infiltración de los 29 l/s al acuífero, siendo el valor de -29 l/s muy cercano al equilibrio entre el río y el acuífero. Los aumentos de caudal más notables del curso superficial debido a la

descarga del acuífero se sitúan entre los puntos de aforo RL-2 y RL-4 (148 l/s), RLC y RLE (156 l/s), RLE y RL-8 (126 l/s), RL-11 y RLG (255 l/s), RLG y RL-12 (375 l/s) y entre RL-12 y RL-13 (176 l/s). Los incrementos de caudal por unidad de longitud de río tiene en su mayoría valores de pocas decenas de litros por segundo, en los que sobresalen los tramos comprendidos por los puntos RLE y RL-8 (37,4 l/s·km), RL-12 y RL-13 (28,5 l/s·km) y RLG y RL-12 (23,1 l/s·km) (ver **Tabla 5-33**). Este último tramo al tener una distancia de casi 82 km de longitud corresponde con el mayor aumento de caudal con 375 l/s.

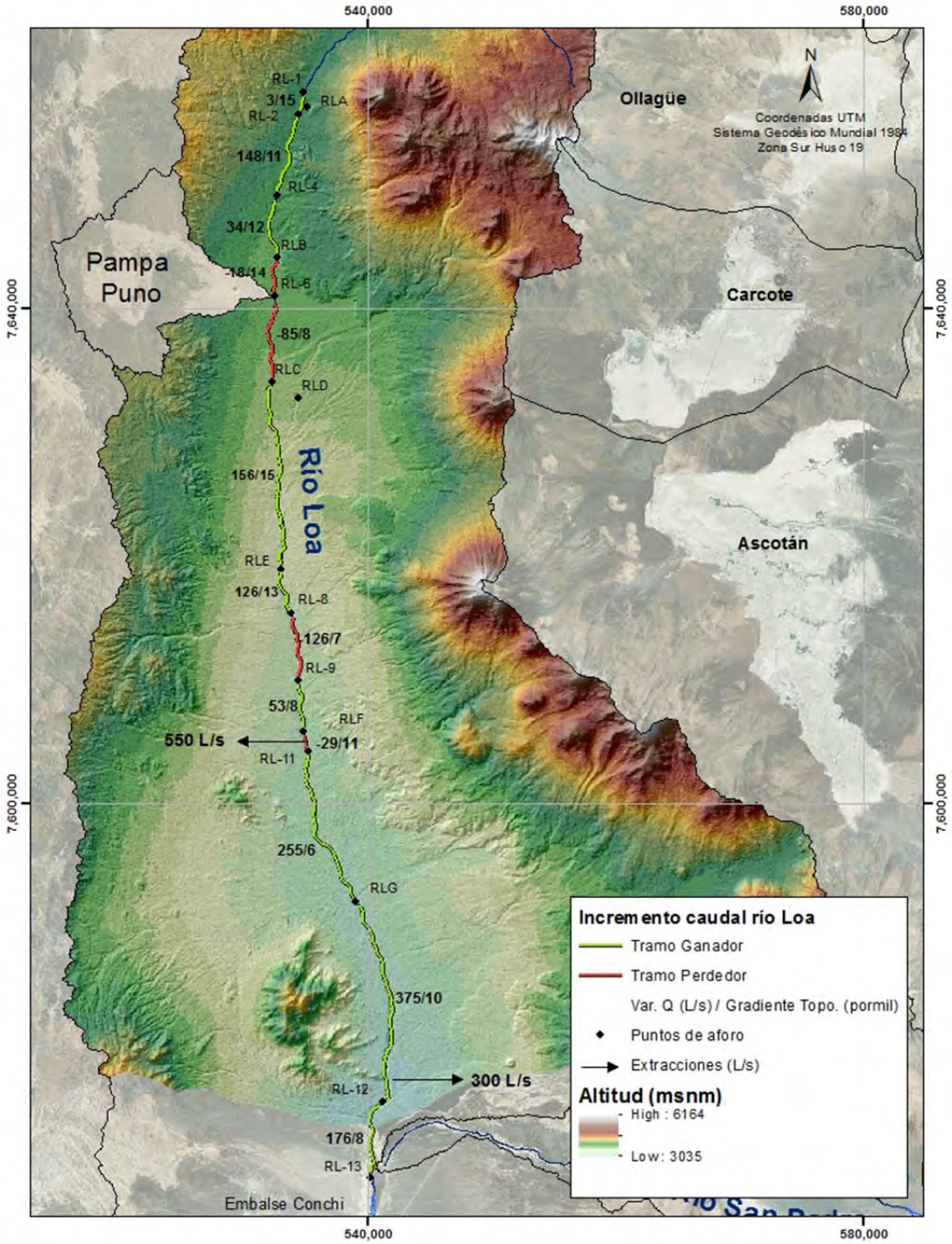


Figura 5-25. Relaciones río-acuífero del río Loa desde su nacimiento hasta su llegada al embalse Conchi. Fuente: elaboración propia.

A modo de resumen se pude concluir que el río Loa va aumentando su caudal base desde su nacimiento hasta el embalse Conchi. Al entrar el río Loa en el embalse Conchi ha tenido un incremento de caudal en régimen natural de 1400 l/s. Los tramos de

pérdida de caudal se pueden deber a componentes estructurales como fallas y a tramos donde el relleno sedimentario del río Loa se ensancha y/o se profundiza.

Este análisis se ha realizado con datos promedios de caudal a partir de datos mensuales entre los años 2005 y 2007 excluyendo los meses de invierno altiplánico, de modo que los valores de relación río-acuífero son representativos de la pluviometría de esas fechas. La relación río-acuífero es variable en función de la pluviometría, ya sea en cantidad anual como en la repartición de esta durante el periodo de lluvias.

6 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA

La caracterización hidrogeológica considera la identificación de las principales unidades acuíferas de las diferentes subcuencas, los mapas básicos con la superficie piezométrica o isofreática de cada subcuenca, así como la caracterización de las propiedades hidráulicas y constantes elásticas como la transmisividad, conductividad hidráulica y almacenamiento de los mismos acuíferos.

La identificación de las diferentes unidades hidrogeológicas es básica para caracterizar los acuíferos. Es necesario conocer la geometría, la formación que constituye la unidad, el grado de confinamiento de cada una de ellas y los parámetros hidráulicos que presentan para identificar el acuífero de mayor transmisividad.

La descripción de las características hidrogeológicas de las unidades de mayor interés se desarrolla a partir de la información de cartas, prospecciones existentes, estratigrafía de sondajes, informes hidrogeológicos asociados a pozos y estudios de aguas subterráneas entre otros.

La información hidrogeológica se despliega por subcuencas que componen la zona de estudio, ya que las unidades hidrogeológicas y las direcciones de flujo son diferentes en cada sistema hidrogeológico. Se describen las siete siguientes subcuencas:

- Salar de Alconcha,
- Salar de Ollagüe,
- Salar de Carcote,
- Salar de Ascotán,
- Pampa Puno,
- San Pedro,
- Río Loa.

En el apartado de generación de equipotenciales se muestran los niveles estáticos y de lámina libre medidos en la primera campaña de terreno realizada en octubre de 2013 y en la segunda campaña realizada en diciembre de 2013.

6.1 SALAR DE ALCONCHA

La subcuenca del salar de Alconcha se ubica en el sector norte de la zona de investigación, entre el salar de Michincha al noreste y el nacimiento del río Loa al sur. El propio depósito salino se encuentra en una depresión rodeada por volcanes del Neógeno, entre los que destacan el volcán Olca (5.245 msnm) y el cerro de Portezuelo (5.582 msnm) al norte, y los cerros Tres Moños (5.365 msnm) y Alconcha (4.834 msnm) al sur. (**Figura 6-1**).

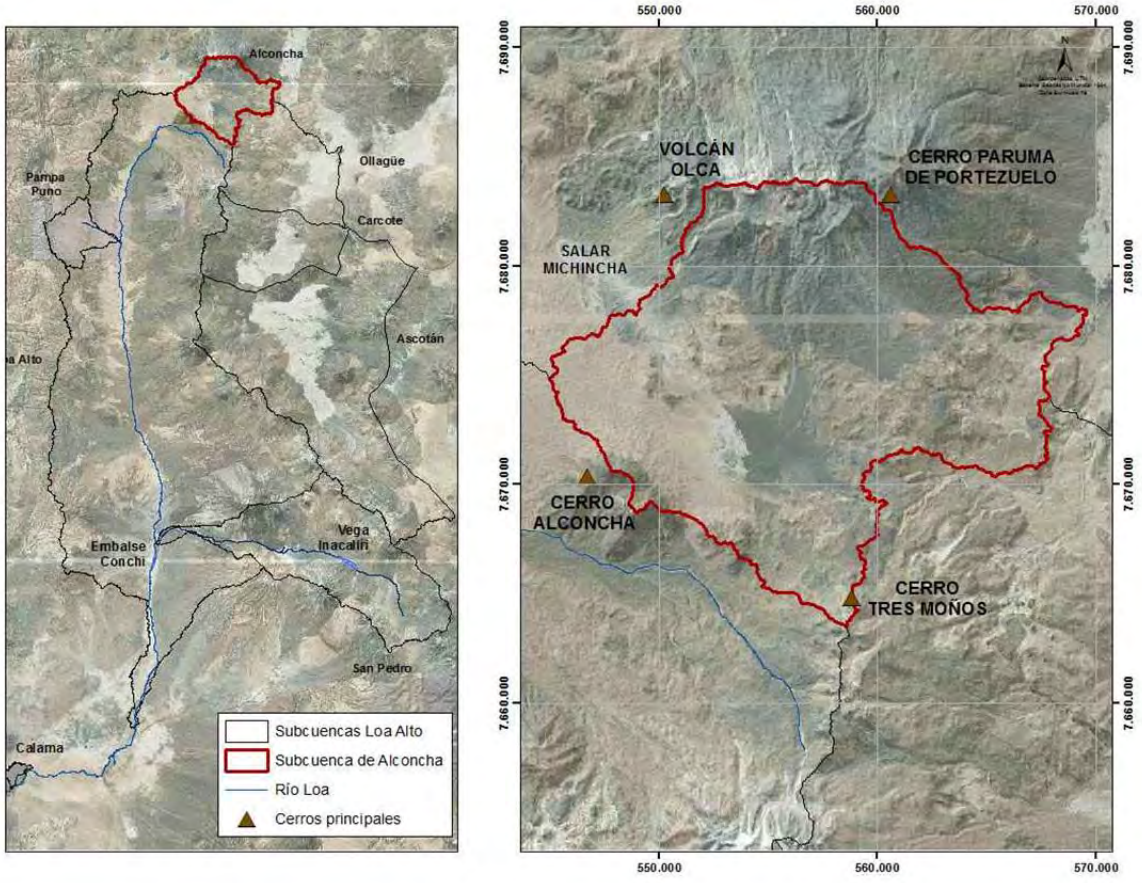


Figura 6-1. Mapa del área de estudio (izquierda) y mapa del salar de Alconcha (derecha). Fuente: elaboración propia.

La información principal para elaborar la caracterización hidrogeológica del salar de Alconcha se ha obtenido de la declaración de impacto ambiental llevado a cabo por la consultora SGA (SGA, 2007) en el proyecto *"Estudio hidrogeológico salar de Alconcha"*. Esta información se ha verificado en la campaña de terreno realizada por Matraz en octubre de 2013.

SGA (SGA, 2007) identifica los acuíferos principales, que corresponden a los depósitos aluviales y a la ignimbrita riolítica dacítica del Mioceno (Ignimbrita Ujina) fracturada.

Existen vertientes en el borde noreste del salar, que nacen en las fracturas de la ignimbrita riolítica dacítica del Mioceno (Ignimbrita Ujina) de las cuales mana agua subterránea, que posteriormente se infiltran en el acuífero.

La piezometría se elabora a partir de la cota del nivel piezométrico registrado por SGA (SGA, 2007) en la campaña de enero de 2007 en los distintos pozos y en los registros anteriores. El mapa piezométrico presenta unas curvas piezométricas que varían entre los 4.105 y 4.115 msnm. Al interpretar la **Figura 6-2** se observa que la dirección del flujo de agua subterránea es de noreste a suroeste, correspondiendo a una circulación desde las vertientes hacia el propio salar.

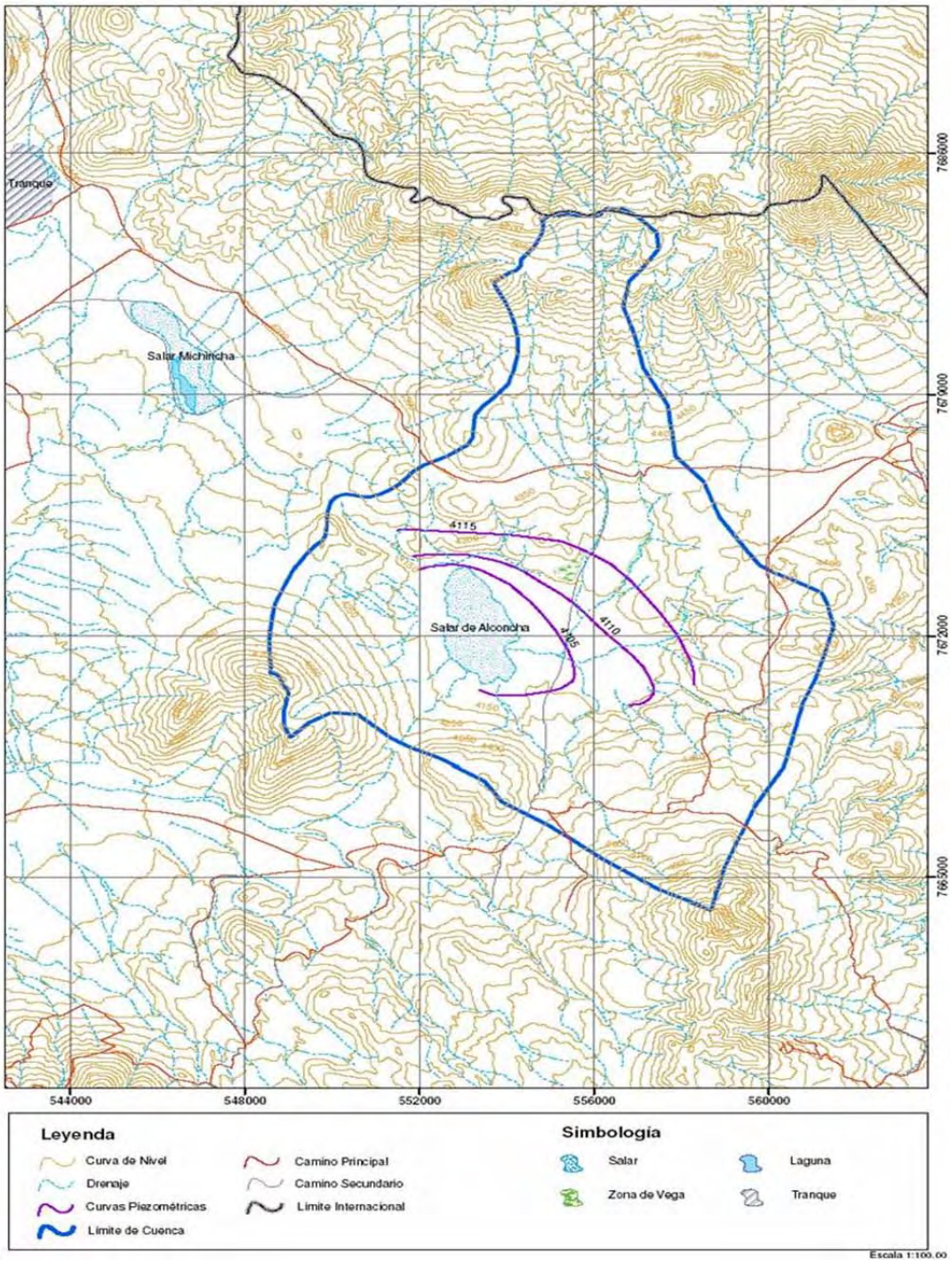


Figura. 6-2. Mapa piezométrico del Salar de Alconcha. Fuente: SGA, 2007.

En la **Figura 6-3** se muestra la ubicación de los pozos en los que se efectuó una serie de test de air lift y pruebas de bombeo de 72 horas en la década de los ochenta en el salar de Alconcha. Los test y pruebas de bombeo fueron realizados por las empresas Hargis and Montgomery y Harshbarger and Asociated, **Tabla 6-1**. Se estiman valores

de transmisividad para el acuífero aluvial entre 30 m^2/d y 1.000 m^2/d y para la ignimbrita miocénica entre 20 m^2/d y 7.000 m^2/d, **Tabla 6-2.** Por desconocimiento de la potencia real del acuífero no es posible la estimación de la conductividad hidráulica del acuífero.

Pozo	Unidad	Tiempo (horas)	Caudal (l/s)	Descenso relativo (m)	Transmisividad (m^2/d)
A1	Ignimbrita Ujina	7	28	1,41	$9,2 \times 10^2$
A2	Ignimbrita Ujina	8	33	1,4	$2,5 \times 10^3$
A4	Depósito Aluvial	12	41	4,3	$1,2 \times 10^3$
	Ignimbrita Ujina				
A5	Depósito Aluvial	12	1,5	74,2	$1,2 \times 10^3$
A7	Depósito Aluvial	12	9	7,7	$1,4 \times 10^2$
	Ignimbrita Ujina				
S8	Ignimbrita Ujina	12	13	8,6	$4,2 \times 10^1$
S10	Depósito Aluvial	12	1,3	10,3	$9,2 \times 10^2$
A12	Depósito Aluvial	12	28	10,8	-
A13	Ignimbrita Ujina	12	17	0,21	$1,4 \times 10^3$
A14	Ignimbrita Ujina	12	15	18,1	$7,0 \times 10^3$

Tabla 6-1. Datos de las pruebas de Air Lift obtenidos del informe de Hargis and Montgomery (1982). Fuente: SGA, 2007.

Unidad Hidrogeológica	Transmisividad (m^2/día)
Depósitos Aluviales	[30-1.000]
Ignimbrita Riolítica Dacítica	[20-7.000]

Tabla 6-2. Valores de transmisividad de las unidades hidrogeológicas de la subcuenca del Salar de Alconcha. Fuente: SGA, 2007.

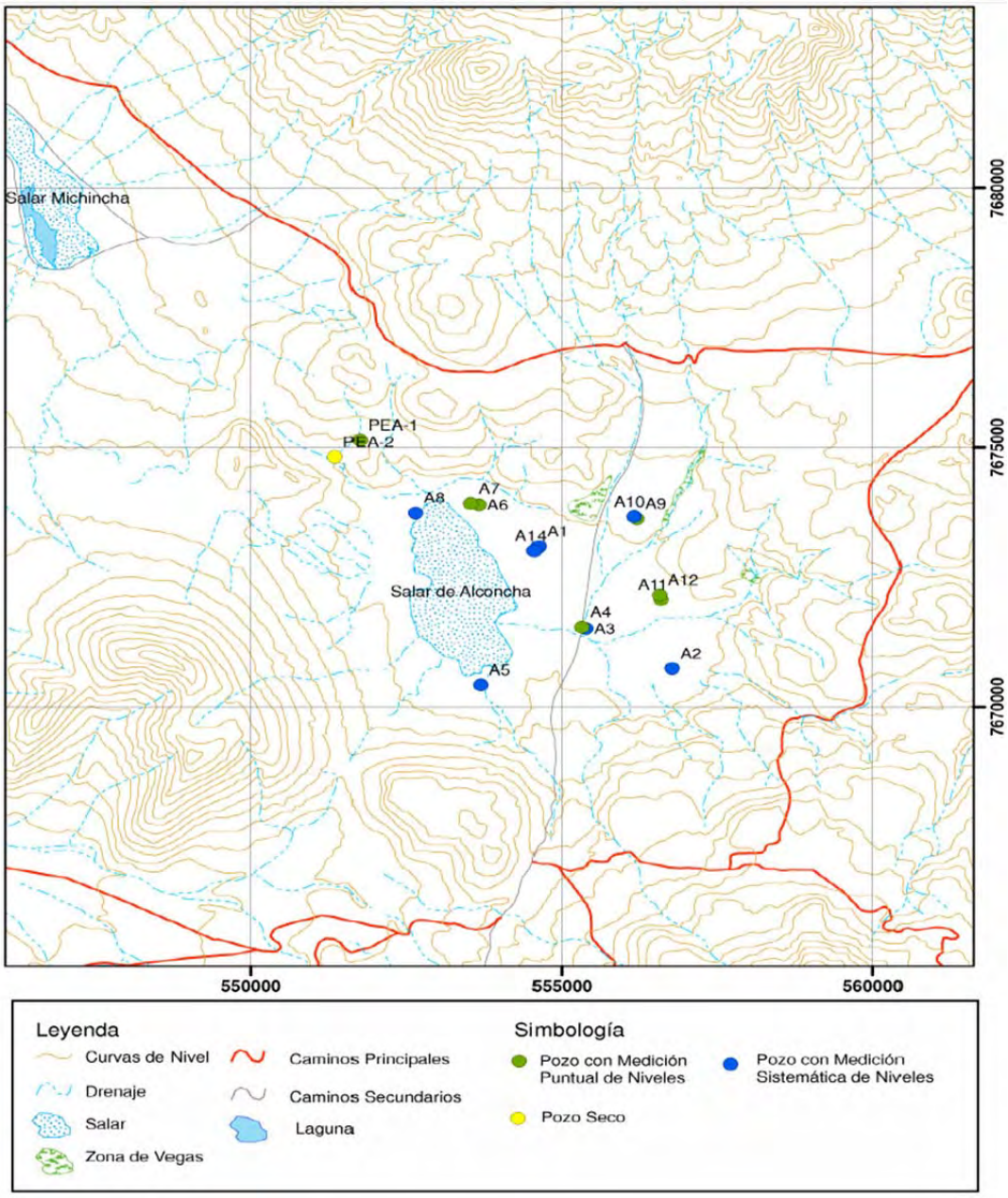


Figura 6-3. Ubicación de los pozos en la subcuenca del Salar de Alconcha. Fuente: SGA, 2007 .

6.2 SALAR DE OLLAGÜE

La subcuenca del salar de Ollagüe limita al norte con el salar boliviano Laguani. Es una subcuenca endorreica limitada por el oeste con el cerro Tres Moños (5.365 msnm) y con el cerro Inca (4.600 msnm),al suroeste con el volcán Aucanquilcha (6.176 msnm) y al sureste con el volcán Ollagüe (5.868 msnm) (**Figura 6-4**).

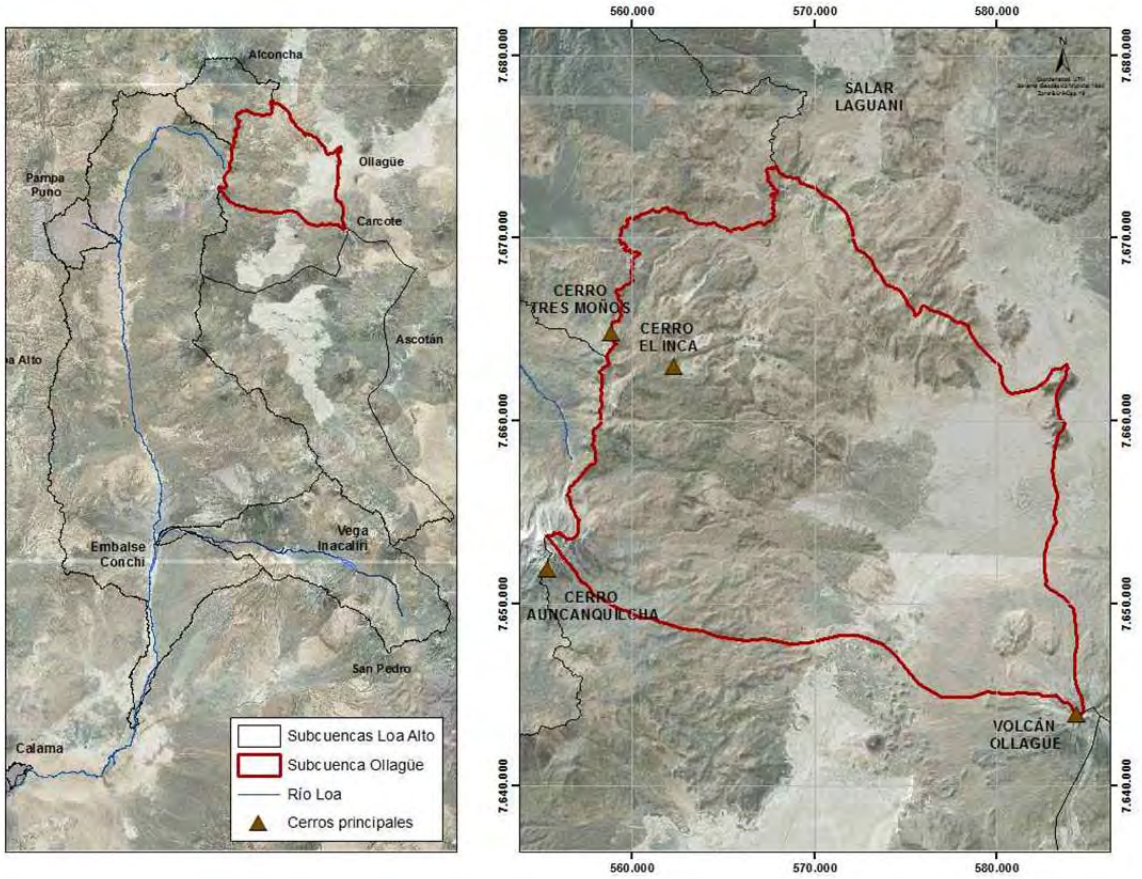


Figura 6-4. Mapa del área de estudio (izquierda) y mapa del salar Ollagüe (derecha). Fuente: elaboración propia.

La subcuenca del salar de Ollagüe de caracteriza hidrogeológicamente a partir de la información obtenida del estudio de DICTUC (DICTUC, 2005).

Las principales unidades hidrogeológicas que constituyen la subcuenca del salar de Ollagüe son las siguientes, **Figura 6-5**:

Unidad sedimentaria: es un relleno sedimentario de origen aluvial y coluvial que hacia el centro del salar se interdigita con los depósitos evaporíticos. Por esta razón la

permeabilidad es mayor en la periferia que en el centro de la cuenca. Los primeros 20 m de esta unidad son sedimentos detríticos de tamaño grava a arena de composición andesítica, dacítica y pumicítica. Este material subyace sobre una capa de rocas dacíticas muy fracturada, cuya potencia varía de 2 m al este a 15 m en el oeste. La base de esta unidad está formada por sedimentos con mayor grado de redondeamiento y algunos tienen composición riolítica. Además, existen intercalaciones de ceniza volcánica.

Unidad ignimbrita: consiste en una ignimbrítica fracturada, compuesta por una toba de cenizas volcánicas y piroclastos de tamaño lapilli y composición andesítica, dacítica y vítrea, pero en profundidad presenta mayor compactación y color blanco rosáceo. Esta unidad se encuentra a 50 m de profundidad y se estima una potencia de 100 m.

Es una unidad acuífera importante por tener una porosidad primaria causada por las vesículas y pómez volcánicas, por la elevada existencia de diaclasas; y una porosidad secundaria por el alto grado de fracturación.

Unidad grava y arenas: a 147 m de profundidad se encuentran areniscas y limos de color claros. Al no alcanzar la base de la unidad en los sondajes, no se conoce su potencia.

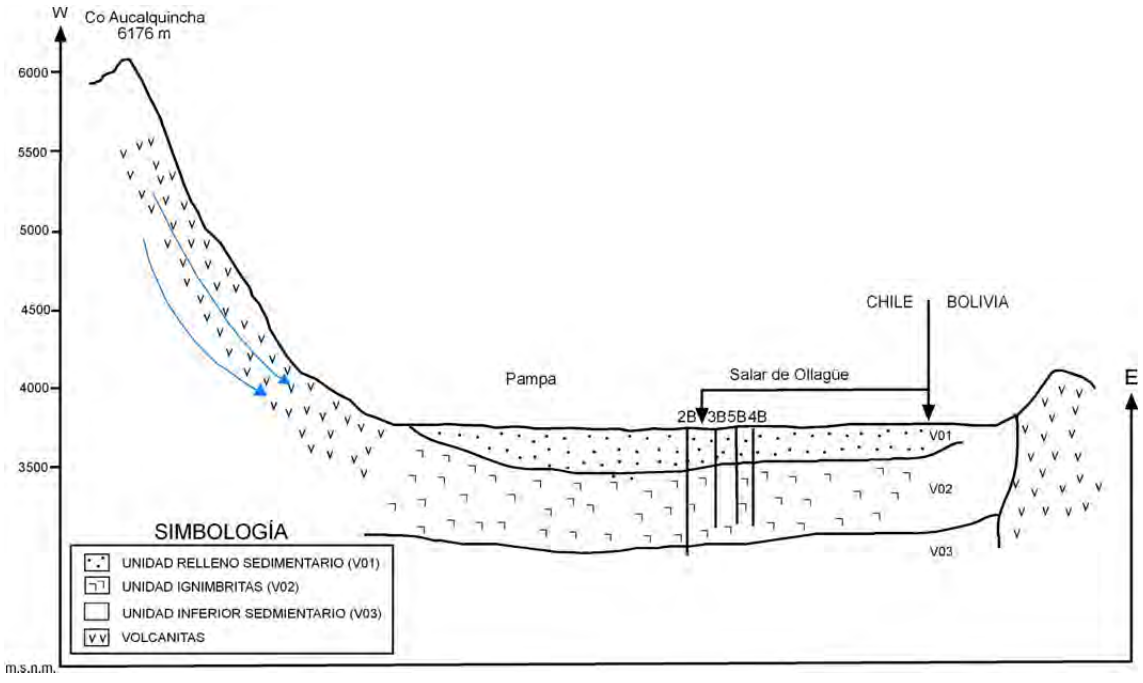


Figura 6-5. Modelo hidrogeológico del salar de Ollagüe. Fuente: DICTUC, 2005.

En la **Figura 6-6** se definen los isoniveles del agua subterránea en el sector suroeste del salar, cuyo valor varía desde 3.695 msnm a 3.690 msnm. La dirección del flujo subterráneo es desde la periferia, es decir en las zonas de recarga por infiltración de la precipitación, hacia el centro del salar, zona de descarga por evaporación.

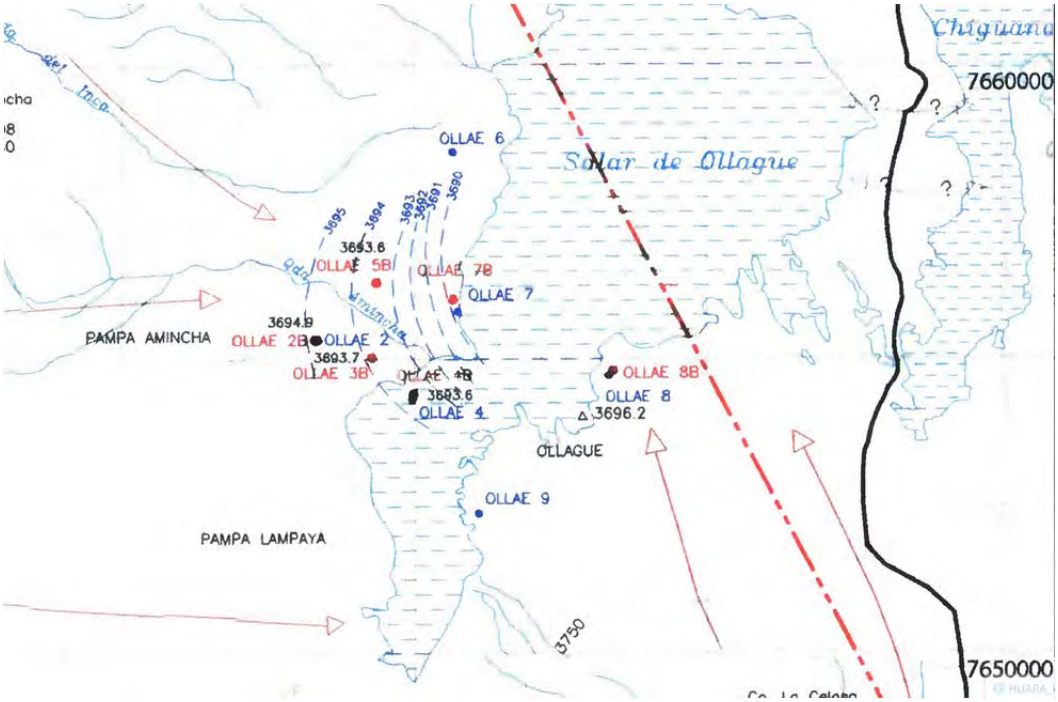


Figura 6-6. Mapa con la ubicación de los pozos y las isolíneas del salar de Ollagüe. Fuente: DICTUC, 2005.

A partir de las pruebas de bombeo realizadas en los sondajes, DICTUC (DICTUC, 2005) se estima una transmisividad entre 3.000 a 8.000 m^2/día, un rendimiento específico de 0,2 en el acuífero sedimentario superior y uno de 0,01 en la unidad de ignimbrita. También se ha calculado un volumen de agua almacenada de aproximadamente 2.200 hm^3, considerando una superficie acuífera de 200 km^2.

En la **Tabla 6-3** se exponen los caudales de agua extraídos en cada prueba de bombeo, el pozo donde se realiza la medición del nivel del agua, el método utilizado para interpretar los datos y los valores estimados de transmisividad y de coeficiente de almacenamiento.

Prueba	Medición	Método	Transmisividad (m^2/día)	Coeficiente almacenamiento corto plazo (%)
Gasto constante (50 l/s)	Bombeo	No analizada	-	-
	Recuperación	Theis	1.083	-
	OLLAE-2	Cooper-Jacob	4.43	4.1 e^{-3}
Gasto constante N°1 (80 l/s)	Bombeo	Cooper-Jacob	1.055,6*	-
	Bombeo	Theis	1.060,9*	-
	Recuperación	Theis Recup.	6.699,1	-
	OLLAE-2	Cooper-Jacob	8.487,2	0,0124
	OLLAE-4	Cooper-Jacob	7.845,2	0,0157
Gasto constante N°2 (60 l/s)	Bombeo	Cooper-Jacob	1.256,7*	-
	Bombeo	Theis	1.153,0*	-
	Recuperación	Theis Recup.	7.233	-
	OLLAE-2	No analizada	-	-
	OLLAE-4	No analizada	-	-
Gasto constante (50 l/s)	Bombeo	Cooper-Jacob	166,4*	-
	Bombeo	Theis	171,2*	-
	Recuperación	Theis Recup.	7.571,0	-
	OLLAE-4	Theis Recup.	7.123,4	-
Gasto constante N°1 (90 l/s)	Bombeo	Cooper-Jacob	3.491,5	-
	Bombeo	Theis	3.531,7	-
	Recuperación	Theis Recup.	3.058,3	-
	OLLAE-4B	No analizada	-	-
	OLLAE-4	No analizada	-	-
	OLLAE.3B	No analizada	-	-
	OLLAE-2B	No analizada	-	-
	OLLAE-2	No analizada	-	-
Gasto constante N°2 (70 l/s)	Bombeo	Cooper-Jacob	3.598,3	-
	Bombeo	Theis	3.704,3	-
	Recuperación	No analizada	-	-
	OLLAE-4B	No analizada	-	-
	OLLAE-4	No analizada	-	-
	OLLAE.3B	No analizada	-	-
	OLLAE-2B	No analizada	-	-
	OLLAE-2	No analizada	-	-
Gasto constante (200 l/s)	Bombeo	No analizada	-	-
	Bombeo	No analizada	-	-
	Recuperación	No analizada	-	-
	OLLAE-7	Cooper-Jacob	13.8	0,00024

* Estos valores de transmisividad no son del todo fiables, ya que están afectados por la pérdida de carga en el pozo de bombeo.

Tabla 6-3. Tabla de los valores de transmisividad y coeficiente de almacenamiento calculados en cada ensayo de bombeo. Fuente: DICTUC, 2005.

6.3 SALAR DE CARCOTE

El salar de Carcote se encuentra en una depresión cuya cota media es 3.660 msnm. Limita al noroeste con el cerro Aucalquincha (6.176m), al oeste con el cerro Puquios (5.044 msnm) y al suroeste con el volcán Chela (5.644 m). Por el noreste limita con volcán Ollagüe y al sureste con cerro Canchacajapichina (4.417 msnm). Este salar posee lagunas, vegas y bofedales que son áreas protegidas: Quincha, Ojos Calientes, Caichape, Laguna de León y Calixto (**Figura 6-7**).

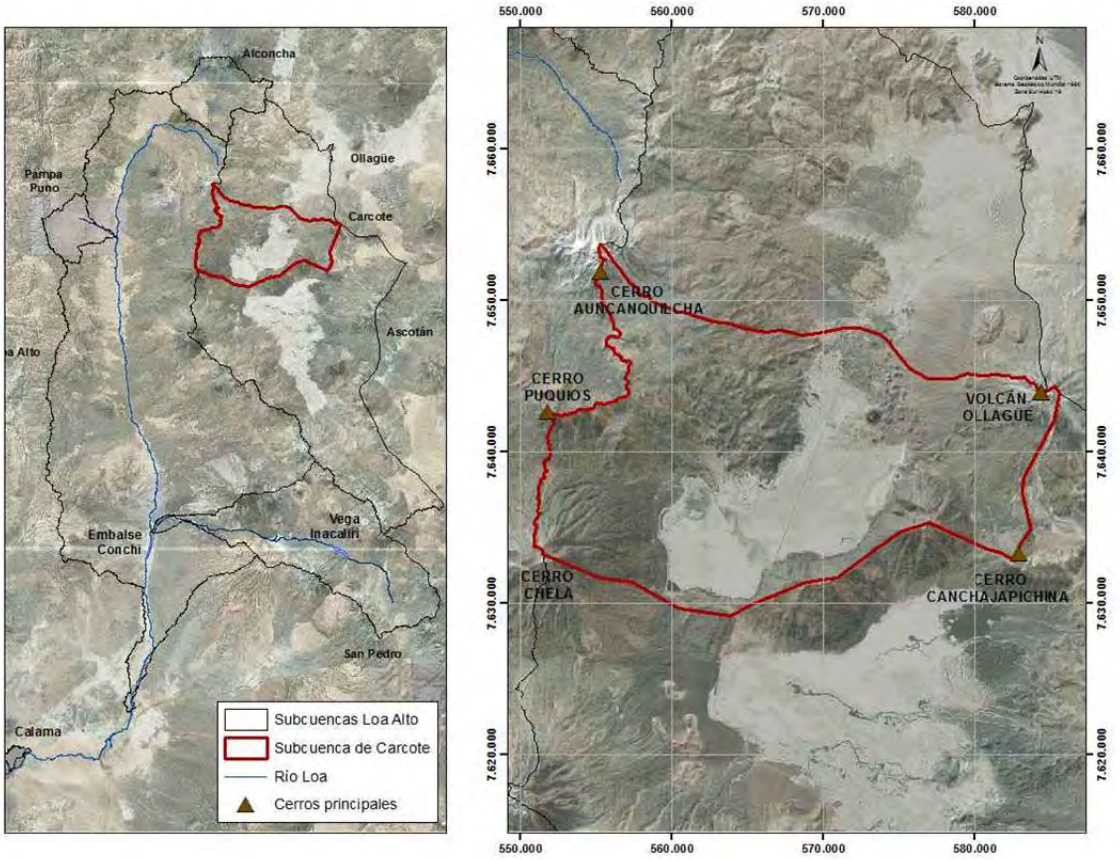


Figura 6-7. Mapa del área de estudio (izquierda) y mapa del salar de Carcote (derecha). Fuente: elaboración propia.

En esta sección se identifican y caracterizan las unidades hidrogeológicas existentes y las curvas isofreáticas del salar de Carcote a partir de la información compilada principalmente del informe de IGSA (IGSA, 2004) y DICTUC (DICTUC, 2005). Las principales unidades hidrogeológicas del salar de Carcote son las siguientes:

Depósitos aluviales y coluviales: constituyen buenos acuíferos alrededor del sector suroeste, entre la Laguna Verde y la Laguna de León. La granulometría de estos

depósitos varía entre arena y grava cerca de la falda del cerro Chela y arena, limo-arcillosa cerca del salar. El límite de esta unidad se engrana con los depósitos evaporíticos del salar. Este acuífero posee una profundidad basal entre unos 60 y 170 m según DICTUC (DICTUC, 2005).

Rocas volcánicas fracturadas: es el acuífero principal del borde norte del salar que recarga las vegas y bofedales de Sapunta, Ojo Caliente y Cuchicha. La capacidad acuífera de esta unidad es debida al alto grado de fracturación secundaria, como por su fracturación primaria local (estructuras columnares, discontinuidades entre flujos de lavas y coladas del tipo bloque).

Depósitos salinos: son niveles evaporíticos y sedimentos finos saturados con salmuera y de espesor promedio de 200 m DICTUC (DICTUC, 2005). Se considera un acuífero libre, cuyo nivel freático se encuentra entre 2 y 0,5 m.

En la **Figura 6-8** las curvas isofreáticas definidas en el sector suroeste de la subcuenca muestran que las líneas de flujo del agua subterránea tienen una dirección radial desde los depósitos aluviales de agua dulce hacia los depósitos salinos del salar de Carcote, estos depósitos son recargados por la infiltración de la precipitación y descargan el agua subterránea al resto del sistema de la subcuenca. Si se observa la relación entre el salar de Ascotán y de Carcote, existe un flujo de agua subterránea desde el sector noreste de la cuenca de Ascotán hacia el borde sur-oeste del salar de Carcote, correspondiente a 15 l/s (Mardones, 1998).

Los únicos antecedentes existentes de pruebas de bombeo son unos ensayos realizados en unas calicatas de 2,5 m de profundidad según DGA (DGA, 2012), donde se obtuvieron unos valores de transmisividad de 150 y 300 m^2/d, **Tabla 6-4** (primera campaña) y **Tabla 6-5** (segunda campaña). Sin embargo, IGSA (IGSA, 2004) y DICTUC (DICTUC, 2005) estiman que el acuífero aluvial del suroeste del salar de Carcote presenta las mismas constantes elásticas que la unidad del borde occidental del salar de Ascotán.

Calicata	Theis		Cooper-Jaboc		Recup. Theis -Jacob	
	T (m^2/d)	K(m/d)	T (m^2/d)	K (m/d)	T (m^2/d)	K(m/d)
A (Obs)	175,8	58,6	114,1	38,0	364,6	121,5
1b (Obs)	440,6	146,9	587,5	195,8	400,9	133,6
1 (bombeo)	415,6	138,5	609,1	203,0	475,2	158,4

Tabla 6-4. Datos prueba de bombeo en las calicatas en Carcote. Fuente: DICTUC, 2005.

Calicata	Theis		Cooper-Jaboc		Recup. Theis -Jacob	
	T (m^2/d)	K(m/d)	T (m^2/d)	K (m/d)	T (m^2/d)	K(m/d)
M (Obs)	295,9	98,6	2246	74,9	279,5	93,2
1M(Obs)	946,1	315,4	989,3	329,8	-	-
2M (bombeo)	-	-	-	-	-	-

Tabla 6-5. Datos obtenidos en la segunda prueba de bombeo en las calicatas en Carcote. Fuente: DICTUC, 2005.

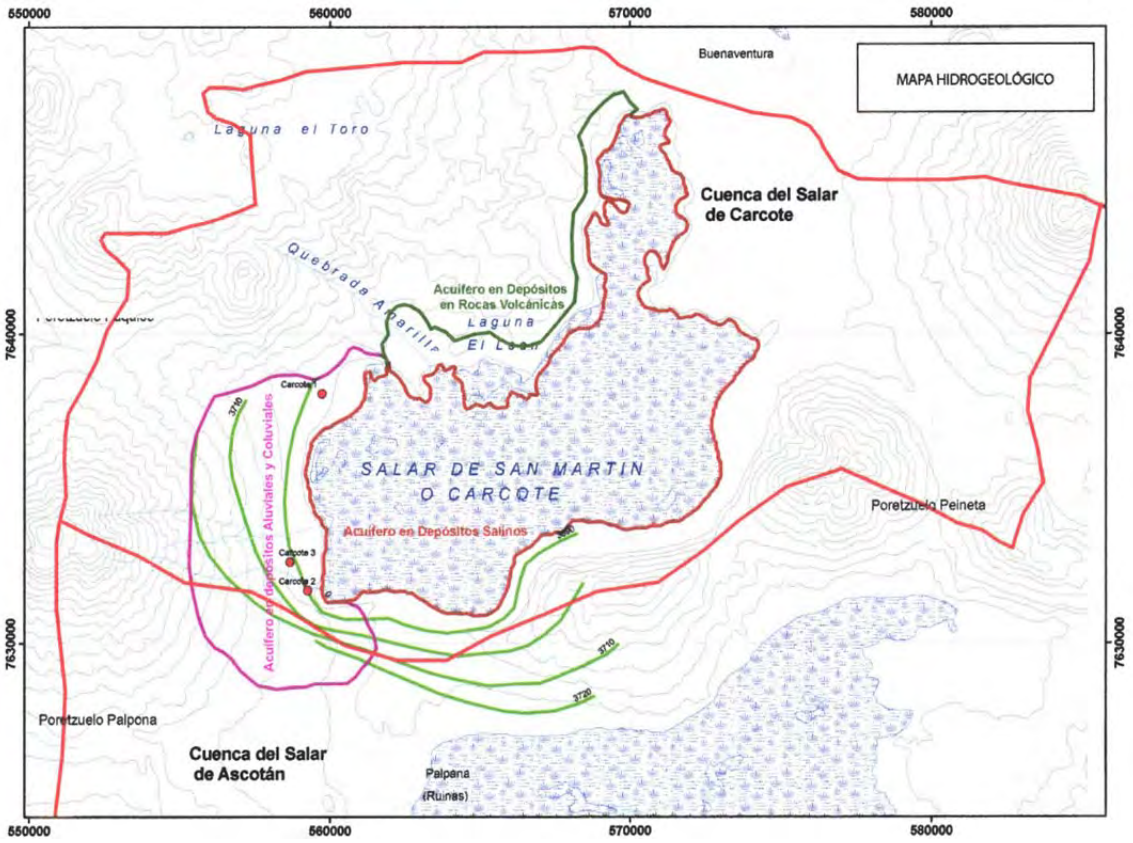


Figura 6-8. Curvas isofreáticas del sector suroeste del salar de Carcote y ubicación de las unidades hidrogeológicas. Fuente: DICTUC, 2005.

6.4 SALAR DE ASCOTÁN

La subcuenca endorreica del salar de Ascotán es una depresión limitada por una serie de volcanes entre los que destacan al norte el volcán Ollagüe (5.868 msnm), al este el cerro Ascotán (5.187 msnm), oeste el volcán Palpana (6.078 msnm) y al sur el cerro del Azufre (5.814 msnm) (**Figura 6-9**).

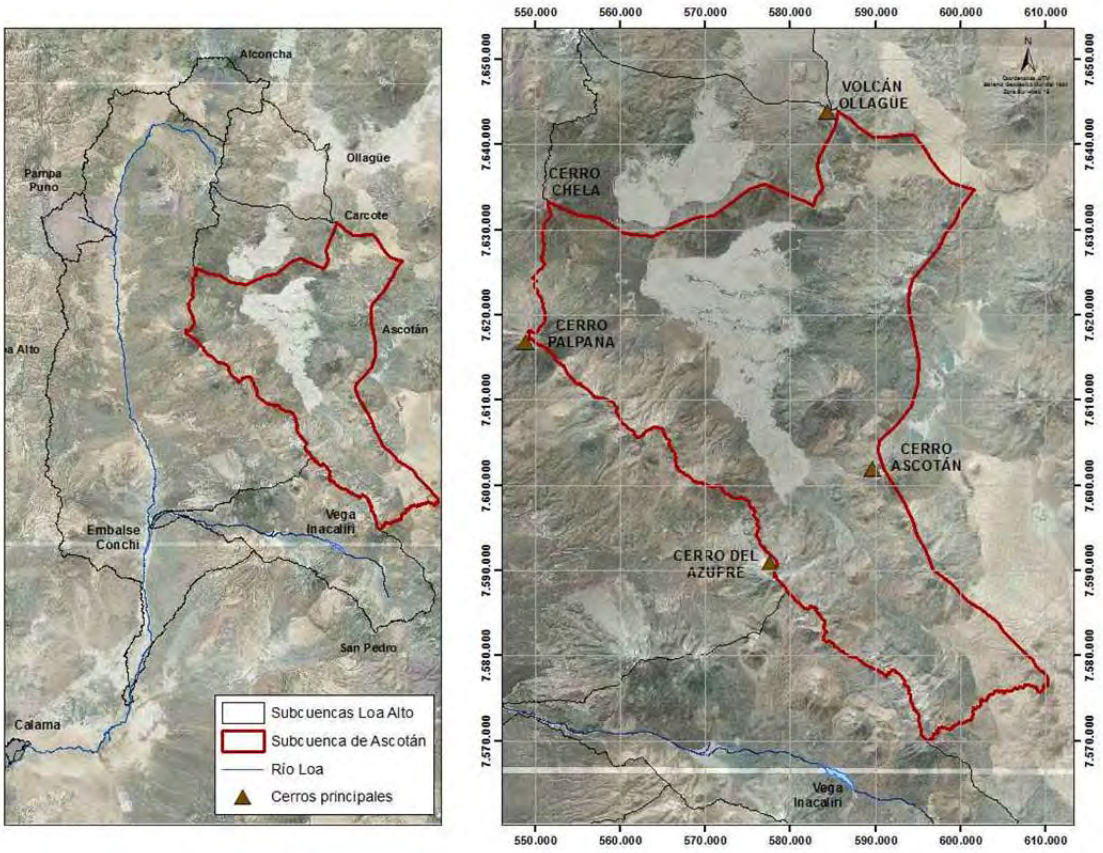


Figura 6-9. Mapa del área de estudio (izquierda) y mapa detallado del salar de Ascotán (derecha). Fuente: elaboración propia.

Para elaborar la caracterización hidrogeológica del salar de Ascotán se ha considerado la información compilada del informe de DICTUC (DICTUC, 2005) y SCHLUMBERGER (Schlumberger, 2009).

Según DICTUC (DICTUC, 2005) en el salar de Ascotán existen dos unidades acuíferas separadas por una unidad confinante. La **Figura 6-10** es el mapa de ubicación de los perfiles hidrogeológicos y dos perfiles hidrogeológicos del salar de Ascotán. Además en este mapa se aprecia que todos los perfiles han sido realizados en el sector sur de la

subcuenca de Ascotán, por lo tanto se considera que las siguientes unidades hidrogeológicas que se describen a continuación son homogéneas en el resto de la cuenca.

Unidad Hidrogeológica I: esta unidad hacia el este del salar está formada por sedimentos no consolidados, coladas dacíticas, toba y conglomerados, mientras que, en la zona misma del salar de Ascotán son depósitos evaporíticos y coladas de andesita y dacita. El agua es almacenada en los poros y en las fracturas. Esta unidad corresponde el acuífero libre del salar y el espesor del acuífero tiene una variación de 50 metros en el centro del salar a 350 m hacia el sur.

Unidad Hidrogeológica IIa somera: esta unidad corresponde a un acuífero confinado a semiconfinado saturado con agua fresca (baja salinidad) y formado por conglomerados de bajo grado de litificación, en cuya base se interdigitan andesitas, dacitas y riodacitas. El espesor de esta unidad aumenta progresivamente de 70 hasta 200 m.

Unidad Hidrogeológica IIb profunda: es un acuífero confinado saturado con agua fresca, desconectado hidráulicamente de la unidad hidrogeológica IIa somera por coladas de andesita, dacita y riodacita.

Unidad Hidrogeológica III: unidad constituida por una toba fracturada y saturada en agua salobre. Se encuentra a más de 200 m de profundidad.

Unidad Hidrogeológica IV: corresponde al basamento constituido por toba fresca, sin fracturar.

En la **Figura 6-11** se observan las curvas isofreáticas del salar de Ascotán y las líneas de flujo de agua subterránea. Las líneas de flujo subterráneo indican las entradas de agua correspondientes a las zonas de recarga por infiltración presentando una dirección desde los límites este, oeste y sur de la cuenca de Ascotán hacia el salar. En el sector noroeste se observan líneas de flujo subterráneo que van desde la subcuenca de Ascotán hacia el salar de Carcote. Sin embargo, en la zona norte no existen líneas de flujo, indicando que el componente de salida de agua subterránea principal en la subcuenca de Ascotán es la evaporación.

Para el estudio de SCHLUMBERGER (Schlumberger, 2009) se cuenta con el registro de niveles de pozos habilitados desde 1996 a 2009, a partir del cual se elabora el mapa piezométrico del sector sur del salar de Ascotán. Este registro muestra una leve tendencia al descenso en las unidades acuíferas, **Figura 6-12.** Mediante el análisis del registro de los niveles medidos en los pozos de observación, en este informe se

determinan dos grupos de pozos con diferente respuesta de los niveles. Por un lado, los pozos ubicados en la parte sur del salar muestran un descenso de los niveles, provocados por la extracción de agua subterránea, sin embargo a partir de 2003 los niveles se estabilizan, reflejando que el sistema está en cuasi equilibrio. Por el otro lado, los pozos localizados en el centro y parte norte del salar muestran estabilidad en los niveles, únicamente existen fluctuaciones estacionales o aumentos menores, causados por la precipitación directa sobre la superficie del salar y/o recarga desde la precipitación en las cotas altas de la cuenca. Los ascensos rápidos del nivel después de eventos de recarga son probablemente originados por las fallas, que producen vías preferenciales de flujo de agua. Por último, existe la hipótesis de la subsidencia en algunas zonas del salar.

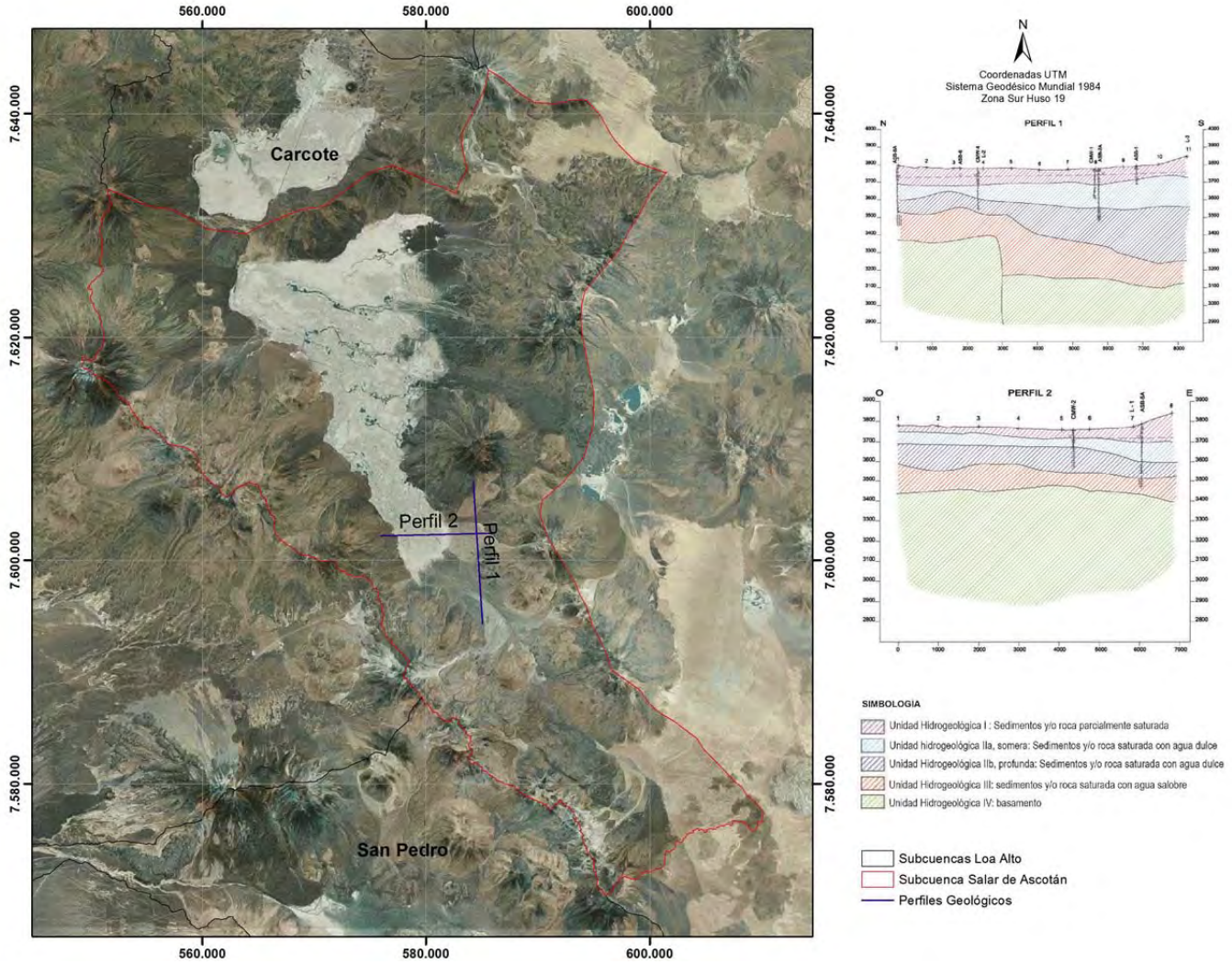


Figura 6-10. Perfiles hidrogeológicos y su ubicación en la cuenca de Ascotán. Fuente: modificado de DICUC, 2005.

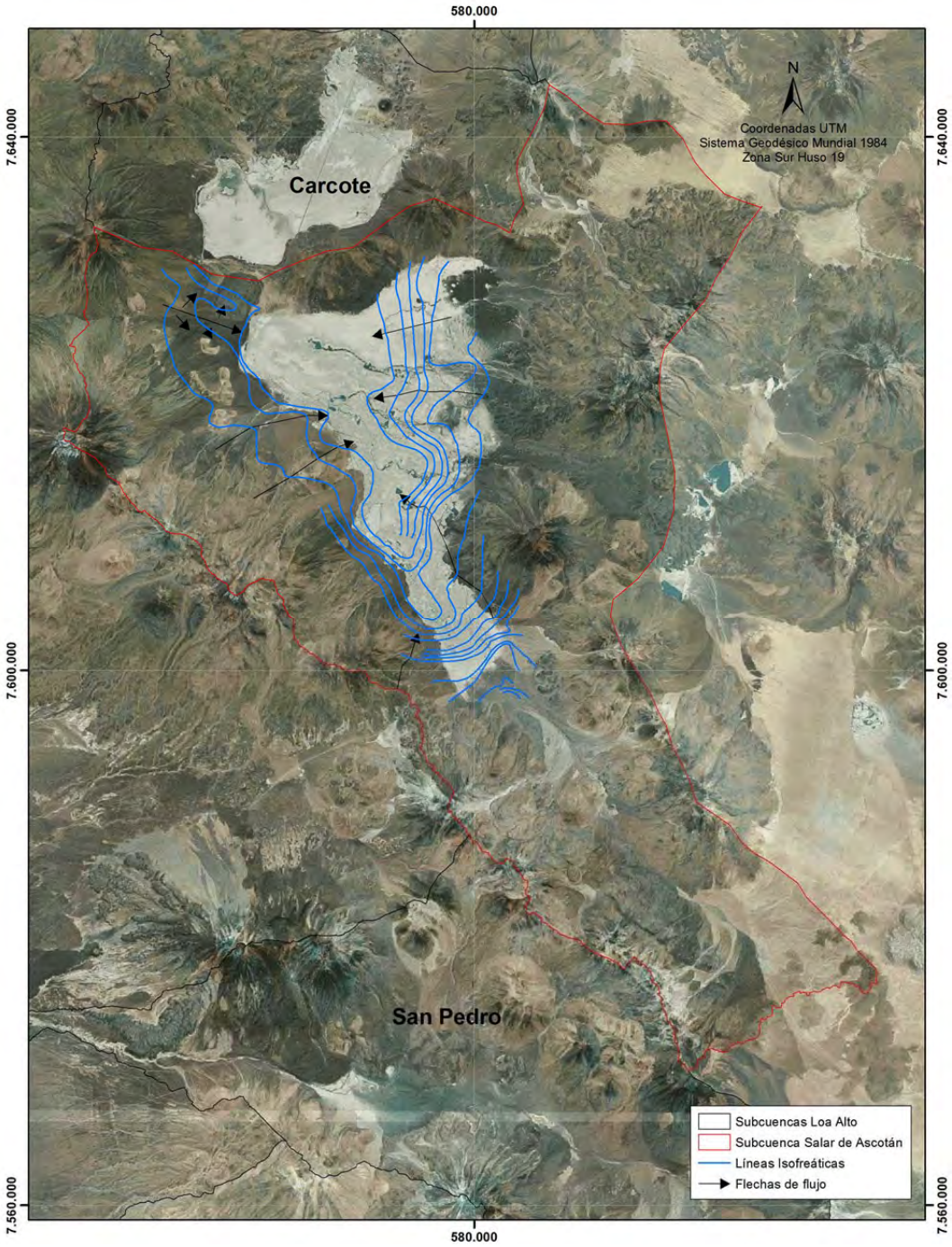


Figura 6-11. Mapa con las curvas isofreáticas y líneas de flujo de la cuenca de Ascotán. Fuente: modificado de DICTUC, 2005.

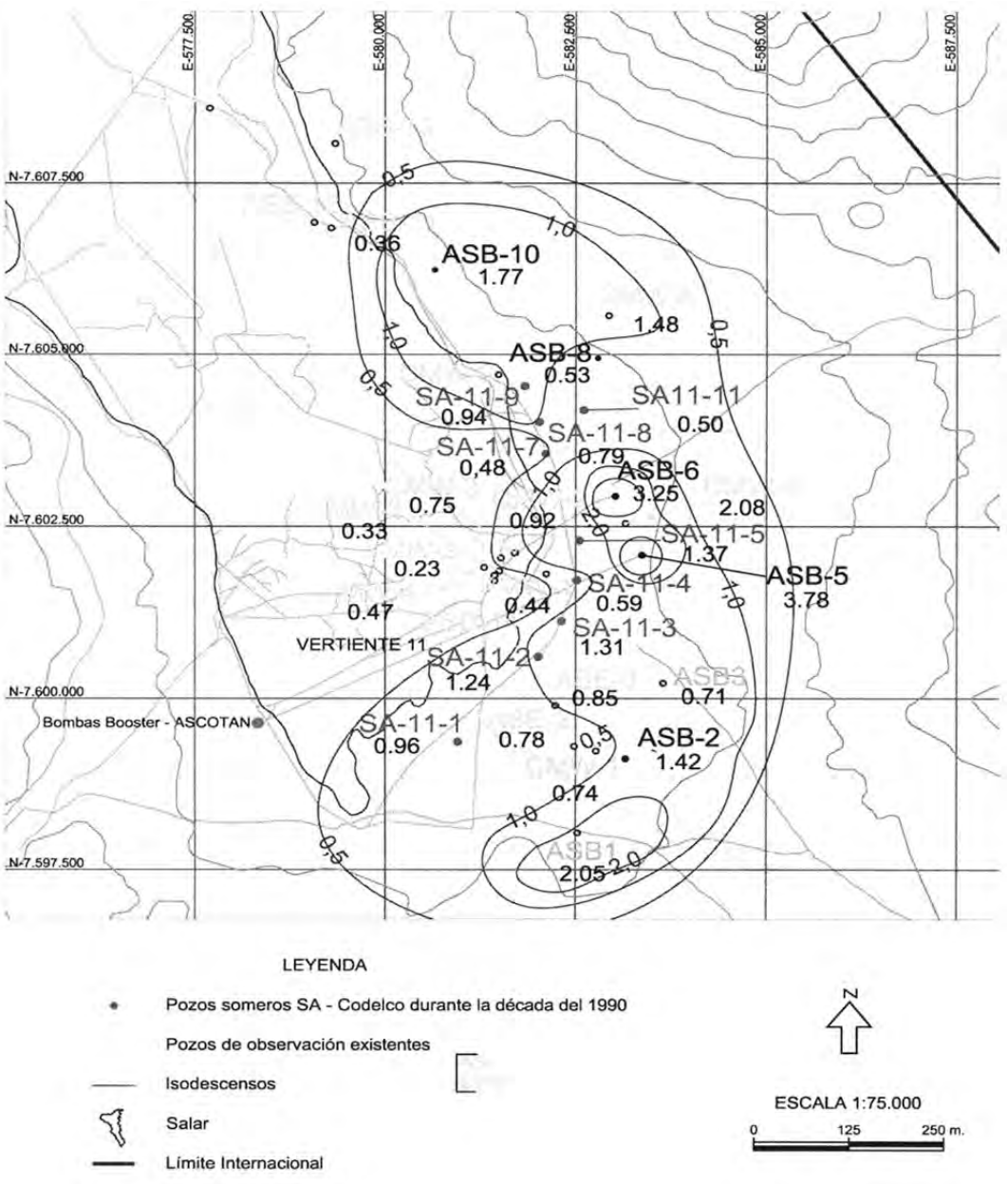


Figura 6-12. Mapa con isodescensos del sector Sureste del Salar de Ascotán. Fuente: Schlumberger, 2009.

La unidad hidrogeológica I, que constituye el acuífero superficial libre, presenta un rango de transmisividad de 1.500-3.800 m^2/d. La conductividad hidráulica varía entre 10^{-4} m/día en los depósitos del salar hasta 1 m/día en los depósitos no consolidados y el coeficiente de almacenamiento es de 5% en los sectores cubiertos con roca y 20% en el salar.

Para las unidades hidrogeológicas IIa somera y IIb profunda, en el informe de DICTUC (DICTUC, 2005) se estima una conductividad hidráulica que varía entre 1 m/día en la zona del salar hasta 150 m/día en las partes alejadas, un coeficiente de almacenamiento entre 10^{-4} a 10^{-3} y una transmisividad variable entre 3.000 m^2/día y 23.000 m^2/día.

En la **Tabla 6-6** se presenta un resumen de los parámetros elásticos pertenecientes a cada una de las unidades hidrogeológicas principales en el ámbito de estudio.

Unidades hidrogeológicas	T (m^2/día)	K (m/día)	S
U.Hidrog I	1.500 – 3.800	10^{-4} hasta 1	5 a 20%
U.Hidrog IIa y IIb	3.000 – 23.000	1 hasta 150	10^{-4} a 10^{-3}

Tabla 6-6. Resumen con las constantes elásticas de los acuíferos de la cuenca del salar de Ascotán. Fuente: DICTUC, 2005.

6.5 PAMPA PUNO

Pampa Puno es una subcuenca que limita al norte con el cerro León (4.438 msnm), en el centro se encuentra el cerro Sapunta (4.092 msnm), y al sur se encuentran los cerros Negro (4.150 msnm) y Perdisuno (4.157 msnm) (**Figura 6-13**).

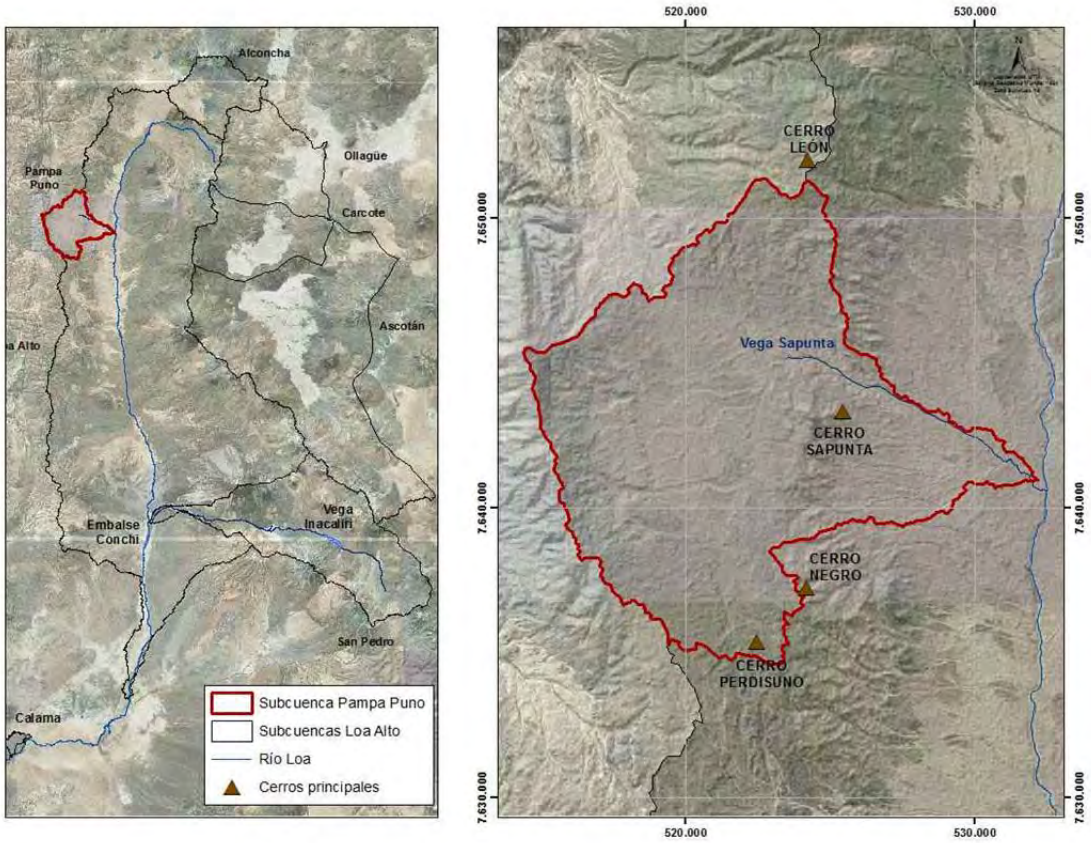


Figura 6-13. Mapa del área de estudio (izquierda) y mapa detallado de Pampa Puno (derecha). Fuente: elaboración propia.

A continuación se describen las unidades hidrogeológicas de la cuenca de Pampa Puno definidas en el informe de INGEOREC (INGEOREC, 2001) y GP (GP, 2008):

Unidad Ignimbrita: consiste en una ignimbrita dacítica y riolítica fracturada cuyo espesor varía entre 44 m y 6 m. Es un acuífero importante por su porosidad secundaria por fracturación, pero no se encuentra totalmente saturada. En el sector norte de Pampa Yocas una unidad aluvial del Cuaternario cubre esta unidad ignimbrítica.

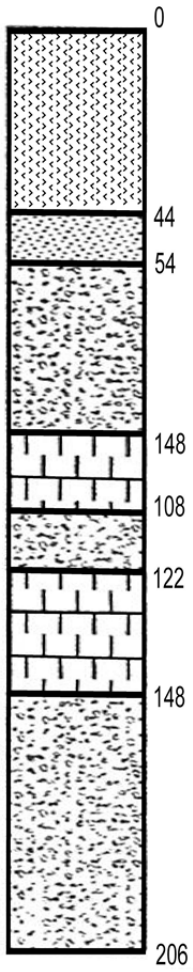
Unidad Sedimentaria: son depósitos fluvioaluviales del Cuaternario y gravas terciarias de la Formación Papajoy, es decir, está constituida por gravas rojas y anaranjadas, poco compactadas y de estratigrafía gruesa con fragmentos volcánicos, intrusivos y sedimentarios con intercalaciones de niveles limo-arenosos. El espesor promedio es de 350 m pero alcanza los 700 m en la parte central de la cuenca y desaparece en la quebrada Sapunta.

Basamento: corresponde a las formaciones Cerro Empexa del Cretácico Superior-Paleoceno e Incanche del Eoceno Inferior a Medio en el oeste de la cuenca y formación Collahuasi en el sector este. Son lavas, tobas y brechas que constituyen las laderas y el basamento impermeable de la cuenca.

En la **Figura 6-14**, se muestra la columna estratigráfica de un sondaje en el pozo Puno-8B, ubicado en sector central de la subcuenca de Pampa Puno. En esta columna estratigráfica se observa el acuífero fracturado de ignimbritas los primeros 44 m de profundidad y el resto de la columna corresponde al acuífero sedimentario con las intercalaciones de arcillas.

La piezometría de este sector es un aspecto que presenta un cierto grado de incerteza. En el informe de INGEOREC (INGEOREC, 2001) se considera que el acuífero de Pampa Puno recarga a la Pampa Yoca y no tendría conexión con la quebrada Sapunta, sin embargo GP (GP, 2008) señala que las equipotenciales realizadas en el terreno de 2007 muestran líneas de flujo con dirección suroeste-noreste hacia la Quebrada Sapunta y confirma la conexión entre Pampa Puno y Pampa Yocas.

El valor de la transmisividad es calculada por INGEOREC (INGEOREC, 2001) a partir de las pruebas de bombeo llevadas a cabo en el pozo Puno-2B, Puno-4B, Puno-6B, Puno-7B, Puno-8B, Puno-9B, Puno-10B, Puno-11B y Puno-314B efectuados por Codelco. En la **Figura 6-15** se muestra la ubicación de estos pozos de bombeo. Interpretando los datos de las pruebas, **Tabla 6-7**, se obtiene en la zona central del área una transmisividad de 200 a 1.000 m^2/día, menos un pozo ubicado en la ladera oeste del valle que posee una transmisividad de 7 m^2/día. Además, se calcula un volumen de almacenamiento de $2.395*10^6$ m^3, considerando un coeficiente de almacenamiento del 10%.



Nivel de ignimbrita fracturada

Nivel sedimentario, arena fina-media de color pardo, principalmente silíceas

Conglomerado de color pardo rojizo, clastos principalmente andesíticos sobredondeados y matriz arena fina

Nivel de arcillas plásticas rojizas

Conglomerado de color pardo rojizo, clastos principalmente abdesíticos sobredondeados y matriz arcillosa

Nivel de arcillas plásticas rojizas

Nivel sedimentario.
Conglomerado consolidado, con pequeños niveles disgregados, presente clastos principalmente andesíticos de color verde y matriz levemente arcillosa

Figura 6-14. Columna estratigráfica del sondaje del pozo Puno-8B. Fuente: INGEOREC, 2001.

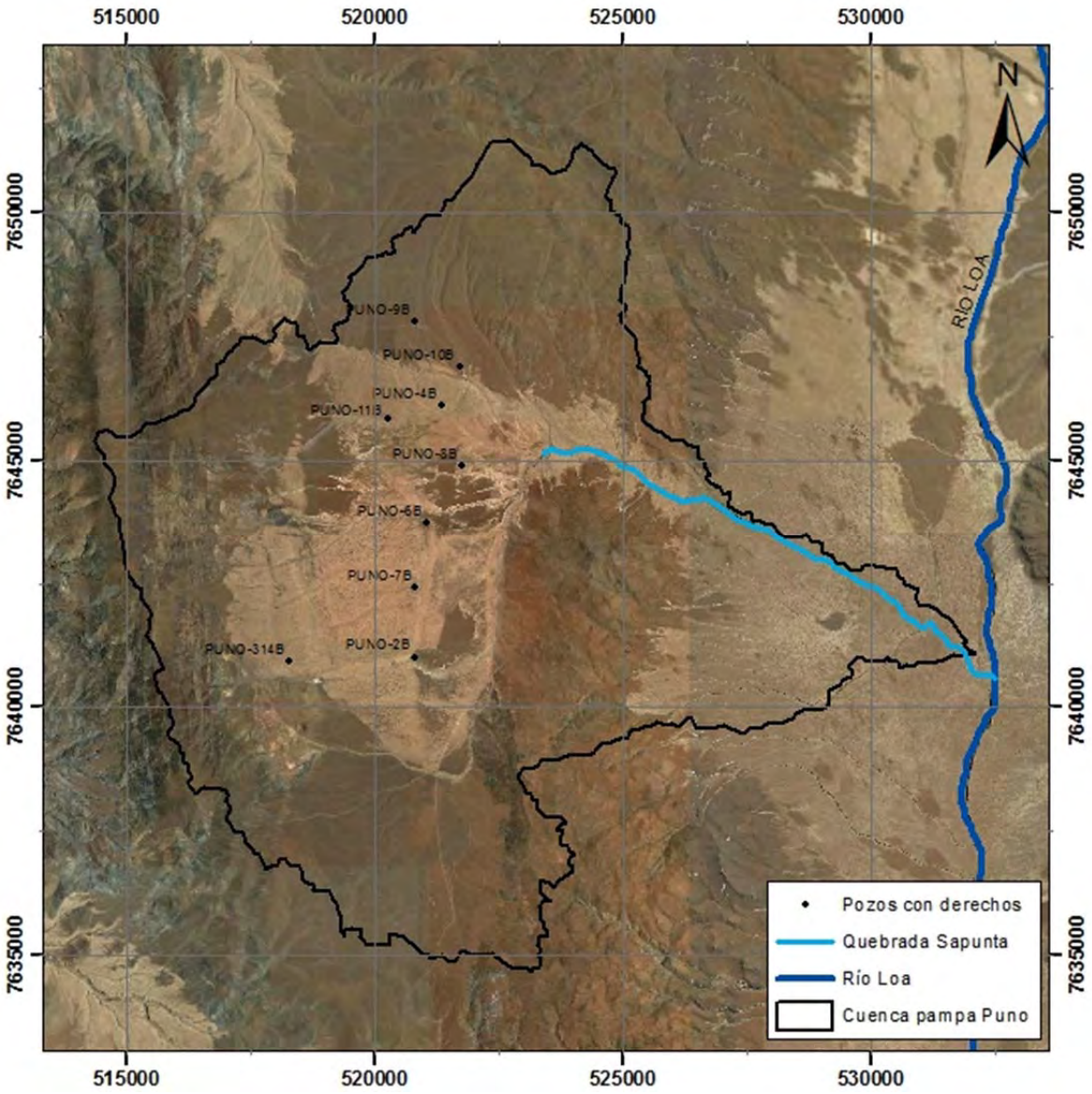


Figura 6-15. Ubicación y distribución de los pozos en Pampa Puno. Fuente: elaboración propia.

Pozo Bombeo	Fecha	Caudal Bombeo (l/s)	Pozo Observación	Distancia al pozo de bombeo (m)	Nivel estático (m)	Nivel Dinámico (m)	Transmisividad	
							Jacob (m^2/día)	Recuperación (m^2/día)
2B	Oct-98	12	2B		74,5	91,2	80	130
			2E	61,9	74,9	76,6	270	220
	Oct-98	18	2B		75,7	98,6	85	
			2E	61,9	75,2	76,7	300	670
	Mar-99	3	2B		74,1	141,4	60	93
			2E	61,9	73,2	75,6	370	600
4B	Ene-99	60	4B		67,9	91,5	180	500
	May-99	110	4B		66,9	114,4	190	
			4E	54,9	68,2	69,3	7500	
6B	Feb-99	50	6B		56,7	116,9	80	90
			4B	2338	67,5	67,6	5600	
			7B	1368	58,2	58,5	340	420
7B	Feb-99	50	7B		56,7	105,3	47	460
			6B	1368	54,2	56,0	380	110
8B	Mar-99	8,5	8B		47,1	67,5	12	
9B	Abr-99	50	9B		109,9	149,7	30	
10B	Abr-00	30	10B		74,6	118,6	85	
11B	May-00	60	11B		77,0	144,5	27	
314B	Sep-98	5	314B		54,9	96,0	3	7
	Jul-99	5	314B		54,9	136,3	2	

Tabla 6-7. Resultados de transmisividad de las pruebas de bombeo de la campaña 1998-2000. Fuente: INGEOREC, 2001.

6.6 SAN PEDRO

La subcuenca del río San Pedro se localiza en el sector sureste de la zona de estudio. De la confluencia de las vertientes y el río Siloli a más de 4.000 msnm nace el río San Pedro. Esta subcuenca limita al norte con los volcanes San Pedro (6.141 msnm) y San Pablo (6.092 msnm) y el cerro Inacaliri (5.645 msnm), y al sur el volcán Paniri (5.946 msnm) y el cerro Toconce (5.411 msnm) (**Figura 6-16**).

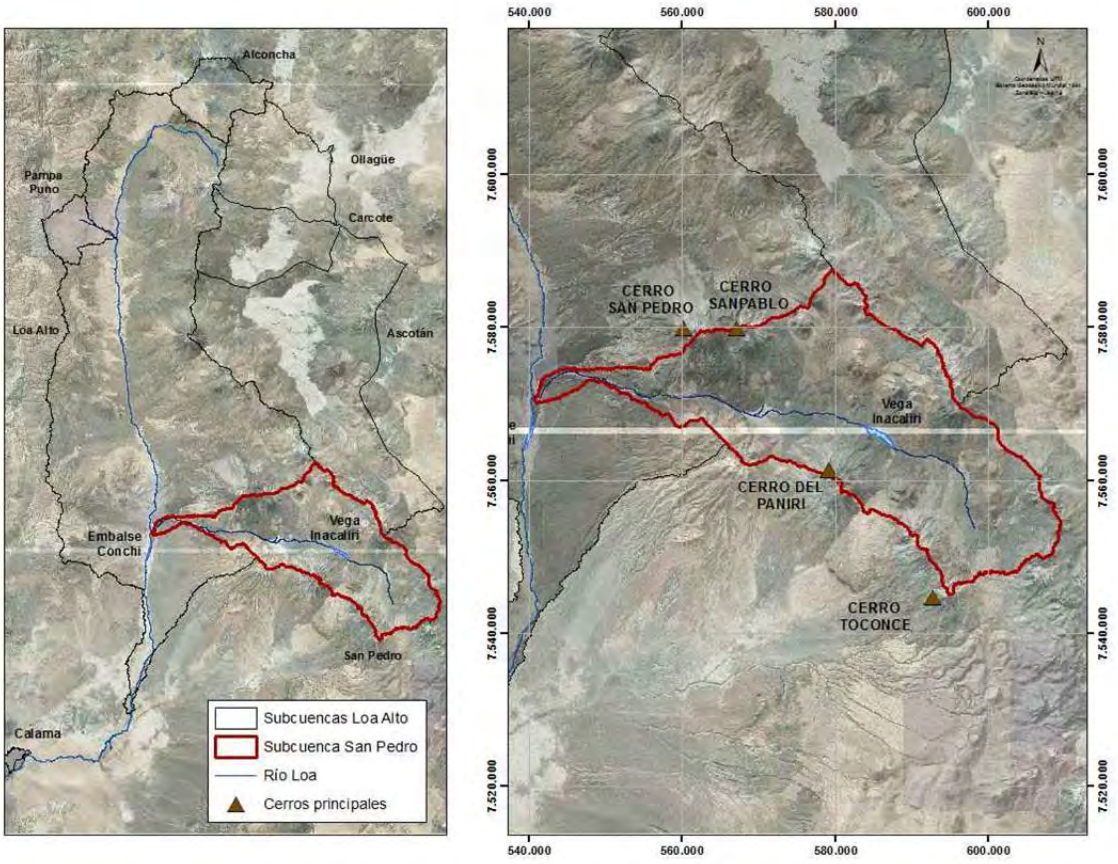


Figura 6-16. Mapa del área de estudio (izquierda) y mapa detallado de la subcuenca del río San Pedro (derecha). Fuente: elaboración propia.

Esta subcuenca se caracteriza por su estructura *graben* y por sistemas de fallas que condicionan la circulación del agua subterránea con dirección levemente noreste y otra ligeramente este-oeste (Falcón, 1987).

A partir de la información del informe de AGUA (AGUA, 1985) y de GEODATOS (Geodatos, 1986) se reconocen los siguientes sistemas hidrogeológicos en la cuenca de San Pedro:

Unidad superior: corresponde al relleno sedimentario de origen aluvial cuaternario. Está formada por sedimentos piroclásticos que poseen mayor o menor grado de retrabajamiento. El perfil gravimétrico longitudinal del sector muestra un espesor de material sedimentario menor (50 m) en el valle a los pies del cerro Inacaliri y un aumento de potencia del espesor detrítico en la parte central del perfil llegando a un máximo de 900 m en la depresión del río San Pedro. La granulometría es heterogénea, ya que en la zona de San Pedro son sedimentos depositados en un medio lacustre de baja energía, mientras que en el resto de la cuenca son en general similares. Es un medio que facilita la infiltración del agua de las precipitaciones.

Un cordón de rocas miocénicas desconecta parcialmente el sistema acuífero del relleno cuaternario entre el sector de San Pedro y de Aguilucho, según el informe de AGUA (AGUA, 1985).

Unidad inferior: constituido por la alternancia de rocas andesíticas fracturadas, sedimentos piroclásticos y por varios niveles arenosos.

Basamento: el basamento rocoso es ignimbrita riolítica. Esta capa tiene una gran importancia respecto al ciclo hídrico ya que por tener propiedades supuestamente muy poco conductivas hidráulicamente o casi impermeable conforma la base de los materiales detríticos que se comportan como acuífero. Se considera la unidad con mayor capacidad acuífera, ya que el sistema cuaternario se recarga por infiltración por precipitación y por el aporte de agua subterránea desde el acuífero profundo a través de las fracturas.

De los perfiles geofísicos realizados por GEODATOS (Geodatos, 1985) revelan estratos de relativa baja resistividad en los estratos superficiales en el centro del valle, esto puede ser debido a la presencia de restos de antiguos bofedales y zonas de evaporación, donde hay gran concentración de sales. En la **Figura 6-17** se muestra un mapa con la ubicación de los perfiles geofísicos y los perfiles San Pedro Nº2.

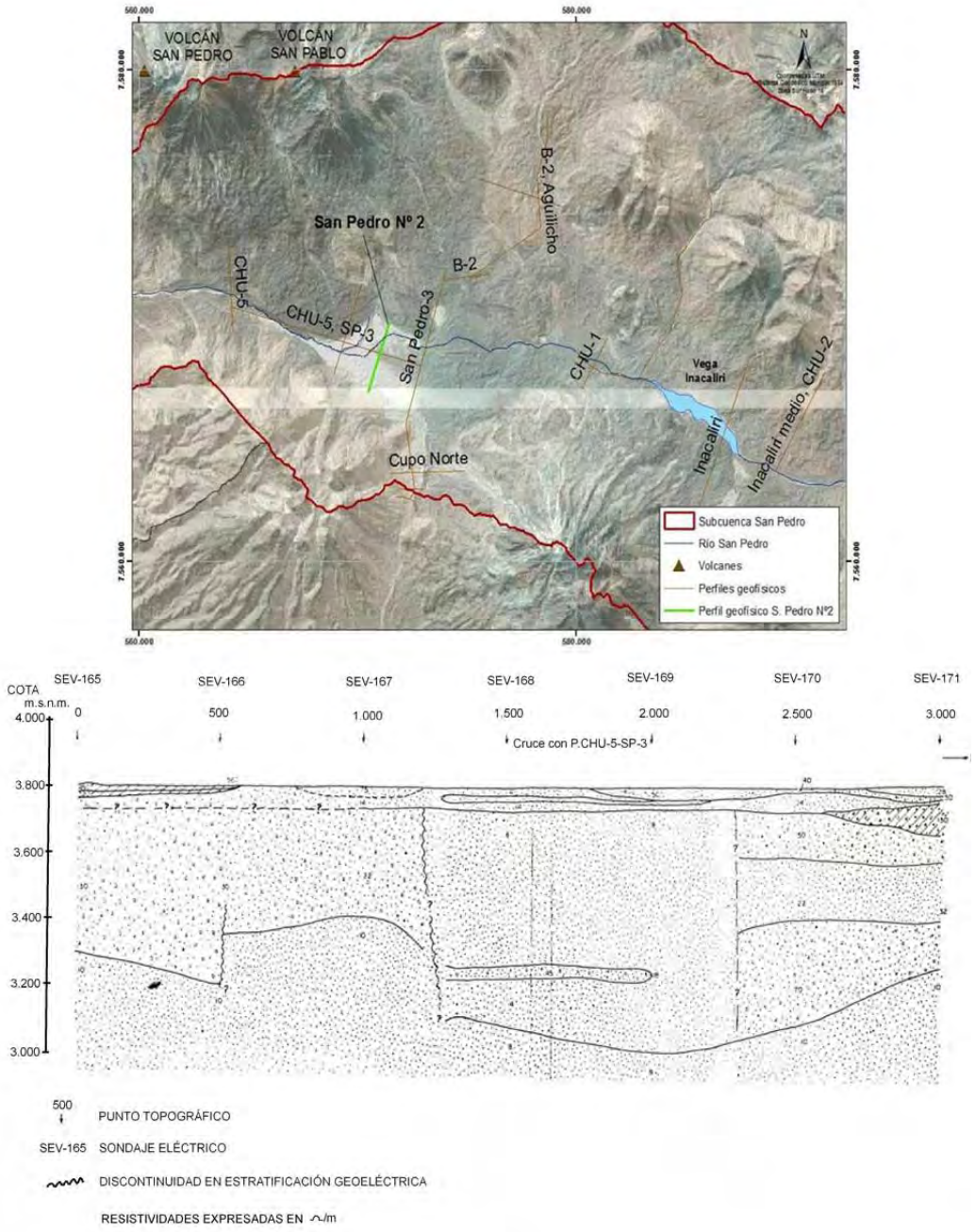


Figura 6-17. Mapa de situación de los perfiles geofísicos en la cuenca de San Pedro y los perfiles San Pedro Nº2 y el B-2. Fuente: modificado de Geodatos, 1985.

En la cuenca del río San Pedro, existen un grupo de pruebas de bombeo efectuadas en los pozos B1, B2, B3 y B4. Para estas pruebas de bombeo fueron utilizados un grupo de pozos de observación que se ubicaron entre 20-50 m de distancia, sin embargo no se dispuso de las coordenadas de los pozos de observación, y por lo tanto no se

pueden presentar en una figura junto al esquema de bombeo. En la **Tabla 6-8** se resumen los antecedentes disponibles para estas pruebas. Se desprende de la tabla que la gran mayoría de los datos de conductividad hidráulica se encuentran en el rango 20-80 m/d en condiciones freáticas y bombeos entre 40 l/s y 100 l/s, a excepción de unos valores extremadamente altos de 1000 m/d y 1700 m/d en el pozo B2, y caudal de bombeo de 135 l/s y condiciones de confinamiento.

Pozo bombeo	Pozo observ.	Caudal (l/s)	Método de análisis	Transmisividad (m^2/d)	Conductiv. Hidráulica (m/d)	Coef. Almac. S	Tipo de acuífero
B1	B-1I	60	Theis	37565	380	$32*10^{-2}$	No confinado
Prf. 140							
B1	B-1I	43	Walton	1408.5	18	$14*10^{-2}$	¿No confdo?
Prf. 140			Theis	2690	34	$22*10^{-2}$	¿No confdo?
			Jacob	4530	57	$12*10^{-2}$	¿No confdo?
B2	B-2II	135	Theis	51610	1000	$8.30*10^{-2}$	Confinado
			Jacob	85436	1700	$7.60*10^{-4}$	Confinado
B3	B-3II	100	Theis	4595	65	$14*10^{-2}$	No confinado
	B-3II	100	Walton	3272	46	$34*10^{-2}$	No confinado
	B-3III	100	Walton	1775	25	$6.00*10^{-3}$	¿No confdo?
B4	B-4I	40	Walton	4000	69	$1.36*10^{-1}$	No confinado
	B-4I ,B4II	40	Thiem-Dupuit	3456	76		No confinado
	B-4II, B-4III	40	Thiem-Dupuit	3431	76		No confinado
	B-4I, B-4III	40	Thiem-Dupuit	2021	45		No confinado

Tabla 6-8. Parámetros hidráulicos cuenca del río San Pedro. Fuente: CORFO *et al.*, 1977.

6.7 RÍO LOA

El río Loa nace a los pies del volcán Miño (5.661 msnm) y recorre una depresión que separa la Sierra del Medio de la cordillera de los Andes. Se ha creado un importante cañón con dirección norte-sur a lo largo de la depresión cubierta principalmente de ignimbrita hasta llegar al oasis de Chiu Chiu (**Figura 6-18**).

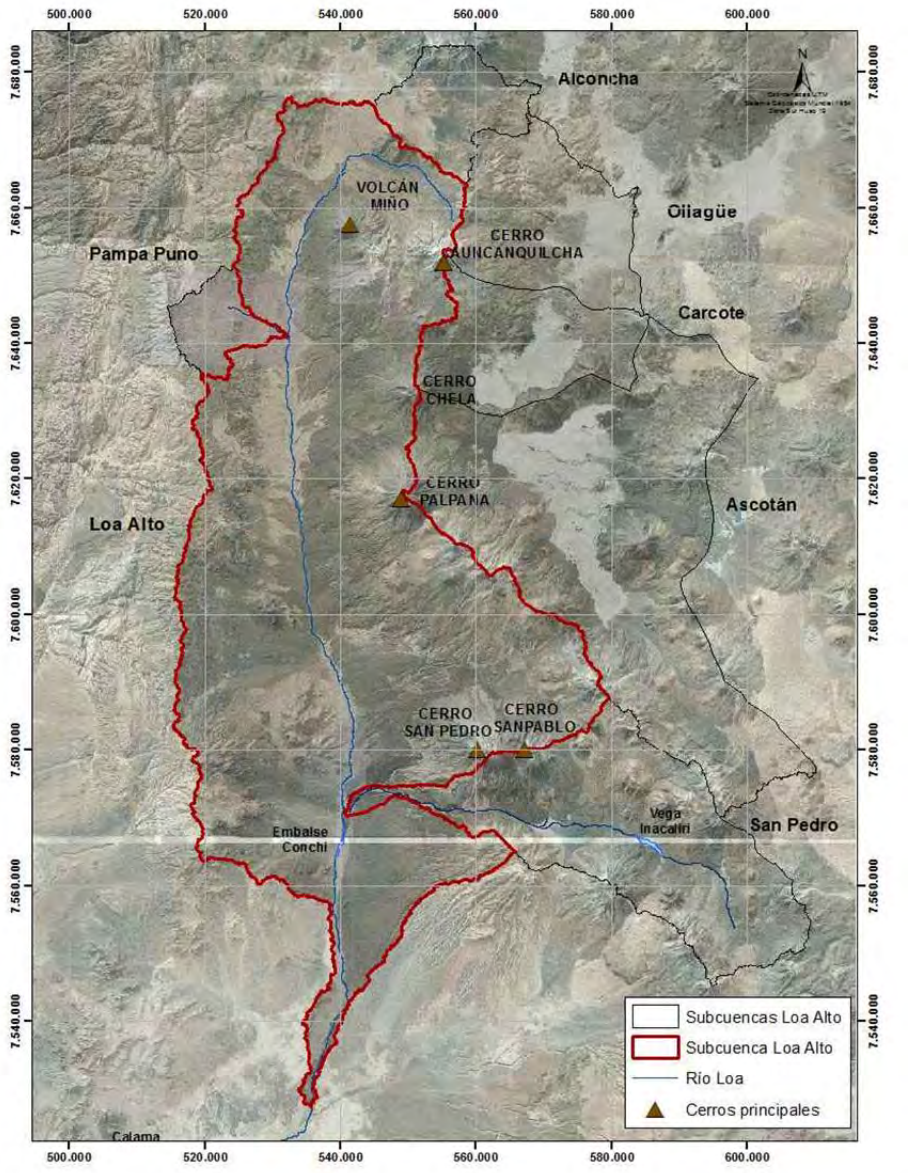


Figura 6-18. Mapa del área de estudio (izquierda) y mapa detallado de la subcuenca del río San Pedro (derecha). Fuente: elaboración propia.

La caracterización hidrogeológica del río Loa se realiza partir de un estudio de AQUATERRA (Aquaterra, 2011), que se basa en los estudios geofísicos de GEODATOS (Geodatos, 2011).

GEODATOS (Geodatos, 2011) lleva a cabo un estudio geofísico, en el cual se realiza un perfil geofísico antes de Lequena, **Figura 6-19,** mediante el método de Nano Tem, obteniendo como resultado un modelo de resistividad a lo largo de este perfil. Posteriormente, AQUATERRA (Aquaterra, 2011) presenta una correlación entre los diferentes estratos cuya litología, estructura y/o grado de saturación se refleja en los rangos de resistividad del modelo realizado.

Es importante destacar que las unidades que se describen a continuación son identificadas únicamente con la información geofísica recopilada y se debería verificar con estudios estratigráficos de pozos cercanos a este corte. En el corte geofísico, **Figura 6-20**, se interpretan en una sección de 200 m de anchura y 40 m de profundidad las siguientes unidades:

Unidad sedimentaria superficial seca: es una capa horizontal de 5 m de espesor, erosionada por el río pero que no está saturada.

Unidad de gravas y arenas: esta unidad está saturada y su espesor varía entre 8 en el borde oriental a 4 m en el occidental. En el borde occidental existe una interdigitación de los sedimentos arcillosos que subyacen a esta. AQUATERRA (Aquaterra, 2011) define una permeabilidad de $1*10^{-4}$ m/s a esta unidad.

Unidad sedimentos arcillosos: constituida por sedimentos finos, presenta un espesor de 10 m y una permeabilidad de $2*10^{-6}$ m/s, por lo tanto esta unidad tiene un carácter confinante.

Basamento: se trata de la ignimbrita dacítica y riolítica que constituye la base sobre la cual se depositan las unidades sedimentarias cuaternarias.

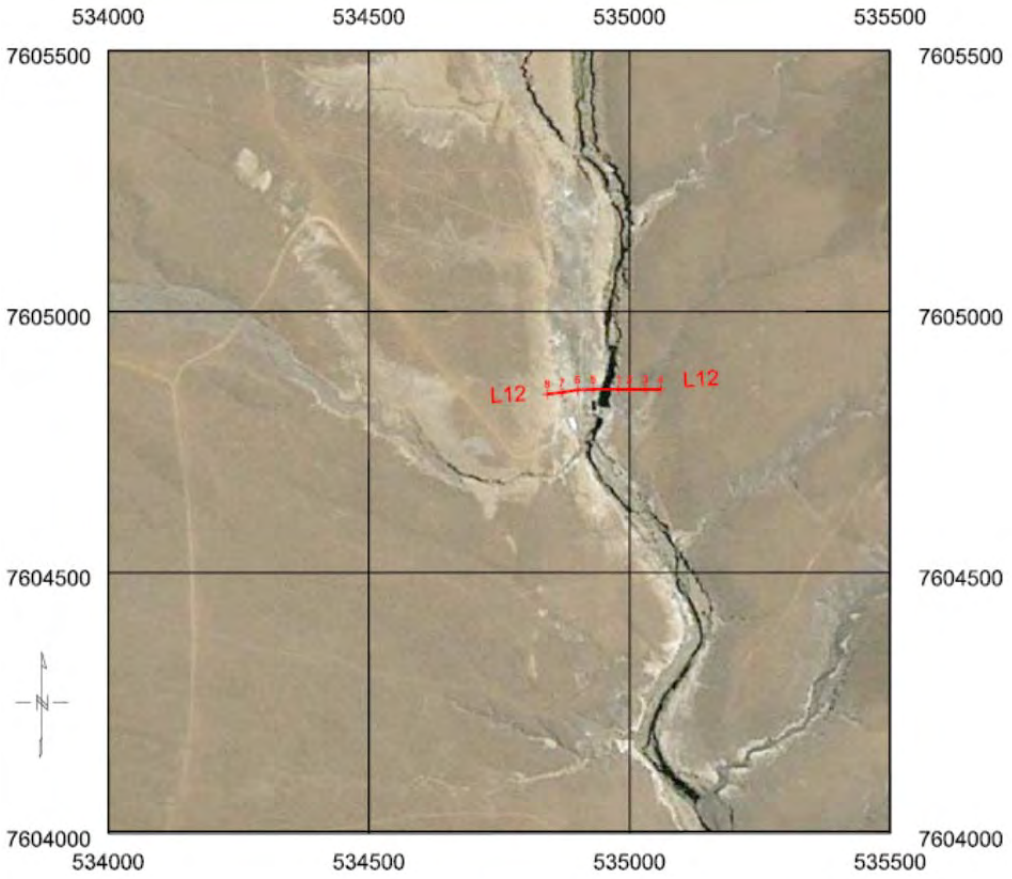


Figura 6-19. Ubicación del corte geofísico realizado en el río Loa antes de Lequena. Fuente: Aquaterra, 2011.

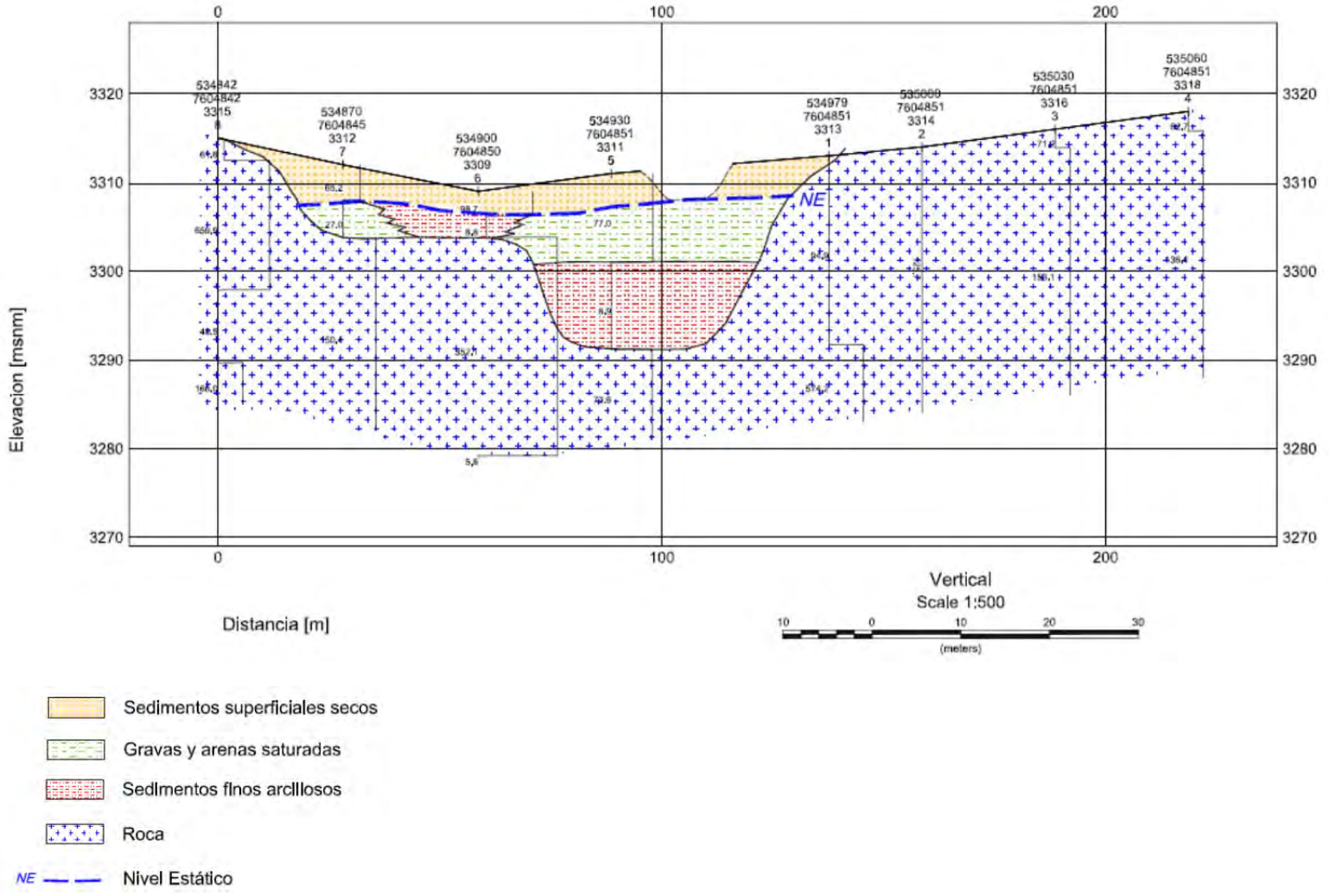


Figura 6-20. Corte geofísico realizado en el río Loa antes de Lequena. Fuente: Aquaterra, 2011.

En el sector de la estación de Polapi ubicado al noreste del embalse Conchi, dentro de la subcuenca del río Loa se han definido las 5 siguientes unidades hidrogeológicas a partir del estudio de FCAB (FCAB, 2003):

Unidad I: constituida por arenas y gravas en una matriz limoarenosa que rellenan las quebradas, llanuras y pampas. Corresponden a los depósitos aluviales, fluvioaluviales, glaciales y piroclásticos que sobreyacen a las unidades volcánicas y volcanoclásticas. Presenta un espesor entre 20 a 50 m.

Unidad II: son coladas de lavas andesíticas de tipo columnares afectadas por un intenso fracturamiento. Esta unidad se caracteriza por tener un fracturamiento primario originado por el enfriamiento rápido y un fracturamiento secundario por el sistema de fallas existentes.

Unidad III: corresponden a flujos ignimbríticos, formados por tobas riolíticas y dacíticas moderada a fuertemente consolidadas en una matriz de ceniza fina con baja porosidad y permeabilidad. La potencia obtenida en las pruebas de geofísica y en los sondajes de FCAB (FCAB, 2003) varía entre 150 a 20 m. Se considera a esta unidad semiconfinante.

Unidad IV: constituida por gravas y arenas moderadas a pobremente consolidadas. Presenta una potencia media de 200 m, alcanzando los 300 m en el borde este y oeste. Esta unidad es la unidad acuífera más importante, que en las resistividades obtenidas en las pruebas geofísicas muestra que es un material saturado con aguas salobres a salinas.

Unidad V: es el basamento del acuífero formado por los estrato-volcanes del Mioceno Superior. Al presentar una fuerte consolidación es una unidad con permeabilidad muy baja o nula.

Se realizó una campaña de geofísica en el año 1999 por la empresa Geodatos y supervisada por DICTUC. En la **Figura 6-21** se muestra el mapa de ubicación de los 28 sondeos TEM, distribuidos en 7 perfiles (L-0 a L-6), y el Perfil L-2. Existe una imprecisión en la ubicación de los perfiles debido a que no se indica el sistema de coordenadas utilizado en el mapa. Además, en el perfil L-2 se diferencian las unidades hidráulicas descritas anteriormente.

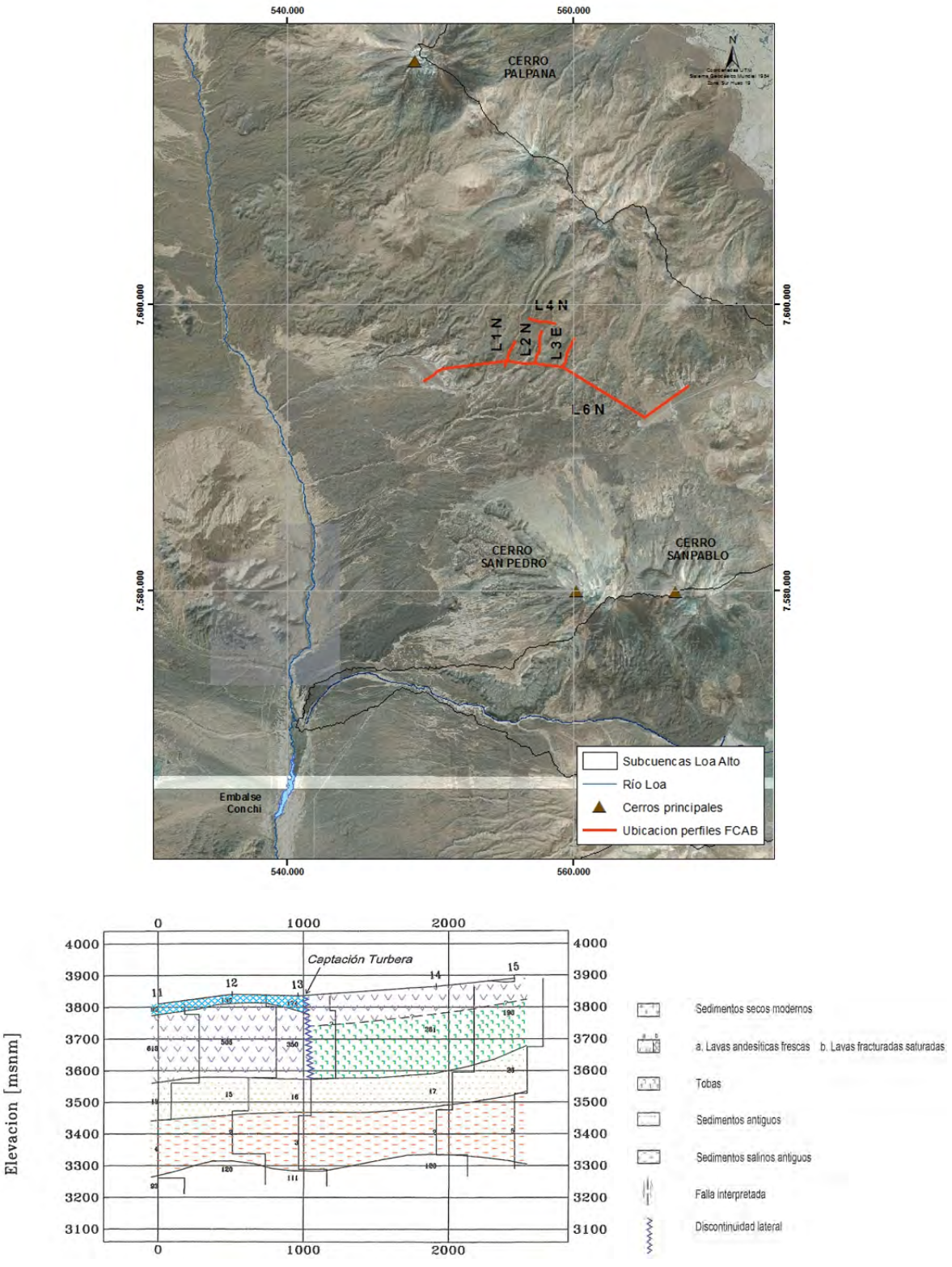


Figura 6-21. Mapa de la ubicación de los perfiles TEM y el perfil L-3 TEM. Fuente: FCAB, 2003.

En este sector también se llevó a cabo una campaña de perforación en el invierno de 2001 en la que las empresas de perforaciones Rock Drilling y Captagua construyeron 5 pozos y un pozo de bombeo respectivamente. En la primavera del 2001, posterior a la construcción de los pozos, se realizó la medición de nivel estático en los pozos PPE-2, PPE-3, PPE-4, SEP-1, PLE-1, PLE-2. En la **Figura 6-22** se observa que los valores de los niveles estáticos van disminuyendo desde las altas altitudes hacia las bajas cotas siendo acorde al relieve topográfico. En este mapa también existe un problema de precisión por falta de información del sistema de coordenadas empleado por FCAB (FCAB, 2003).

En diciembre de 2001 se realizó una prueba de gasto constante y de recuperación de niveles en el pozo SEP-1. En la **Tabla 6-9** se muestra como mediante el método de Cooper-Jacob en la prueba de gasto constante, de Theis-Jacob en la recuperación y Theis en el pozo de observación PPE-3, FCAB (FCAB, 2003) obtiene un rango de transmisividad de 221 a 266 m^2/día en el acuífero semiconfinado. El parámetro de coeficiente de almacenamiento se calculó mediante el método de Theis, obteniéndose un valor de 2,4 x 10^{-4}.

Pozo	Método	Tipo Prueba	Transmisividad (m^2/día)
1-Sep	Cooper-Jacob	Gasto constante	223,2
1-Sep	Theis-Jacob	Recuperación	266,4
PPE-3	Theis	Gasto constante	221,76

Tabla 6-9. Valores de transmisividad obtenidos de las pruebas de bombeo. Fuente: FCAB, 2003.

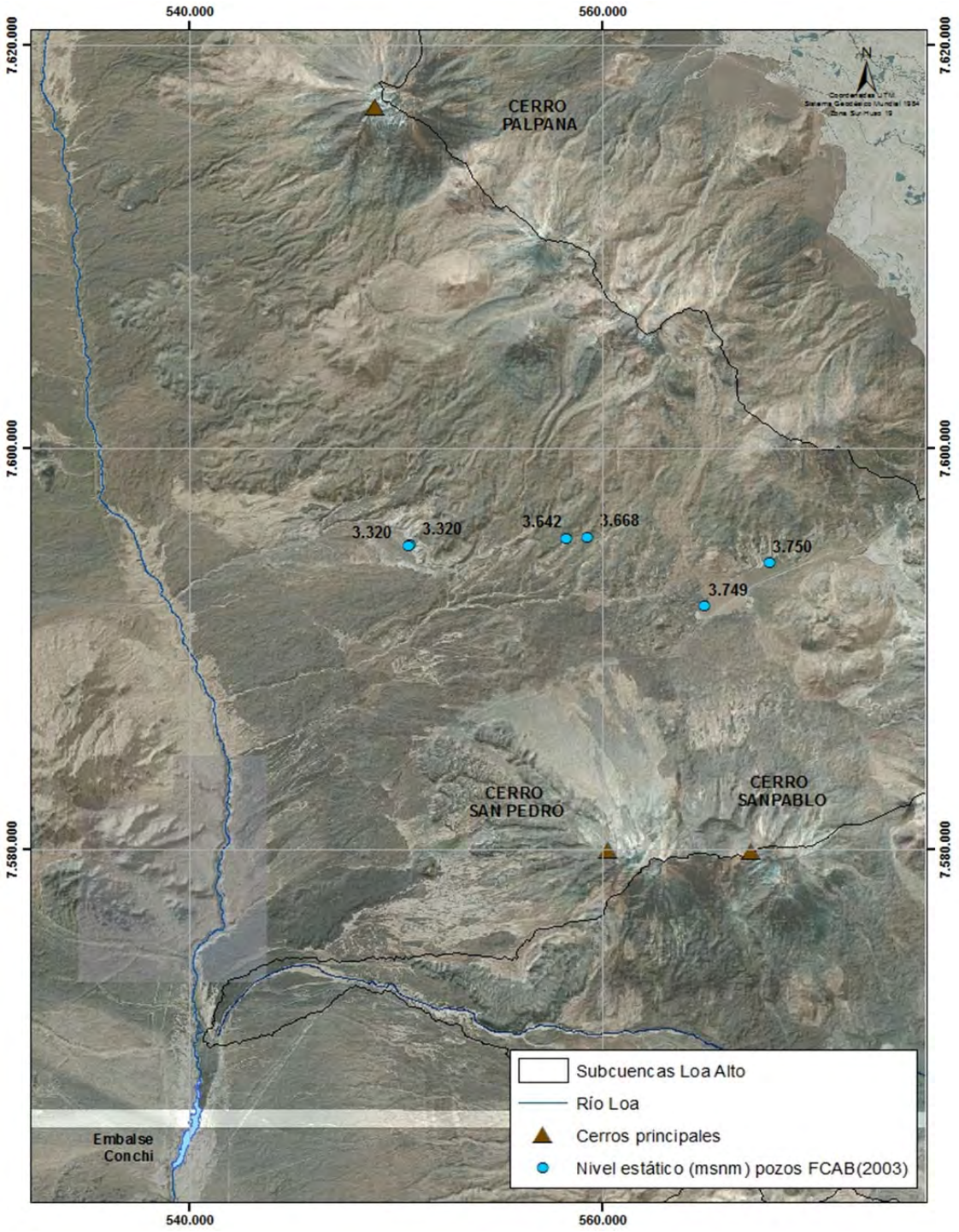


Figura 6-22. Mapa con los valores de los niveles estáticos. Fuente: modificado de FCAB, 2003.

6.8 GENERACIÓN DE EQUIPOTENCIALES

En este apartado de generación de equipotenciales se muestran los niveles estáticos medidos en los pozos y los niveles de agua de lámina libre en las vertientes y en los ríos muestreados en las campañas de terreno realizadas en octubre de 2013 y diciembre de 2013 por parte de Matraz en la zona de estudio. Algunos de los puntos medidos en la campaña de terreno han sido eliminados del análisis de equipotenciales, ya que se encontraban muy cercanos a otros puntos, o no eran representativos del acuífero. En la **Tabla 6-10** se presenta el número de cada tipo de muestra que se ha considerado para elaborar los siguientes mapas con los valores de los niveles freáticos medidos.

Subcuenca	Pozos		Vertientes		Superficial	
	1ªCampaña	2ªCampaña	1ªCampaña	2ªCampaña	1ªCampaña	2ªCampaña
Salar de Alconcha	-	-	3	3	-	-
Salar de Ollagüe	-	-	3	3	-	-
Salar de Carcote	-	-	5	5	-	-
Salar Ascotán	7	6	7	5	1	1
Pampa Puno	-	-	1	1	-	-
San Pedro	2	2	6	6	3	3
Loa	1	1	5	6	15	15
TOTAL	**10**	**9**	**29**	**27**	**18**	**18**

Tabla 6-10. Tabla con el número de mediciones de nivel en cada subcuenca, en cada campaña. Fuente: elaboración propia.

En la **Figura 6-23** se muestra la distribución y los valores de las 10 mediciones de niveles de agua en pozos y 47 altitudes a las que se han tomado las muestras de agua en vertientes y ríos en la **primera campaña**, y en la **Figura 6-24** se muestra la distribución y los valores de las 9 mediciones de niveles de agua en pozos y 45 altitudes a las que se tomaron muestras de agua en vertientes y ríos en **la segunda campaña**.

Al comparar los niveles de la 1ª y 2ª campaña se comprueba que no existen grandes variaciones en los niveles medidos. Además de la poca variación de los datos, los niveles suben o bajan en distintas zonas sin seguir ningún patrón, por lo que tampoco se puede hablar de una tendencia. Se puede concluir que no existe una variación estacional de los niveles freáticos en el área de estudio.

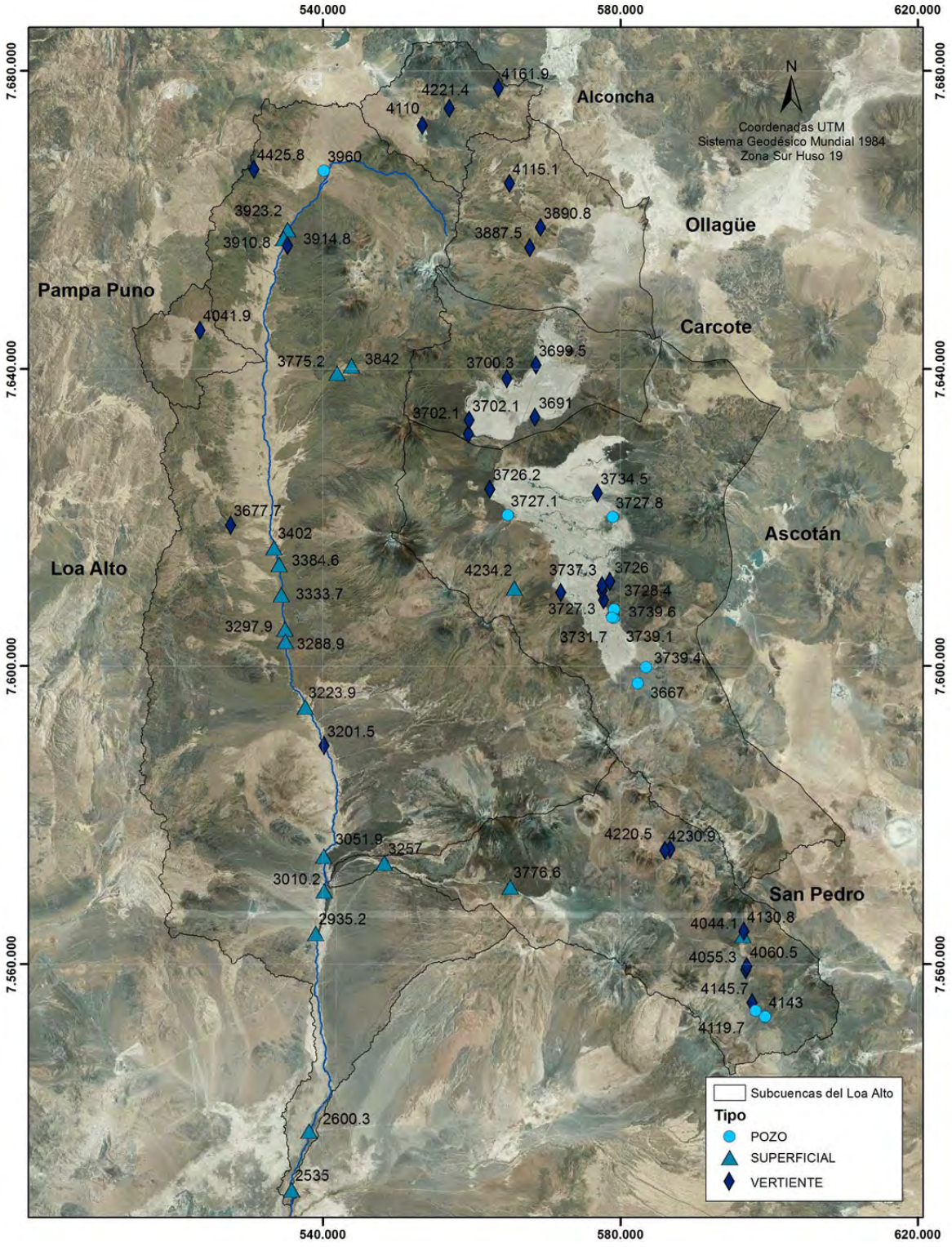


Figura 6-23. Distribución y valores de los niveles de agua medidos en la primera campaña de terreno. Fuente: elaboración propia.

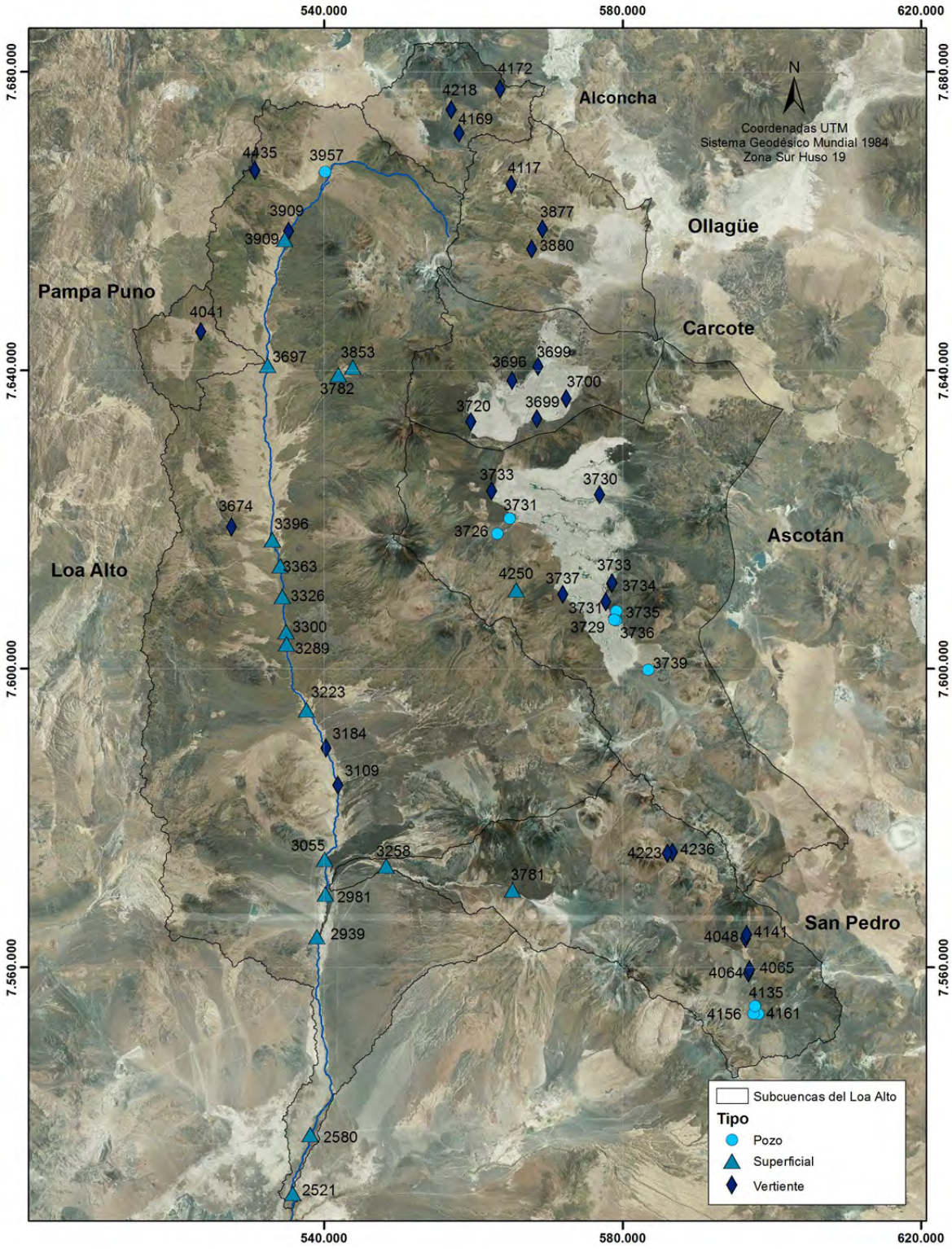


Figura 6-24. Distribución y valores de los niveles de agua medidos en la segunda campaña de terreno. Fuente: elaboración propia.

Para la elaboración de un mapa de líneas de equipotenciales es necesario tener un registro de niveles completo, ya que para trazar una línea de equipotenciales hay que tener al menos dos puntos con la misma presión hidráulica. La baja densidad de puntos medidos en relación con el tamaño del área estudiada tanto en la primera campaña de terreno, como en la segunda, impide la elaboración de un mapa de equipotenciales y, por lo tanto, la actualización de la piezometría existente en el área de estudio. Sin embargo, los niveles de agua tomados en las campañas realizadas permiten deducir direcciones de líneas de flujo de agua subterránea y verificar las isolíneas realizadas en otros estudios en algunos sectores del área de estudio. Antes de continuar con la descripción de los niveles, cabe destacar que no todos los puntos coinciden con el nivel freático, en especial los puntos que corresponden a un nivel de agua superficial. Por lo contrario, los niveles tomados en pozos y vertientes, sí definen una cota del nivel freático.

A continuación se comentan los niveles de agua medidos en cada subcuenca del área de estudio:

- En la subcuenca del salar de Alconcha Se puede observar en la primera campaña que el nivel de la vertiente (4.221 msnm) es mayor a la del propio salar (4.110 msnm). Lo mismo ocurre con los datos de la segunda campaña que en la vertiente es mayor (4218 msnm) y menor hacia el noreste (4169 msnm), por lo tanto se confirma la piezometría realizada por SGA (SGA, 2007) que muestra una dirección del flujo de agua subterránea desde el noreste hacia el suroeste del salar.
- Los niveles de agua medidos en la subcuenca del salar de Ollagüe corresponden a una vertiente en Kosca y dos vertientes en el sector oeste del salar, que fueron medido en ambas campañas de terreno. No se pueden definir equipotenciales pero si se considera la altitud de las vertientes y del salar se puede intuir que las aguas que manan de estas vertientes se dirigen hacia el salar de Ollagüe.
- En la subcuenca del salar de Carcote se tomaron 5 muestras de agua a lo largo del borde del salar, las cuales tienen un rango de cota que oscila entre 3.691 y 3.702 msnm en la primera campaña, y entre 3.696 y 3.720 msnm en la segunda campaña Al ser un rango de 10-30 m se puede considerar que existe una equipotencial que bordea el salar de Carcote, corroborando el mapa de isofreáticas realizado por DICTUC (DICTUC, 2005) en el sector suroeste del salar.

- El registro de mediciones de nivel de agua realizado en la subcuenca del salar de Ascotán presenta un rango de niveles que oscila entre 4.234 msnm a 3.723 msnm en la primera campaña y entre 4.250 msnm a 3.729 msnm en la segunda campaña. Los niveles más altos, en ambas campañas, se localizan en los zonas con cotas más altas, mientas que los niveles más bajos bordean el propio salar. Esto indica que las líneas de flujo presentan una dirección desde las cadenas volcánicas hacia la superficie del salar, comprobando que es una subcuenca endorreica.
- En la subcuenca de Pampa Puno se tomó en la campaña de terreno una muestra de agua en la Vega Sapunta a 4.042 msnm, y el muestreo fue repetido en la segunda campaña (4.041 msnm). Al ser una muestra aislada en una subcuenca, no se puede definir la dirección del flujo de agua subterránea en la subcuenca.
- Se efectuaron 11 mediciones del nivel del agua en ambas campañas en la subcuenca San Pedro, de las cuales 3 son niveles de agua en pozos, una vertiente en una quebrada del volcán Inacaliri, otra del río Siloli, dos en la quebrada Colana y dos del río San Pedro. Se observa en el mapa que los niveles más altos, entre 4.236 msnm y 4.060 msnm, se ubican en el nacimiento del río San Pedro y en las vertientes, mientras que los valores bajos están en el río San Pedro, alcanzando el valor mínimo en la confluencia con río Loa, 3.257 msnm. Por lo tanto, las líneas de flujo se dirigen desde el nacimiento del río San Pedro y sus vertientes hacia la confluencia con el río Loa.
- En el río Loa se han considerado 21 niveles de agua en la primera campaña y 22 en la segunda campaña, una medición de nivel de agua en un pozo en el norte en ambas campañas, 4 vertientes del río Loa y dos en el río Chela en la primera campaña, y 5 vertientes y una en el rio Chela en la segunda campaña. A lo largo del río Loa el nivel del agua de lámina libre varía de 3.960 msnm en el nacimiento a 2.535 msnm en Chiu Chiu en la primera campaña y de 3.957 msnm en el nacimiento a 2.521 msnm en Chiu Chiu en la segunda. En las vertientes siempre el agua se encuentra a mayor cota que el río. De este modo, los datos son insuficientes para definir equipotenciales pero sí permite considerar que las vertientes y el pozo fluyen hacia el rio Loa. De esta manera podemos definir un flujo de las vertientes hacia el rio Loa y de norte a sur según la propia dirección del rio Loa.

7 CARACTERIZACION HIDROQUÍMICA E ISOTÓPICA

Uno de los objetivos fundamentales del proyecto corresponde a la ejecución de dos campañas de muestreo hidroquímico e isotópico. Estas campañas comprenden la obtención de un gran volumen de datos de análisis químicos mayoritarios, minoritarios e isotópicos.

Este capítulo se compone de 7 subapartados, una primera parte que presenta un análisis de la información pre-existente que construye la base de referencia con la que se van a comparar los nuevos datos levantados durante las campañas 2013. A continuación se muestran aquellos parámetros químicos obtenidos *in situ* (con una sonda multiparamétrica) durante la obtención de las muestras para laboratorio: temperatura (ºC), pH, conductividad eléctrica (µS/cm), sólidos disueltos totales (ppm) y oxígeno disuelto (ppm). En el siguiente subapartado se presentan los resultados de laboratorio de ambas campañas, junto a un análisis de la información (análisis estadístico, balance iónico y análisis de los parámetros físico químicos). Posteriomente se realiza el análisis estadístico de los isótopos de la molécula del agua (^{18}O y ^{2}H) y del ^{14}C. A continuación se presenta el tratamiento de los datos mediante su representación en gráficos de tipo Schöeller-Berkaloff, diagramas de correlación y de relaciones isotópicas. El subapartado de calidad ambiental de las aguas muestra la concentración de metales pesados (As, Fe y Al) y de boro presentes en las aguas muestreadas, así como la clasificación de la calidad del agua en función de la guía CONAMA (CONAMA, 2004). Finalmente se concluye con el modelo hidroquímico conceptual de la zona de estudio, según los análisis hidroquímicos realizados durante las etapas previas.

7.1 ANÁLISIS DE INFORMACIÓN PRE-EXISTENTE

La recopilación de información hidroquímica e hidrogeoquímica se ha realizado en los documentos presentados en el apartado de hidroquímica del “Capítulo 2 - RECOPILACIÓN DE ANTECEDENTES”. A continuación se compilan los datos de análisis químicos de agua extraídos de los antecedentes, y se caracteriza la composición hidroquímica de las aguas de las diferentes subcuencas de la zona de estudio mediante diagramas de Piper y mapas de diagramas de Stiff. Se sintetizan los datos obtenidos por otros autores en la zona de estudio para poder ser comparados con facilidad con los datos obtenidos en las dos campañas de terreno del presente trabajo.

A continuación se presentarán los datos recopilados para cada subcuenca de estudio, exceptuando la subcuenca de Ollagüe ya que no se ha encontrado información hidroquímica para esta zona. Los datos recopilados en los antecedentes se presentarán en los Anexos para su mayor sintetización y facilidad de ubicación.

7.1.1 CUENCA DEL SALAR DE ALCONCHA

La cuenca del salar de Alconcha es la situada más al norte de la cuenca del Loa Alto y limita con la parte alta de la cuenca del río Loa y con la cuenca de Ollagüe dentro de la zona de estudio. Las principales características morfométricas y climatológicas son las siguientes:

- altura media: 4.367 msnm
- superficie de la cuenca: 267 km^2
- superficie del salar (Risacher *et al*., 1990): 3,8 km^2
- superficie de la laguna (Risacher *et al*., 1990): 0,5 - 1 km^2
- precipitaciones: 189 mm/año
- evaporación desde el salar: 189 mm/año
- evapotranspiración real (Turc): 167 mm/año
- temperatura media: 1 °C

En la **Figura 7-1** se presenta el diagrama de Piper de 14 muestras, 10 (muestras ASC-) de ellas obtenidas de RISACHER (Risacher *et al*., 1990) y 4 (muestras A- y AS-) de SGA (SGA, 2007). De las cuales 7 corresponden a vertientes (V), 2 a vertientes difusas (VD), 3 a pozos (P), 1 a laguna (L) y 1 a curso superficial (S). Como se puede apreciar, la composición hidroquímica predominante es sulfatada cálcica y en menor medida bicarbonatada-sulfatada-cálcica. La disposición lineal en el diagrama de aniones representa una posible evolución de las aguas carbonatadas-cálcicas, hacia una composición aniónica principalmente sulfatada y una composición catiónica equilibrada entre los cationes calcio, sodio y magnesio en menor parte. El grupo formado por las muestras ALC-V1, A-P8, ALC-VD8 y ALC-VD9, muestras de una vertiente, un pozo y dos vertientes difusas situadas en el salar o su entorno inmediato, representarían la composición de las muestras subterráneas más salinas. La muestra ALC-6 fue tomada en la laguna del salar y tiene una composición clorurada sódica por efecto de la evaporación y/o disolución de halita.

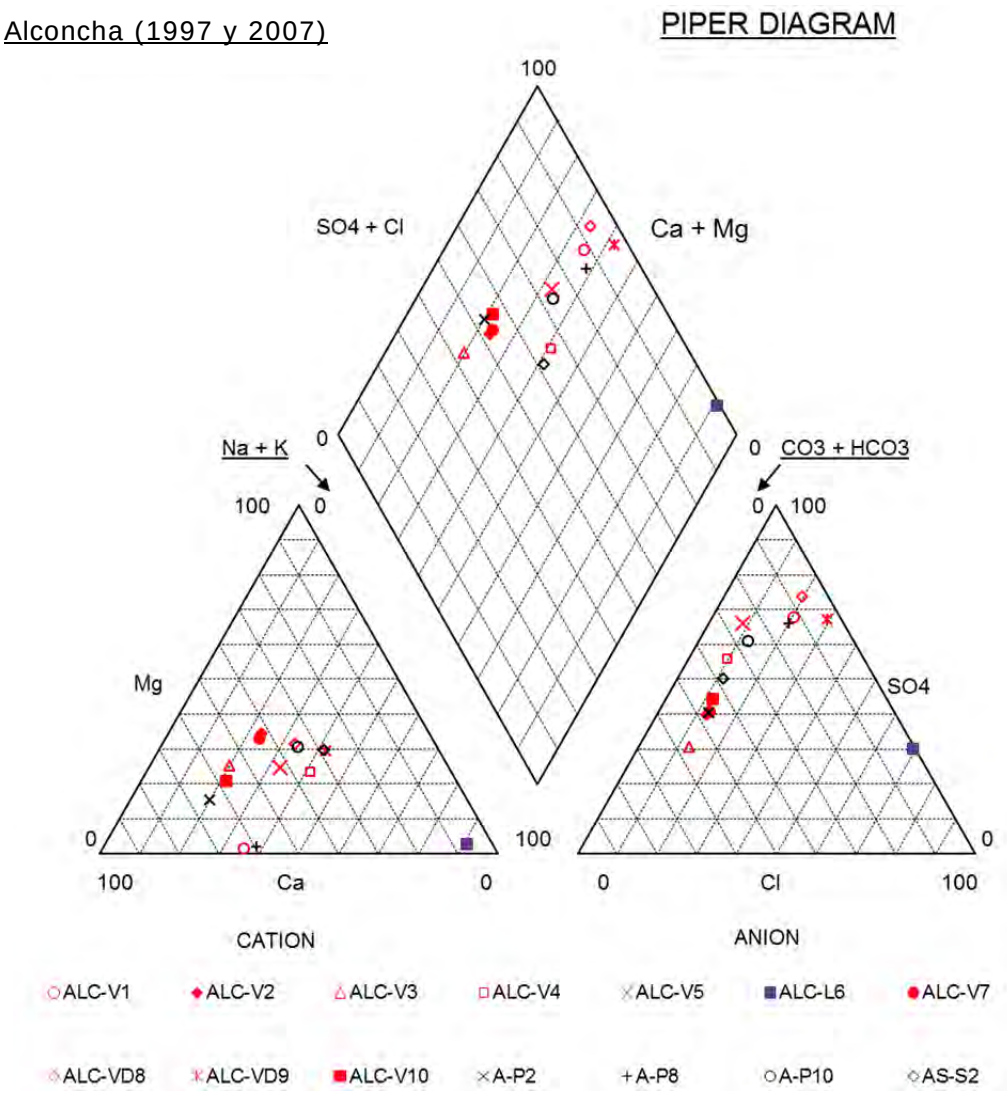


Figura 7-1. Diagrama de Piper de las muestras de la cuenca del Salar de Alconcha. Fuente: modificado de Risacher *et al.*, 1990 y SGA, 2007.

Para realizar el mapa de diagramas de Stiff se han descartado las muestras ALC-L6, ALC-VD8 y ALC-VD9 por tener una CE muy superior al resto con el objetivo de poder representar de forma clara y representativa las aguas aportantes al núcleo del salar de Alconcha. Observando la **Figura 7-2** se aprecian dos marcas hidroquímicas en las aguas aportantes, una marca bicarbonatada-cálcica en la parte sur y sureste con las muestras ALC-v10, ALC-v7, ALC-V2, A-P2 y ALC-V3, y una marca sulfatada cálcico-sódica en la parte norte del salar representada por el resto de las muestras. Todas las muestras están representadas en una escala de 10 meq/l, hecho que denota su baja cantidad de sales disueltas, siendo aguas frescas o muy frescas.

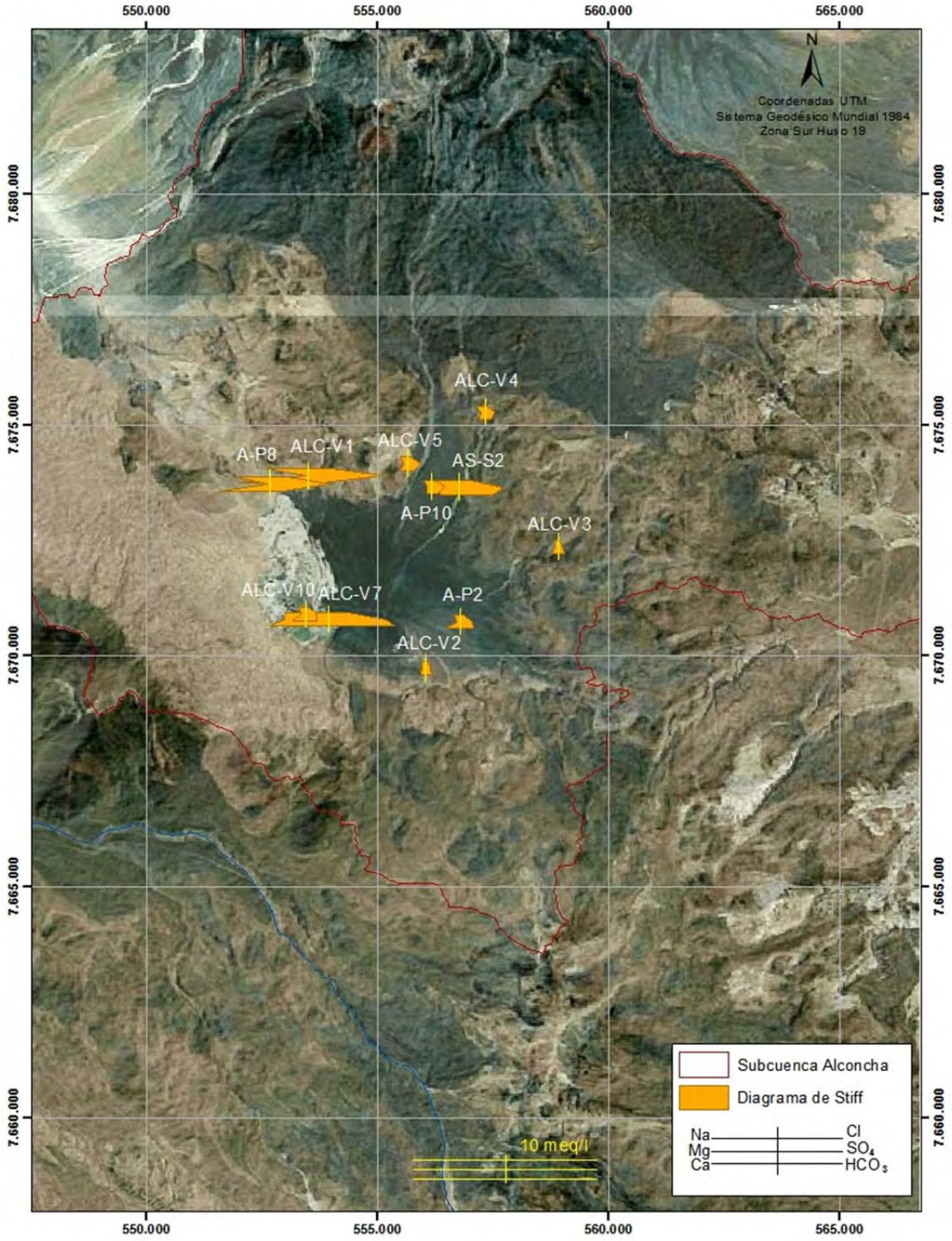


Figura 7-2. Mapa de distribución de diagramas de Stiff de las muestras de la cuenca del Salar de Alconcha. Fuente: modificado de Risacher *et al.*, 1990 y SGA, 2007.

7.1.2 CUENCA DEL SALAR DE CARCOTE

La cuenca del salar de Carcote delimita con la cuenca del salar de Ollagüe, a la derecha con la cordillera altiplánica, al sur con la cuenca de Ascotán y al este con la cordillera formada por los volcanes Chela y Aucalquincha que delimitan el este de la cuenca del río Loa. Las principales características morfométricas y climatológicas son las siguientes:

- altura media : 4.051 msnm
- superficie de la cuenca: 481 km^2
- superficie del salar (*Risacher et al., 1990)*: 108 km^2
- superficie de las lagunas (*Risacher et al., 1990)*: 3 - 4 km^2
- precipitaciones: 148 mm/año
- evapotranspiración real (Turc): 138 mm/año
- temperatura media: 3 °C

En la cuenca del salar de Carcote no hay muchos afloramientos de vertientes con agua fresca, por lo que se hace difícil caracterizar hidroquímicamente el agua aportante al salar, solamente las muestras CAR-V1 y CAR-V2 son aguas con bajo contenido en sales disueltas.

En la **Figura 7-3** se muestra el diagrama de Piper de 24 muestras recopiladas de RISACHER (Risacher *et al.,* 1990), 9 de las cuales son muestras tomadas en vertientes (V), 2 tomadas en vertientes difusas (VD) y 13 muestras de lagunas (L). Como se puede observar, la composición hidroquímica dominante de las muestras es de tipo clorurado sódico, con la excepción de las muestras CAR-V1 y CAR-V2 que son bicarbonatadas-sulfatadas con un repartimiento equitativo entre los aniones de Ca, Na y Mg. Las demás vertientes representadas también tienen una composición claramente clorurada sódica, lo que indica que las aguas antes de salir a la superficie en forma de vertiente ya se han mezclado con agua salobre del salar y/o han disuelto materiales evaporíticos ricos en halita.

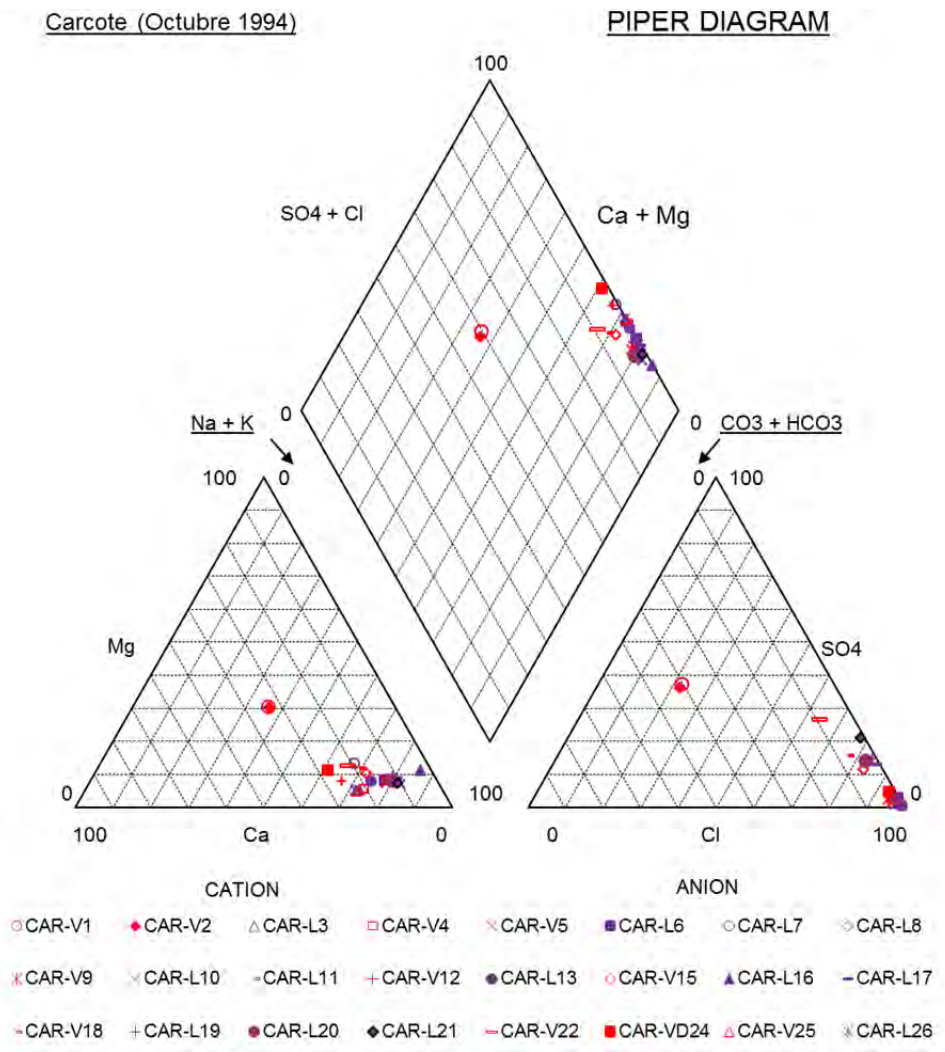


Figura 7-3. Diagrama de Piper de las muestras del salar de Carcote. Fuente: modificado de Risacher *et al.,* 1990.

En la **Figura 7-4** se presenta el mapa de distribución de los diagramas de Stiff. Para poder visualizar correctamente los diagramas se han seleccionado 10 muestras de las 24 totales. Además, se han representado los diagramas de Stiff en dos escalas distintas de 5 y 10 meq/l. Las muestras CAR-V1 y CAR-V2 corresponden a la escala de 5 meq/l por su baja salinidad y el resto a la escala de 50 meq/l. Como se observa en la distribución de los diagramas de Stiff todas las muestras de agua en las inmediaciones del salar son del tipo clorurado sódico. Las muestras de manantiales CAR-V1 y CAR-V2 situadas al noroeste reflejan la composición del agua con muy poca interacción con los materiales por los que circula desde su infiltración, dando una idea del tipo de agua que aporta la cuenca al salar antes de mezclarse con agua salobre y/o de disolver sales con alto contenido en halita.

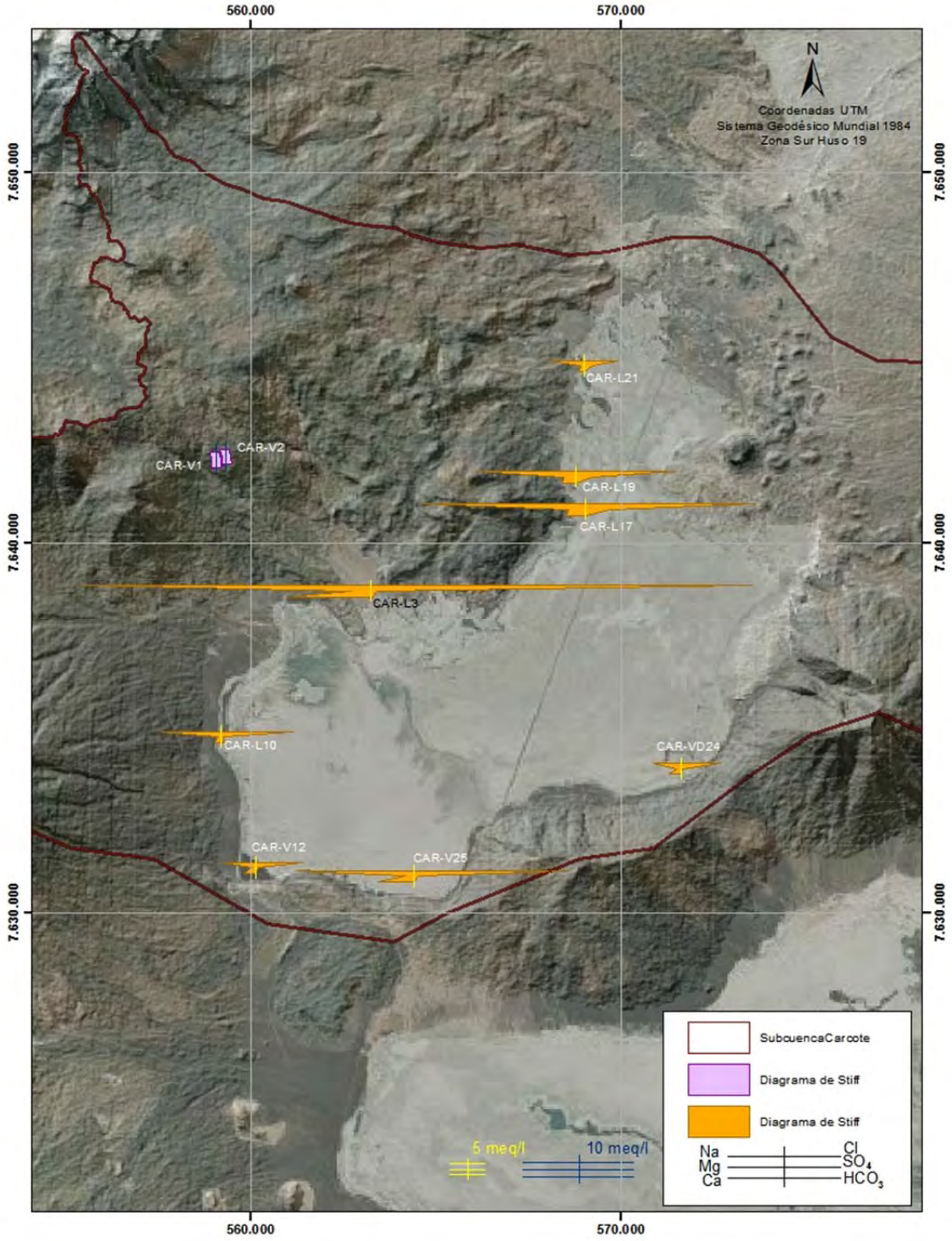


Figura 7-4. Mapa de distribución de diagramas de Stiff de las muestras del salar de Carcote. Fuente: modificado de Risacher *et al.*, 1990.

7.1.3 CUENCA DEL SALAR DE ASCOTÁN

La cuenca del salar de Ascotán se ubica en la cordillera de los Andes, en el sector este del área de estudio. Está limitado por los volcanes Ollagüe, Palpana, el cerro del Azufre y el volcán de Ascotán. Las principales características morfométricas y climatológicas según RISACHER (Risacher *et al*., 1990) son las siguientes:

- Altura media: 4.317 msnm
- superficie de la cuenca: 1.874 km^2
- superficie del salar (Risacher *et al.,* 1990): 243 km^2
- superficie de las lagunas (Risacher *et al.,* 1990): 18 km^2
- precipitaciones: 169 mm/año
- evapotranspiración real (Turc): 150 mm/año
- temperatura media: 2 °C

En la **Figura 7-5** se muestra como 22 de las 26 muestras analizadas tienen una composición claramente clorurada-sódica con un contenido superior al 60% de cloro y sodio. Las muestras diferentes a este grupo mayoritario son la ASV-3, ASV-4, ASV14 y ASP-9, tres muestras obtenidas de vertientes y una de un pozo. La muestra de la vertiente ASV-3 tiene una composición bicarbonatada, con un repartimiento equitativo entre calcio, magnesio y sodio. La muestra ASV-4 tiene una composición sulfatada-magnésica, la ASV-14 tiene una composición bicarbonatada-sódica y la muestra ASP-9 clorurada-bicarbonatada-sódica.

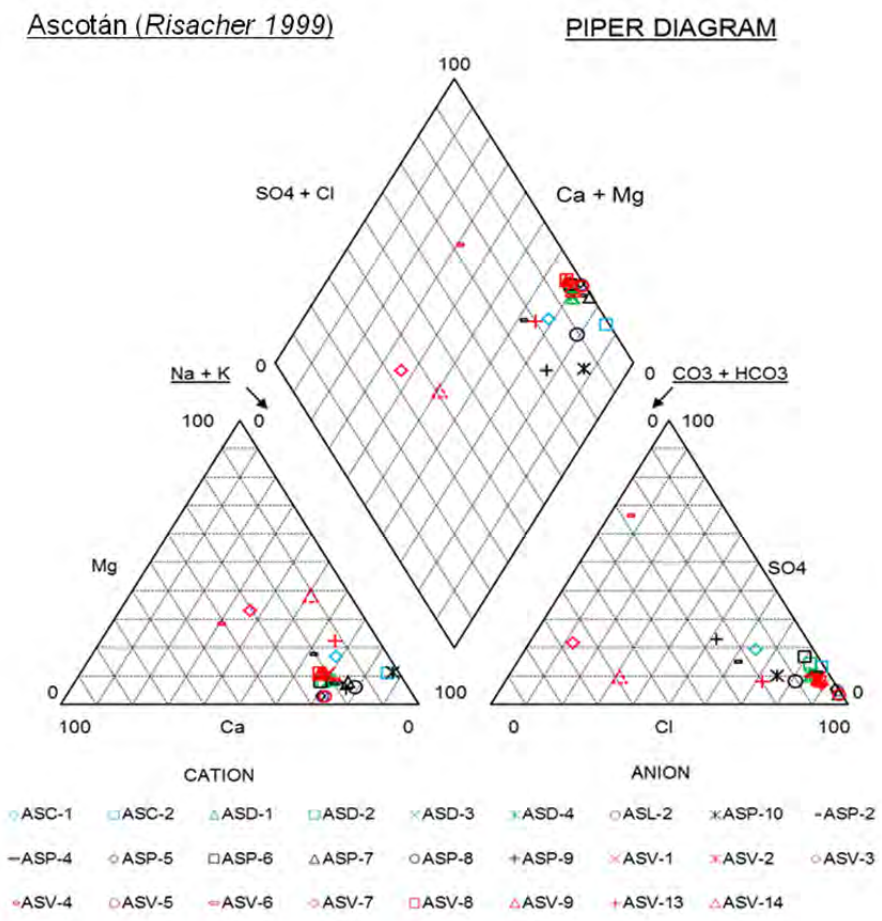


Figura 7-5. Diagrama de Piper de las muestras del Salar de Ascotán. Fuente: modificado de Risacher *et al.,* 1990.

A partir del mapa de distribución de los diagramas de Stiff presentados en la **Figura 7-6**, se puede apreciar la distribución de las diferentes composiciones hidroquímicas mencionadas.

Para poder representar todos los diagramas de Stiff en la **Figura 7-6** se han utilizado 4 escalas de representación, que corresponden a 4 rangos de CE , de 0 a 1500, 1500 a 7000, 7000 a 12000 y superior a 12.000 µS/cm. Al tener el grupo de muestras un rango de contenido en sales disueltas muy amplio, de haber presentado todos los diagramas de Stiff en una misma escala de representación los diagramas con menor CE quedarían en un tamaño inapreciable, mientras de lo contrario los valores de CE medios y altos no cambiarían en el mapa. Las muestras ASV-3, ASV-4, ASV-14, ASP-2 y ASP-9 corresponden al rango de 0 a 1500 µS/cm, las muestras ASV-1, ASV-2, ASV-6, ASV-7, ASV-8, ASV-9, ASV-13, ASP4, ASP-6, ASP-7, ASP-8, ASP-10, ASC-1, ASD-1,

ASD-2, ASD-3 y ASD-4 pertenecen al rango de 1500 a 7000 µS/cm, las muestras ASV-5, ASP-5 y ASL-2 corresponden al rango de 7000 a 13000 µS/cm y por último la muestra ASC-2 que tiene un valor de CE de 122900 µS/cm.

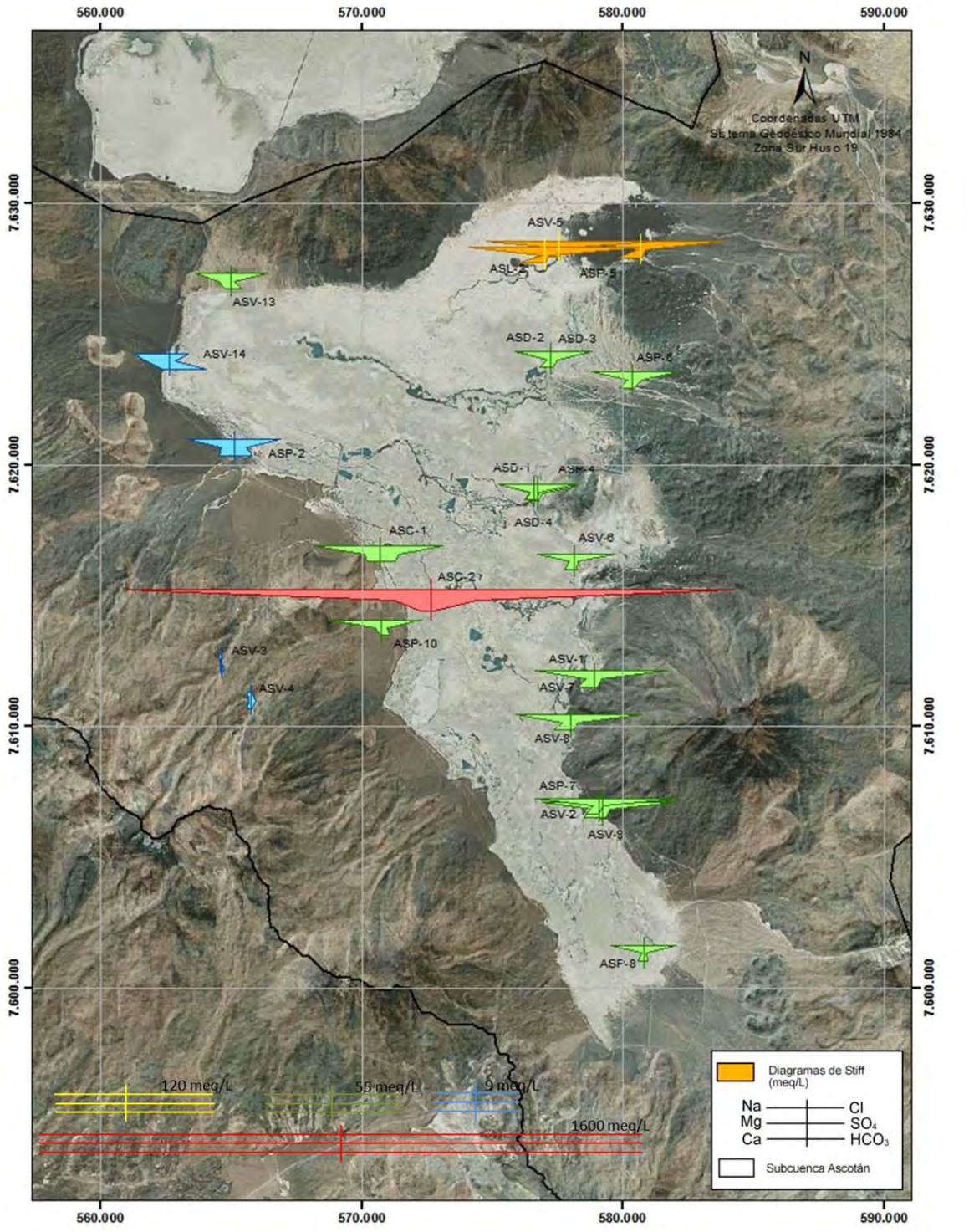


Figura 7-6. Mapa de distribución de diagramas de Stiff de las muestras del Salar de Ascotán. Fuente: modificado de Risacher *et al.*, 1990.

7.1.4 CUENCA DE PAMPA PUNO

En la parte noroeste de la cuenca del Loa Alto se encuentra la cuenca de Pampa Puno. Esta cuenca se encuentra encajada dentro de la cuenca del río Loa y al oeste limita con la divisoria de aguas de la Sierra del Medio. Esta cuenca es de tipo exorreica-arreica, conectada hidrológicamente con la cuenca del río Loa, sin tener un curso de agua superficial continuo aportante al río Loa. Las principales características morfológicas y climáticas son las siguientes:

- Altura media: 4.115 msnm
- Superficie: 143 km^2
- Precipitación media: 161 mm/año
- Evapotranspiración real (Turc) 153 mm/año
- Temperatura media: 3 ºC

En los antecedentes se han encontrado los resultados hidroanalíticos de 9 muestras de agua tomadas en pozos de Pampa Puno, en concreto se han obtenido del informe de monitoreo del Plan de Alerta Temprana de Pampa Puno. En la **Figura 7-7** se representa el diagrama de Piper de las 9 muestras de agua recopiladas y se observa una distribución muy dispersa, sobretodo en la composición de los aniones. Del total de las muestras hay 3 muestras sulfatadas cálcicas, 2 muestras cloruradas cálcicas, 1 muestra bicarbonatada sódica, 2 muestras cloruradas-bicarbonatadas cálcicas y 1 muestra bicarbonatada-sulfatada cálcica.

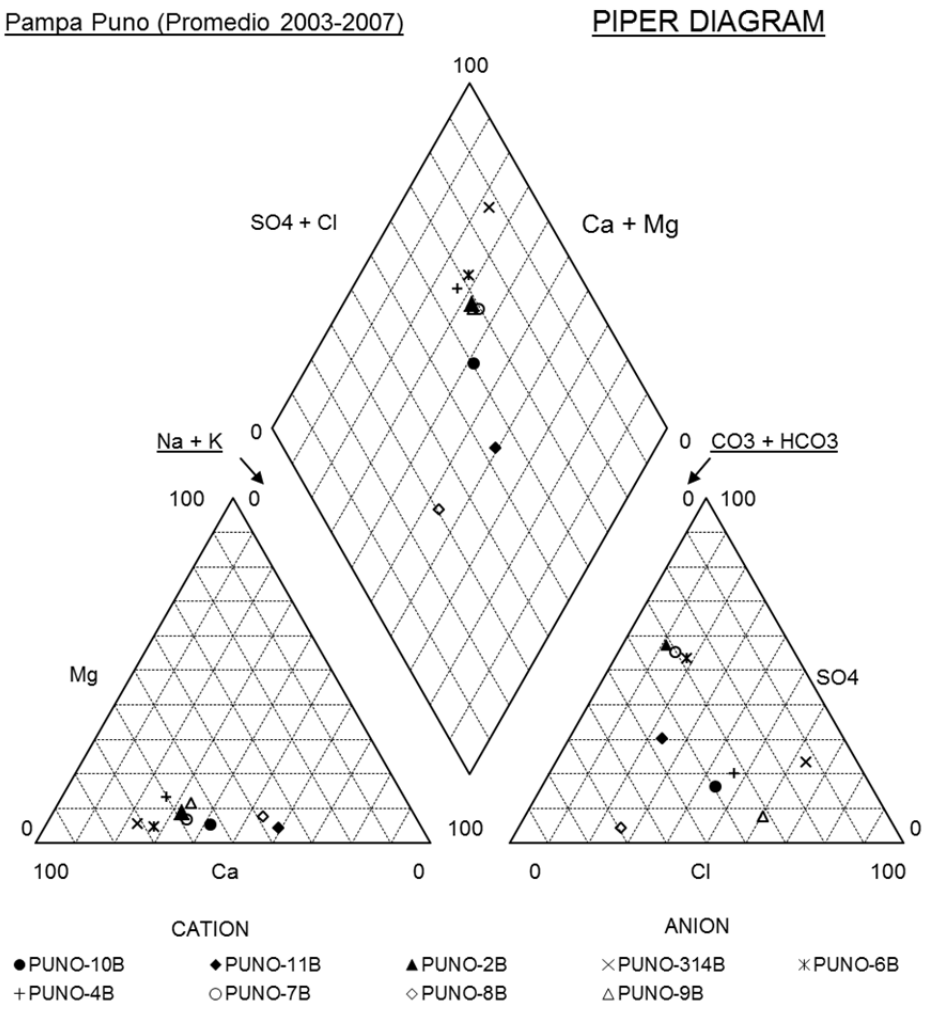


Figura 7-7. Diagrama de Piper de las muestras de Pampa Puno. Fuente: modificado de GP, 2007.

En la **Figura 7-8** se representa el mapa de diagramas de Stiff de 9 muestras de pozos en la cuenca de Pampa Puno. Todas las muestras representadas tienen una escala de 5 meq/l, denotando un bajo contenido en sales disueltas. Al observar la distribución de los diagramas se pueden diferenciar tres zonas con composiciones hidroquímicas similares. Un grupo situado al norte formado por las muestras PUNO-9B, PUNO-10B y PUNO-4B con una composición clorurada cálcica, al sur un grupo formado por las muestras PUNO-2B, PUNO-7B y PUNO-6B con una composición sulfatada cálcica. En la parte central las muestras PUNO-11B y PUNO-8B forman el tercer grupo con una composición bicarbonatada sódica.

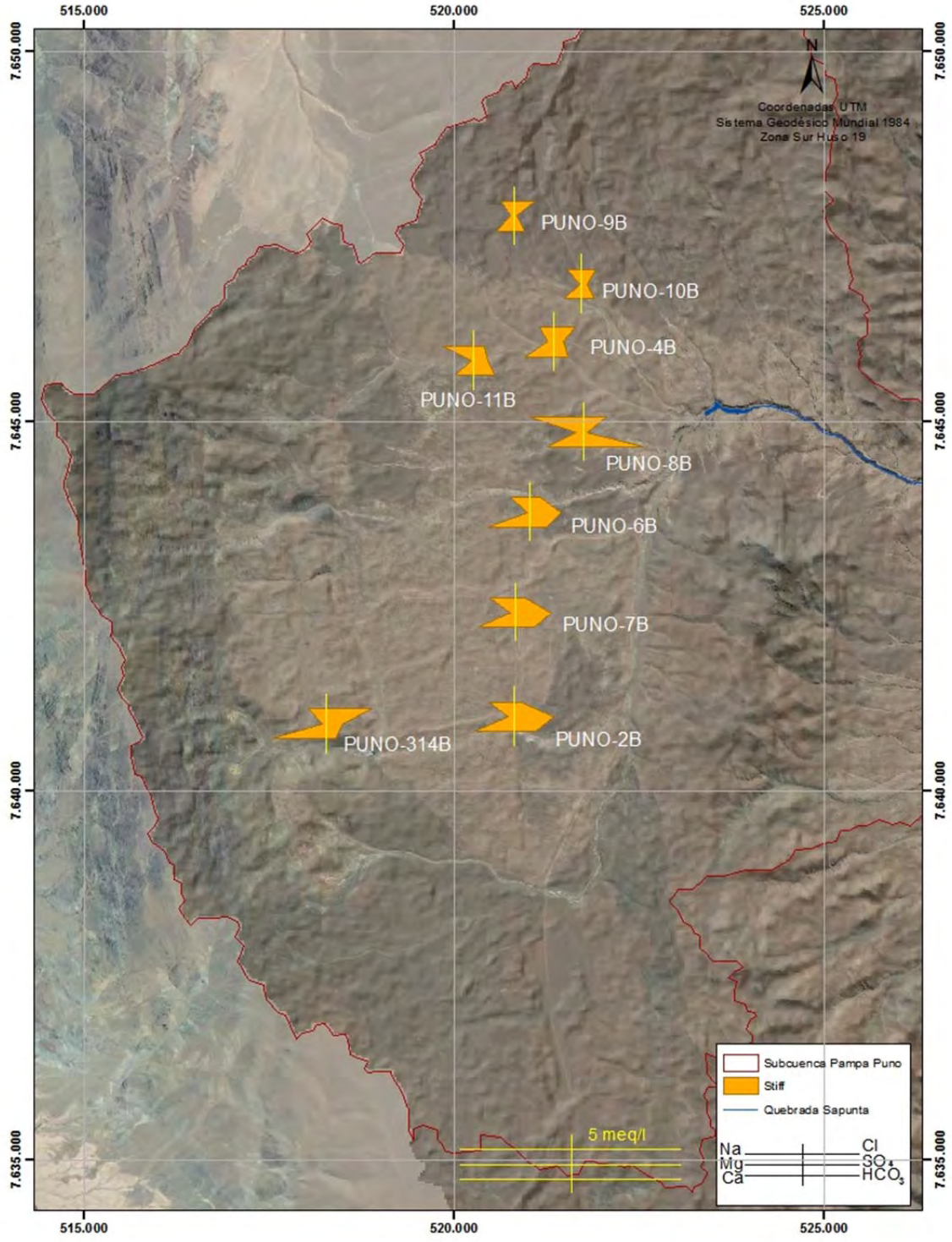


Figura 7-8. Mapa de distribución de los diagramas de Stiff de las muestras de pozos Pampa Puno. Fuente: modificado de GP, 2007.

7.1.5 CUENCA DEL RÍO SAN PEDRO

La cuenca del río San Pedro se localiza en el sector sureste del área de estudio y se encuentra limitada al norte por los volcanes San Pedro y San Pablo y el volcán Inacaliri, mientras que al sur se ubican el cerro del León y el volcán Paniri. Las principales características morfológicas y climáticas son las siguientes:

- Altura media: 4.317 msnm
- Superficie: 1.054 km^2
- Precipitación media: 175 mm/año
- Evapotranspiración real (Turc) 153 mm/año
- Temperatura media: 1 ºC

En la **Figura 7-9** se muestran las composiciones hidroquímicas en el gráfico de Piper de 2 muestras de agua superficial del río San Pedro, en la estación de aforo y en el sifón, recopiladas en el informe ARAVENA y SUZUKI (Aravena y Suzuki, 1990). En este diagrama se observa que ambas muestras tienen una composición química similar, su clasificación no es clara pero se puede considerar bicarbonatada clorurada sódica.

Los diagramas de Stiff que se observan en la **Figura 7-10** verifican que son dos muestras similares químicamente y que no domina fuertemente ningún elemento.

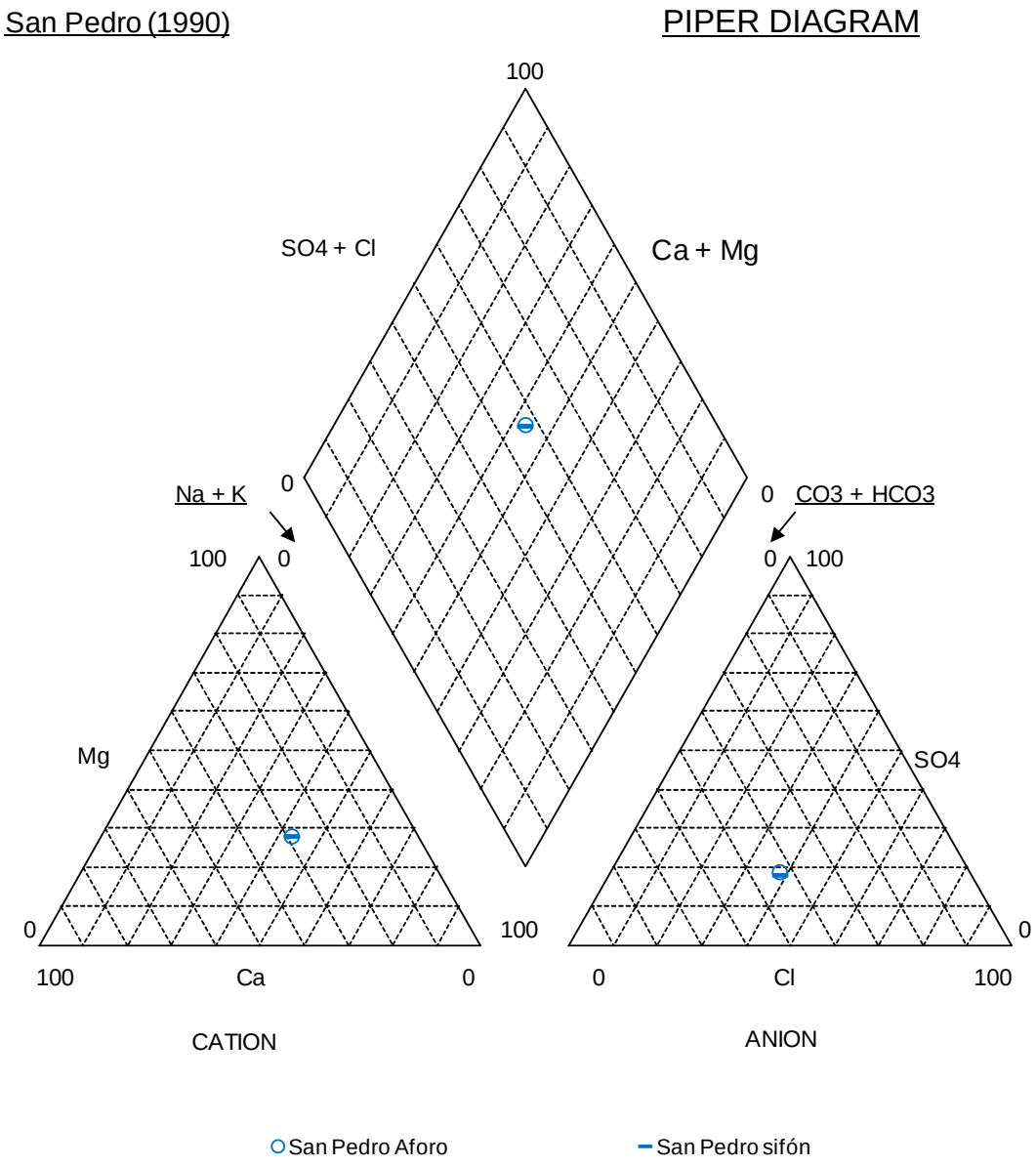


Figura 7-9. Diagrama de Piper de las muestras de San Pedro. Fuente: modificado de Aravena y Suzuki, 1990.

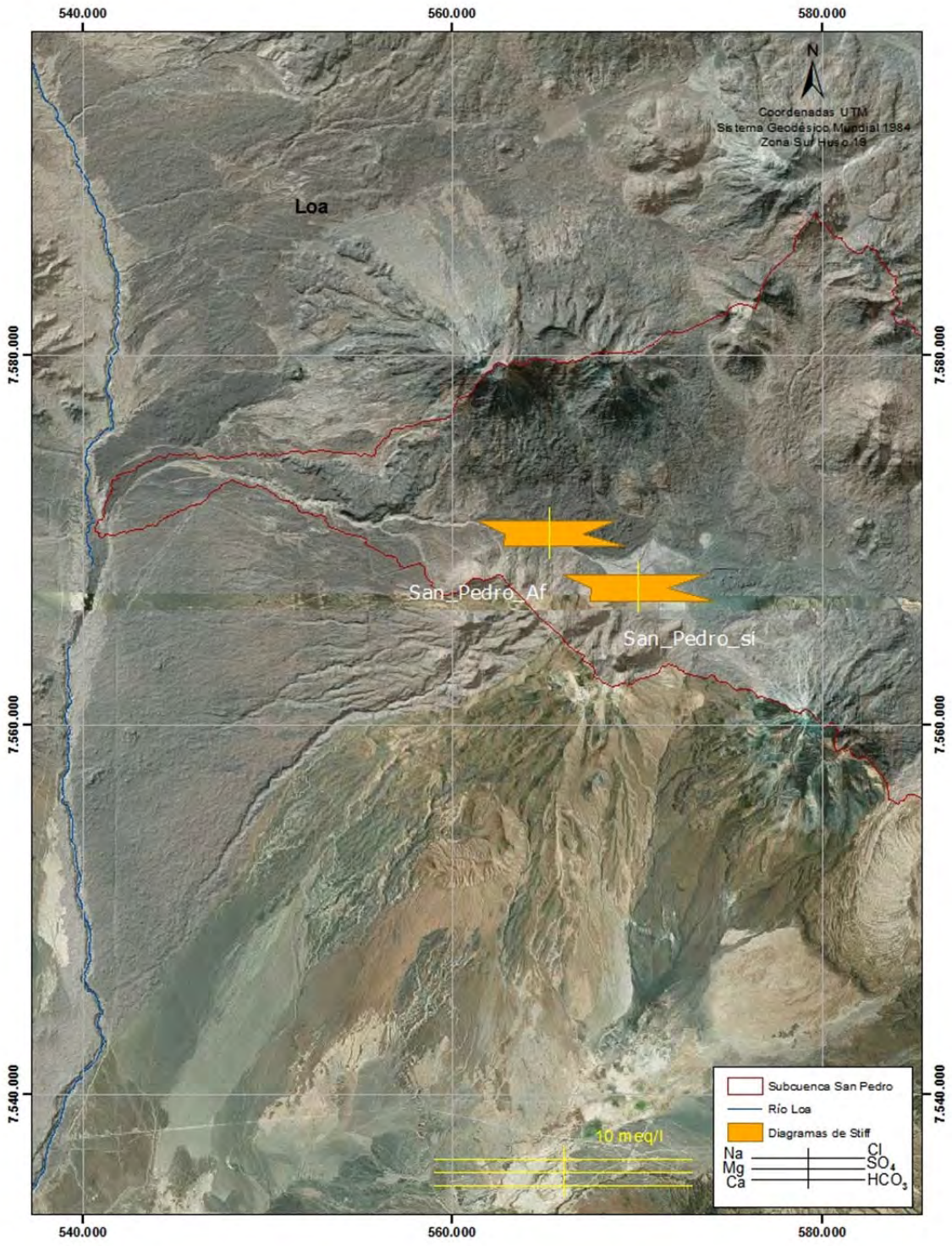


Figura 7-10. Mapa de distribución de diagramas de Stiff de las muestras del San Pedro. Fuente: modificado de Aravena y Suzuki, 1990.

7.1.6 CUENCA DEL RÍO LOA

La cuenca del río Loa ocupa el sector central y principal del área de estudio, se encuentra separando la Sierra del Medio de la cordillera de los Andes. El río Loa recorre 150 km desde su nacimiento hasta Chiu Chiu. Las principales características morfológicas y climáticas son las siguientes:

- Altura media: 3.845 msnm
- Superficie: 4.434 km^2
- Precipitación media: 126 mm/año
- Evapotranspiración real (Turc) 117 mm/año
- Temperatura media: 4 ºC

En el diagrama de Piper de la **Figura 7-11** se muestran 7 composiciones químicas recopiladas del informe de ARAVENA y SUZUKI (Aravena y Suzuki, 1990) y 8 composiciones químicas del informe de FCAB (FCAB, 2003). Las 9 muestras son aguas superficiales tomadas del río Loa, una en la Turbera y 5 en pozos. Todas las muestras del informe de ARAVENA y SUZUKI (Aravena y Suzuki, 1990) presentan una composición química similar menos la muestra tomada en Lequena. En general son aguas superficiales de tipo cloruro-sódicas, excepto la muestra de Lequena que es sulfatada sódica. Sin embargo, las muestras analizadas en el informe de FCAB (FCAB, 2003) en los pozos son aguas bicarbonatadas, presentando variaciones en el catión dominante, exceptuando la muestra del pozo PPE-2 que se considera muestra contaminada. Las muestras de agua superficiales de Lequena y Quinchamali son de tipo clorurada bicarbonatada sódico-cálcicas, mientras que la muestra de la Turbera es sulfato bicarbonatada cálcica. En el informe de FCAB (FCAB, 2003) se indica que todos los resultados de los análisis químicos, exceptuando la muestra de Turbera, tienen un error en el balance iónico mayor al 13%.

En la **Figura 7-12** se presenta un mapa con la distribución de los diagramas de Stiff a lo largo del río Loa desde Lequena hasta Chiu Chiu, cuya escala es de 15 meq/l. Estos diagramas reflejan la composición de las 15 muestras analizadas en los dos informes compilados, en color rosa las muestras del informe de FCAB (FCAB, 2003) y el amarillo del estudio de ARAVENA y SUZUKI (Aravena y Suzuki, 1990).

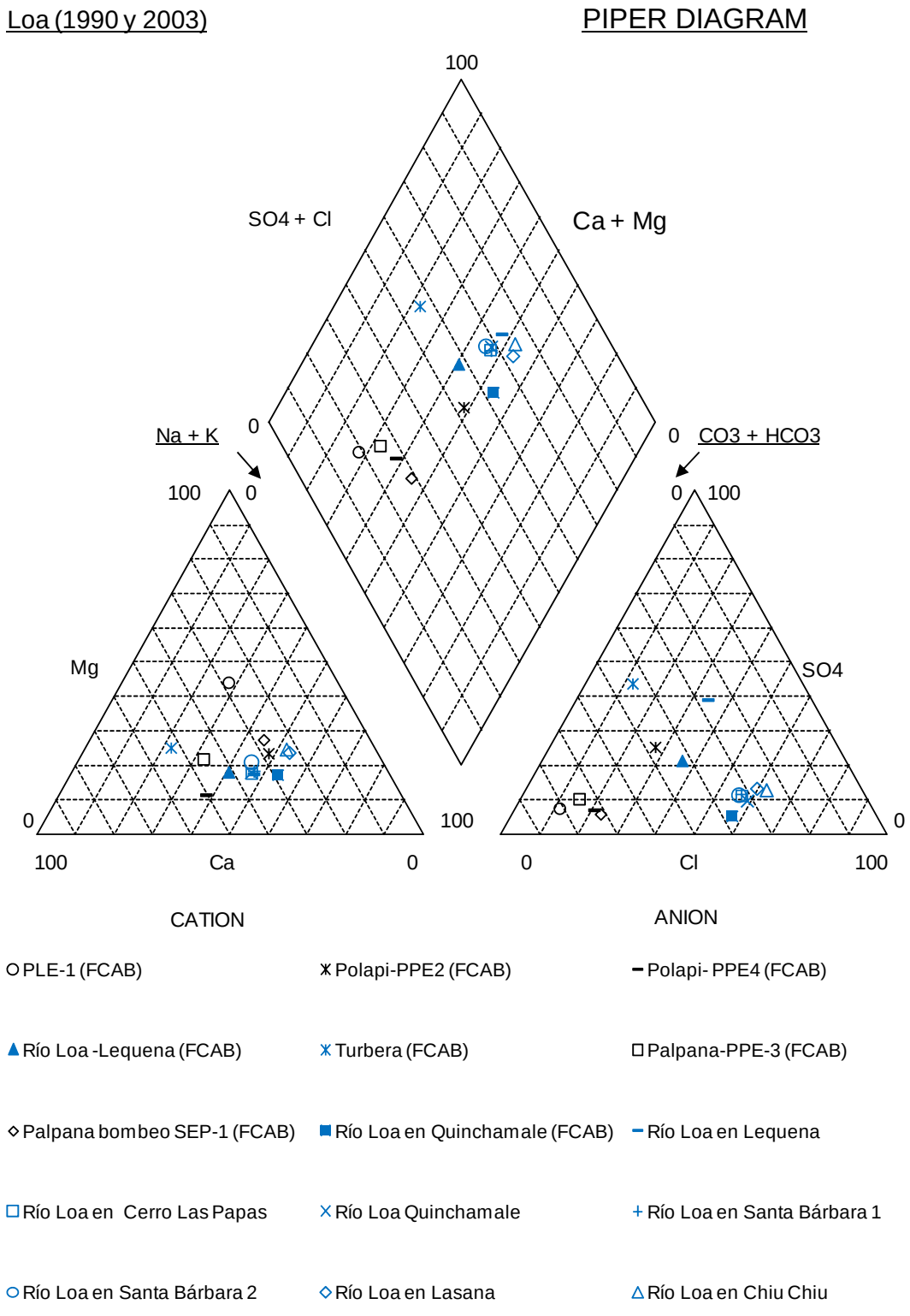


Figura 7-11. Diagrama de Piper de las muestras del río Loa. Fuente: modificado de Aravena y Suzuki, 1990 y FCAB, 2003.

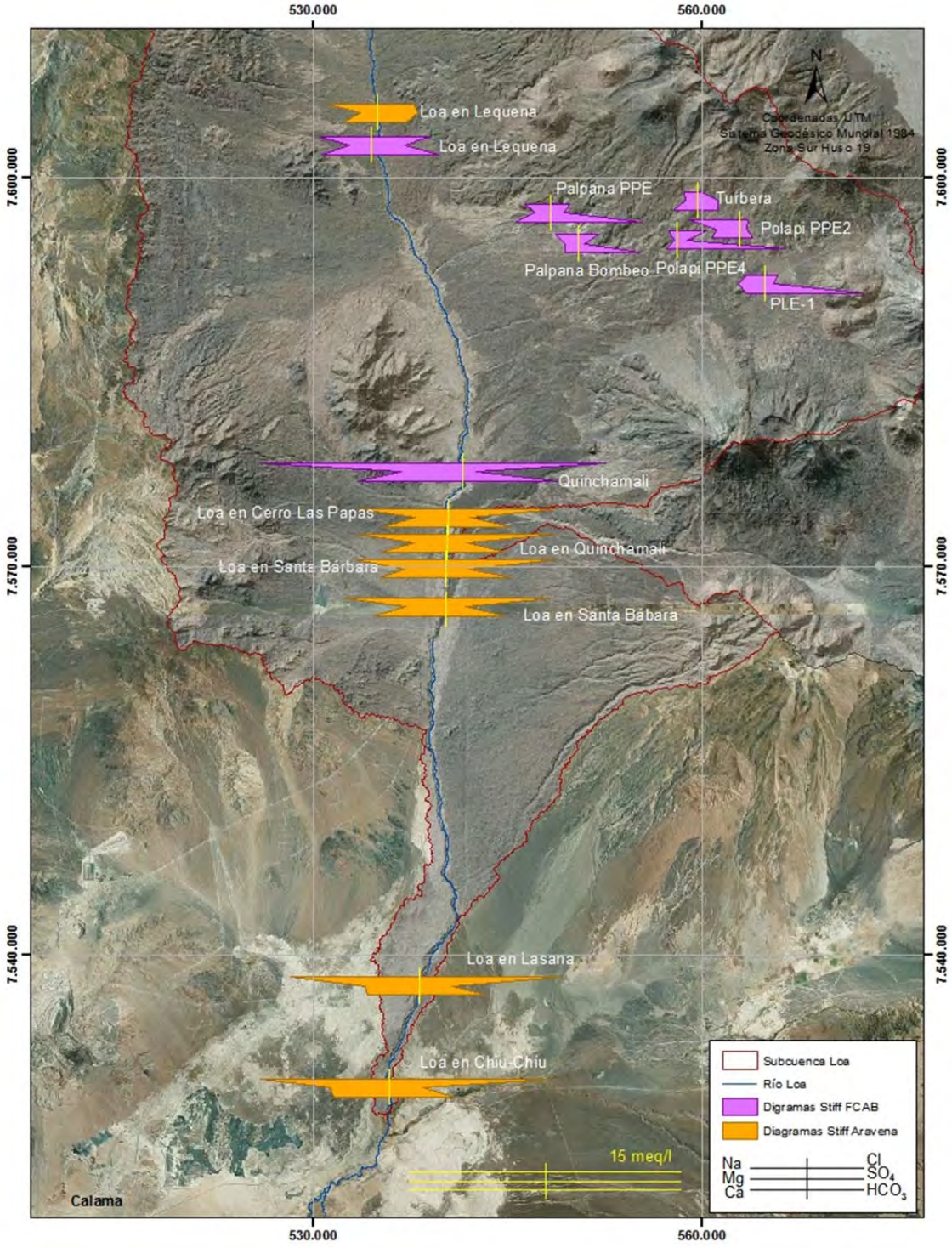


Figura 7-12. Mapa de distribución de diagramas de Stiff de las muestras del río Loa. Fuente: modificado de Aravena y Suzuki, 1990 y FCAB, 2003.

7.1.7 CARACTERIZACIÓN HIDROQUÍMICA PRECIPITACIÓN

En el ciclo geoquímico las sustancias se transportan en diferentes medios y fases hasta finalizar el ciclo y volver a iniciarlo. Por lo tanto, la composición química de las aguas subterráneas está definida principalmente por la interacción con tres medios: la interacción que se produce entre el agua de lluvia con la atmósfera, las precipitaciones con el suelo y de la interacción agua-roca.

Al conocer la composición química tanto del agua de lluvia que infiltra a la cuenca como la del agua subterránea, se puede comparar y estimar si existe disolución y/o precipitación en el suelo o zona no saturada, descomposición de la materia orgánica, meteorización y descomposición de las rocas, precipitación o disolución de minerales, intercambio iónico. Todo lo anterior se produce para buscar el equilibrio entre el agua subterránea y los materiales geológicos que atravieza, o mezcla de aguas de diferentes composiciones químicas. Es importante conocer el tiempo de residencia del agua subterránea para estimar las reacciones químicas posibles, y de este modo identificar el fenómeno y/o medio en el que produce.

El análisis de la composición química de las precipitaciones proporciona la información necesaria para determinar el origen del agua que infiltra y recarga el sistema hidrogeológico de la cuenca. Es decir, las aguas de lluvia de origen marino presentan un elevado contenido en cloruros, sin embargo la concentración de sales depende de la distancia al mar, la dirección del viento, intensidad y duración de la precipitación, entre otros aspectos. Sin embargo, hacia el interior del continente domina el anión SO_4^{2-}, y más lentamente pasa a dominar el catión Ca^{2+}(Custodio y Llamas, 2001). En la región hay efecto en el contenido de sulfatos del agua de recarga por deposición atmosférica y reciclado de materia en suspensión (Acosta *et. al.* 2013).

En el informe de RISACHER (Risacher *et al.* 1999) se presenta la composición química de 9 muestras de nieve comprendidas entre las cotas 3.800 y 4.700 m, en la I y III Región, **Tabla 7-1**. Las muestras NEV-7 y NEV-8 se ubican en el salar del Huasco, aproximadamente a 90 km al norte del nacimiento del río Loa, mientras que el resto de muestras se ubican próximas al volcán Ojos del Salado, en torno a 500-600 km del nacimiento de río Loa. Las muestras son tomadas de nieves antiguas exceptuando las muestras NEV-5 y NEV-7 que son nieves frescas.

En la **Figura 7-13** se muestra el diagrama de Schöeller-Berkaloff de la composición química de las muestras analizadas en el informe de RISACHER (Risacher *et al.* 1999). En este diagrama se ha empleado una escala mayor que en el resto de diagrama de Schöeller-Berkaloff para mostrar la diferencia de la composición hidroquímica de las 7 muestras. Al interpretar este diagrama se aprecia que generalmente las muestras presentan mayor concentración de SO_4^{2-} que de Cl^-, exceptuando la muestra NEV-5, y mayor concentración de Na^+ que de Cl^-, exceptuando las muestras NEV-3, NEV-5 y NEV-7. Por lo tanto, se clasifican las muestras como aguas sulfatadas sódico-cálcicas, menos la muestra NEV-5 que se clasifica como agua clorurada sódica. Cabe destacar que el error del balance iónico es de -15 a 90%, esto puede deberse a la baja mineralización que tiene el agua de lluvia y que la imprecisión de las herramientas del laboratorio no detecte la baja concentración de los elementos químicos de las muestras. De todos modos las muestras NEV-1, NEV-2, NEV-3 y NEV-4 tienen un error absoluto en el balance iónico menor al 20%. Una vez se ha corregido el balance con la carga correspondiente a la concentración de protones calculada a partir del pH.

Estas muestras de nieve son aguas con baja mineralización que según ACOSTA *et al.*(ACOSTA, 2013) el mayor valor de SO_4^{2-} que de Cl^- es debido a la recirculación de sales locales y generación local por las emanaciones volcánicas residuales.

Muestra	pH	ALC	Cl^-	Br^-	I^-	SO_4^{2-}	NO_3^-	Si	As	Na^+	K^+	Li^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	STD
NEV-1	4,36	-0,043	0,53	0,004	0,0011	2,69	0,99	0,06	0,03	0,37	0,11	nd	0,33	0,083	5,5
NEV-2	4,53	-0,04	0,75	0,0071	0,0019	3,26	nd	0,1	0,013	0,62	0,051	nd	0,33	0,024	5,2
NEV-3	4,01	-0,083	0,64	0,0106	0,0011	4,51	0,56	0,09	0,016	0,32	0,07	nd	0,29	0,073	6,6
NEV-4	4,81	-0,013	1	0,0078	0,0011	13,2	0,87	1,4	0,034	1,1	0,28	0,002	3,8	0,97	23
NEV-5	5,53	0,003	0,89	0,0063	0,0011	0,48	0,25	0,03	0,001	0,53	0,13	nd	0,35	0,039	3,1
NEV-6	5,37	0,003	0,11	0,0016	0,0006	0,288	nd	0,1	0,068	0,25	0,02	nd	0,015	0,004	1
NEV-7	4,46	-0,033	0,25	nd	0,002	1,82	0,87	nd	0,0019	0,16	0,12	nd	0,26	0,061	3,5
NEV-8	5,02	0,006	0,11	0,0029	0,0011	0,48	0,12	nd	0,0003	0,16	0,16	nd	0,18	0,029	1,6
NEV-9	5	0,01	0,18	0,0018	0,0008	0,384	0,06	nd	0,0017	0,28	0,039	nd	0,2	0,017	1,8

ALC = alcalinidad en meq/l.

STD = sales totales disueltas en mg/L (Calculado).

Otros componentes en mg/L.

nd = no detectado.

Tabla 7-1 Composición química de las muestras de nieve. Fuente: Risacher *et al.,* 1999.

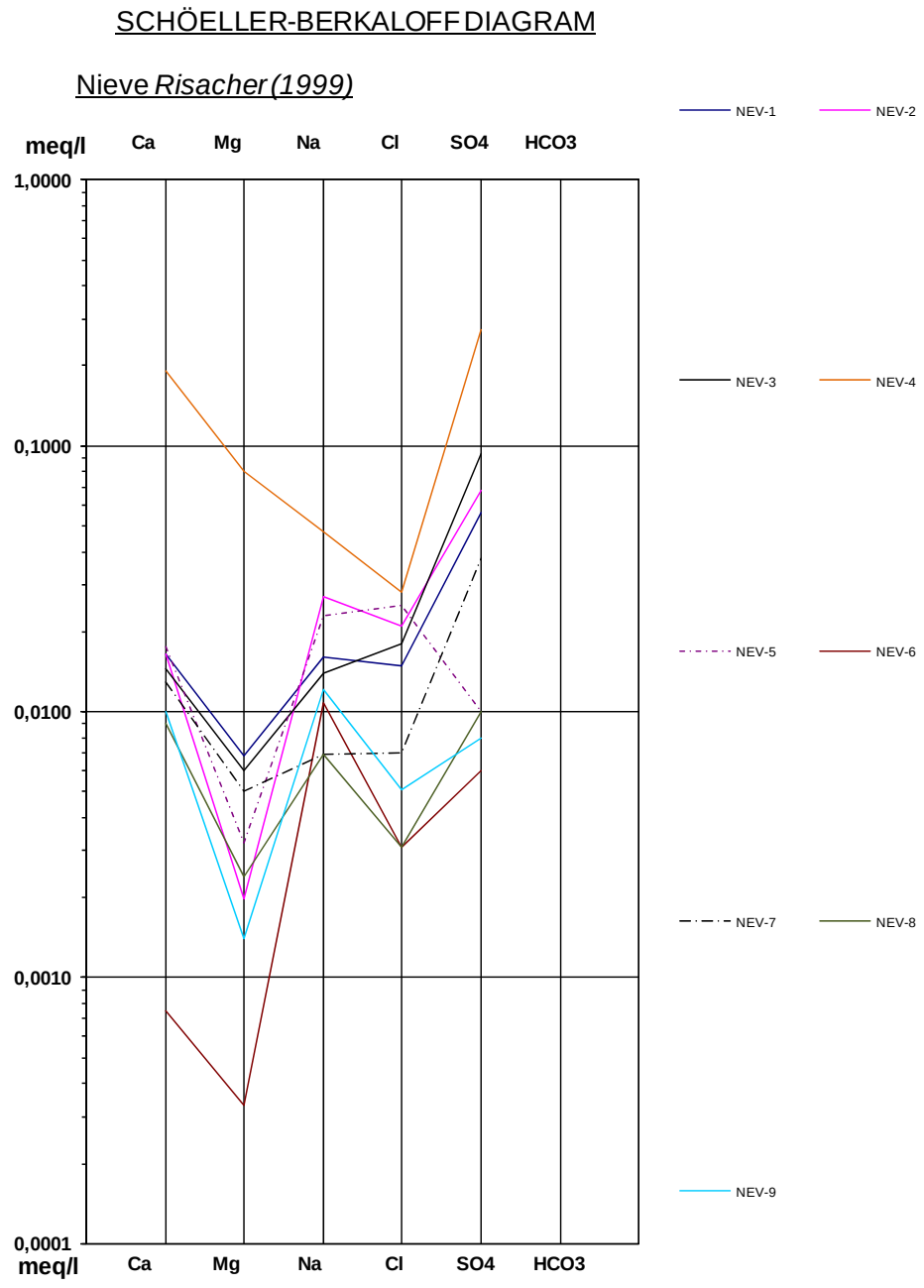


Figura 7-13 Diagrama de Schöeller-Berkaloff de la composición química de las muestras. Fuente: elaboración propia.

7.1.8 ISÓTOPOS ^{18}O Y ^{2}H

A continuación se presentan los datos de la composición isotópica de la molécula de agua de las muestras recopiladas en el informe *"Isotopic Evolution of River Water in the Northern Chile Region*" de Aravena, R. y Suzuki, O. publicado en Water Resources Research en el año 1990 y en la tesis doctoral de Mardones, L.*"Flux et évolution des solutions salines dans les systèmes hydrologiques des salars d´Ascotán et d´Atacama".* En la **Figura 7-14** se grafican los valores del ^{2}H y de ^{18}O para representar la composición isotópica de la molécula del agua en relación con la Recta Meteórica Mundial y la Recta Meteórica Local.

En este gráfico las tres líneas corresponden a la Línea Meteórica Mundial (LMM), la Línea Meteórica Local (LML) definida por ARAVENA y SUZUKI (Aravena y Suzuki, 1990) y la recta del coeficiente de correlación de las muestras de agua de lluvia.

Las muestras analizadas por MARDONES (Mardones, 1998) son aguas de lluvia y se han diferenciado por la época en que se producen a lo largo del año. De este modo, las precipitaciones sucedidas en verano se agrupan en un rango de ^{2}H de 1,5 ‰ a -80 ‰ y de ^{18}O de 0 a -10 ‰, mientras que las precipitaciones de invierno presentan un rango de ^{2}H de -80 ‰ a -100 ‰ y de ^{18}O de -10 a -15 ‰. Por la tanto, las precipitaciones de verano, que se producen en el invierno altiplánico procedentes del océano Atlántico, presentan un exceso de deuterio sobre la LMMM. Según APPELO y POSTMA (Appelo y Postma, 2009) el mayor exceso de deuterio que la Línea Meteórica Mundial puede indicar una contribución de agua evaporada en un clima árido con una relativa baja humedad en la atmósfera o una agua de lluvia evaporada durante la precipitación y/o infiltración. Efecto atribuible al transporte transamazónico de las borrascas de origen atlántico. Para una mejor comparación se ha representado la LMM con exceso de deuterio d=15‰ con traza discontinua y color verde.

En cambio, las muestras analizadas por ARAVENA y SUZUKI (Aravena y Suzuki, 1990) se distribuyen por el área de estudio y la cuenca del río Salado. A partir de las diferencias de la composición isotópica del agua a lo largo del río Loa desde Lequena hasta el río Salado, el río San Pedro, el río Salado y varios manantiales existentes en la zona de estudio se identifican áreas de recarga y procesos que han sufrido las aguas superficiales y subterráneas. Los datos del río Loa se encuentran por debajo de la Línea Meteórica Local; según ARAVENA y SUZUKI (Aravena y Suzuki, 1990) este enriquecimiento isotópico puede ser causado por la evaporación ocurrida antes y durante la infiltración en las zonas

de recarga. En este informe se indica que la composición isotópica de las aguas en la represa de Lequena es similar a la composición del manantial en el Inacaliri, es decir, de altitudes altas mientras que aguas abajo de Lequena son más afines isotópicamente a las aguas que fluyen en Taira. Sin embargo, desde el vado Santa Bárbara y el embalse Conchi el agua presenta un enriquecimiento isotópico, probablemente sea por la combinación de la confluencia de las aguas pesadas del río San Pedro y a una pequeña evaporación en el propio embalse Conchi.

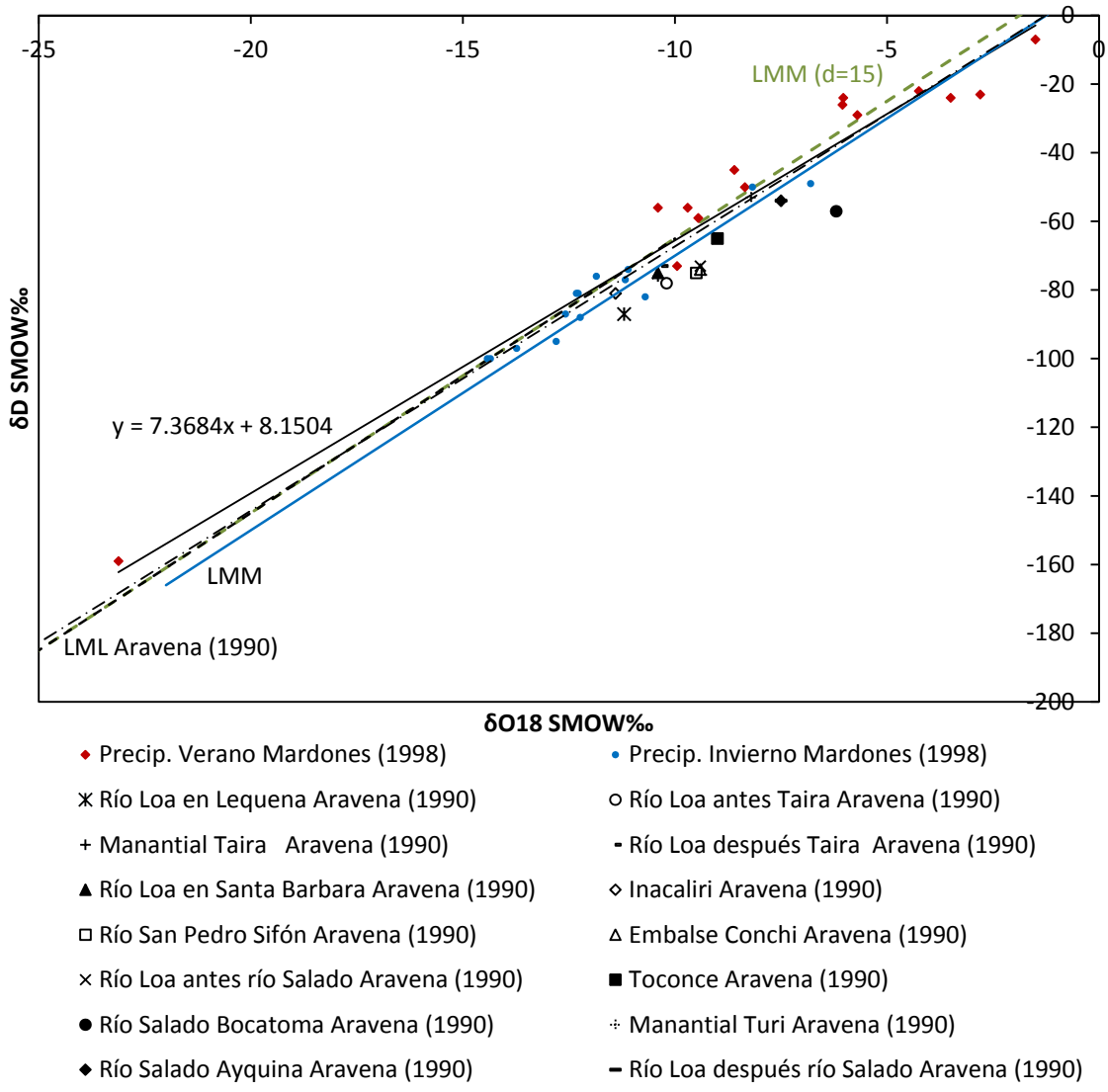


Figura 7-14. Gráfico δ^2H y $\delta^{18}O$ de los datos compilados. Fuente: elaboración propia.

7.1.9 ISÓTOPOS ^{13}C

El análisis del isótopo estable ^{13}C que se presenta a continuación se basa en los datos recopilados en el informe de MARDONES (Mardones, 1998) y de ARAVENA y SUZUKI (Aravena y Suzuki, 1990). El estudio del ^{13}C del CID (Carbono Inorgánico Disuelto) es útil para verificar los modelos geoquímicos de transferencia de masa de carbono a lo largo de líneas de flujo y ayuda a identificar el origen de las aguas superficiales.

En la **Figura 7-15** se muestra un gráfico con la composición isotópica de $\delta^{13}C$ ‰ (PDB) y $\delta^{18}O$ ‰ (PDB) de las muestras analizadas por MARDONES (Mardones, 1998). Las muestras han sido tomadas en diferentes subcuencas de la zona de estudio y de aguas tanto superficiales como subterráneas. Del salar de Ascotán se han obtenido los datos de 4 vertientes y 2 pozos en el borde este del salar, mientras que 1 vertiente y 1 pozo en el borde oeste, y 1 pozo en la quebrada de la Perdiz; en la cuenca de San Pedro se han tomado muestras del pozo CHU-10 y de un dren; y del río Loa en Lequena y Quinchamali.

En general estas muestras se agrupan en dos conjuntos según la composición isotópica de $\delta^{13}C$ ‰ del CID (PDB) y $\delta^{18}O$ ‰ del CID (PDB). Uno de los grupos corresponde a las muestras tomadas en el río Loa y en el pozo CHU-10 de la cuenca de San Pedro que presenta valores de $\delta^{13}C$ comprendidos entre 0 y +2 ‰ y de $\delta^{18}O$ entre -6 y -10 ‰, y el segundo grupo lo conforman el resto de muestras exceptuando ASB-20 y V-Polapi. Este segundo grupo se encuentra en un rango de $\delta^{13}C$ que varía entre -2 y -10 ‰ y de $\delta^{18}O$ entre -7 y -15 ‰.

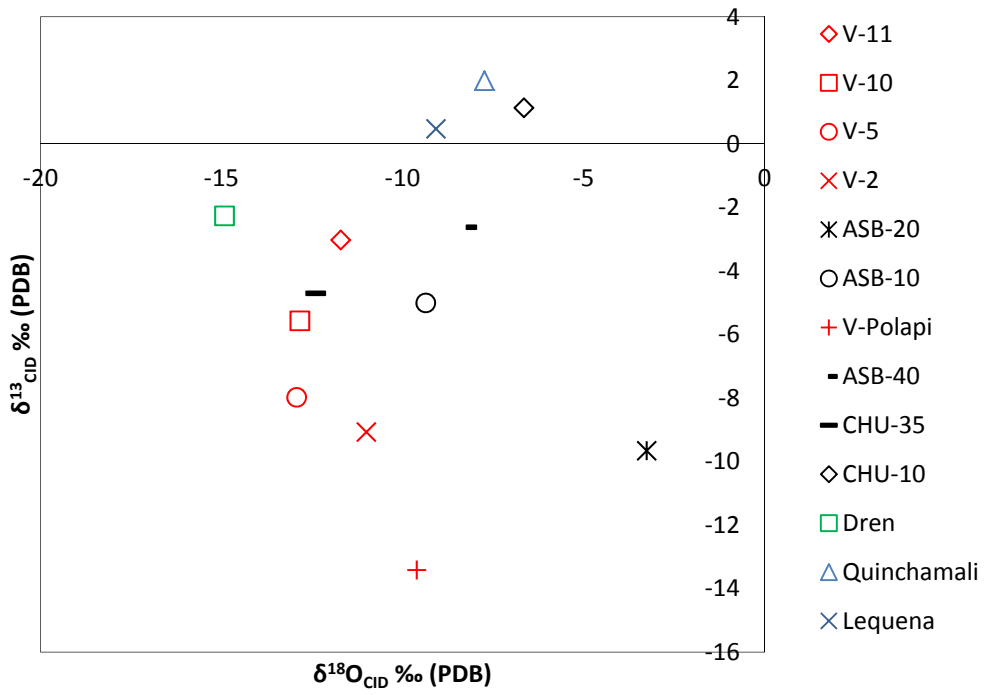


Figura 7-15. Gráfico de composición isotópica de $\delta^{13}C$ y $\delta^{18}O$. Fuente: modificado de Mardones, 1998.

En la **Figura 7-16** se presenta el gráfico de los valores de $\delta^{13}C$ en función de la profundidad del borde del salar de Ascotán. Aunque en este perfil isotópico faltan los datos del tramo de 0,225 a 0,275 m de profundidad según el informe de MARDONES (Mardones, 1998) el primer tramo del perfil, de 0 a 0,225 m de profundidad, corresponde a una capa de yeso y carbonato, mientras que en el tramo de 0,275 a 0,725 m son arcillas carbonatadas y yeso.

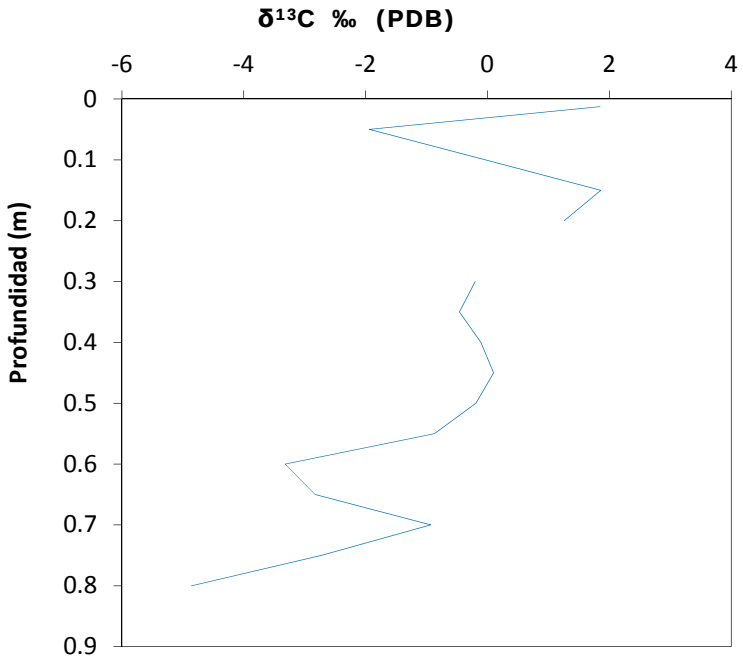


Figura 7-16. Gráfico de la relación $\delta^{13}C$ y la profundidad en el salar de Ascotán. Fuente: modificado de Mardones, 1998.

La **Figura 7-17** expone la relación de la composición de $\delta^{13}C$ respecto a la alcalinidad de las muestras recopiladas del informe de ARAVENA y SUZUKI (Aravena y Suzuki, 1990). Estas muestras de aguas superficiales se encuentran en un rango de ^{13}C comprendido entre -7 ‰ y +7 ‰, siendo generalmente el valor dominante $\delta^{13}C$ + 3 ‰ y un valor de alcalinidad (TAC) de 6 a 8 meq/l. Los valores negativos de $\delta^{13}C$ corresponden a las muestras tomadas en la cuenca del río Salado, cuenca que se incluye en el estudio del Loa Alto.

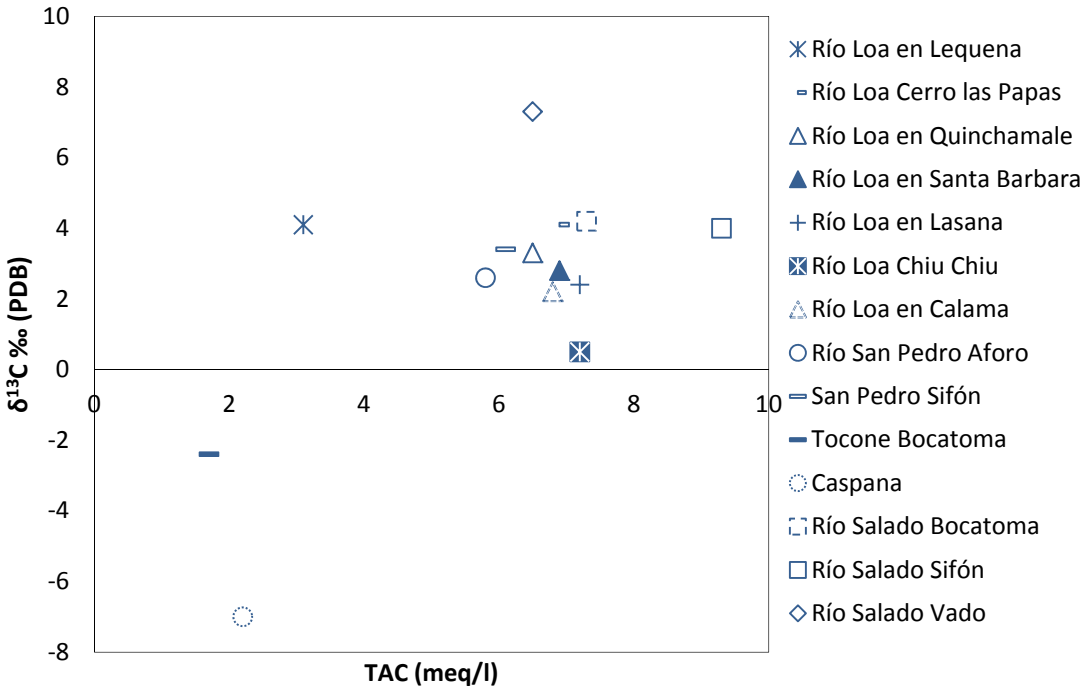


Figura 7-17. Gráfico de la relación $\delta^{13}C$ y Alcalinidad en muestras de agua superficiales. Fuente: modificado de Aravena y Suzuki, 1990.

El primer punto de muestreo se ubica en el río Loa en Lequena con un valor de ^{13}C de +4,3 ‰ , posteriormente aguas abajo a la altura del cerro las Papas disminuye a +4,1 ‰ . Este valor desciende a $\delta^{13}C$ +3,3 ‰ en Quinchamali y alcanza el +2,8 ‰ en el vado Santa Bárbara. Según el autor del informe, esta tendencia refleja un intercambio isotópico de carbono entre el CID del río Loa y el CO_2 atmosférico. Desde Lasana a Chiu Chiu el valor de $\delta^{13}C$ desciende de +2,4 a +0,5 ‰ debido según ARAVENA y SUZUKI (Aravena y Suzuki, 1990) a un efecto de la actividad agrícola existente en este sector. En cambio, las dos muestras tomadas en la cuenca de San Pedro presentan un valor de ^{13}C +3,4 y +2,6 ‰ . En este informe se plantean varias hipótesis para justificar estos valores de la subcuenca del río San Pedro, siendo la meteorización de silicatos y la posible disolución de minerales de carbonato secundarios los causantes. Sin embargo, también plantea la posibilidad de la circulación de agua a través de las áreas geotérmicas y/o con el transporte por los fluidos geotérmicos como un gas y/o compuesto disuelto, donde el dióxido de carbono liberado de una cámara magmática superficial y/o de poros cerrados ricos en gases volcánicos también podría contribuir CO_2 volcánico hacia el agua subterránea. Esta evolución de la composición isotópica de ^{13}C a lo largo del río Loa se

muestra en la **Figura 7-18.** En este gráfico también se presenta en Quinchamale, embalse Conchi y Lasana la deposición de carbonatos.

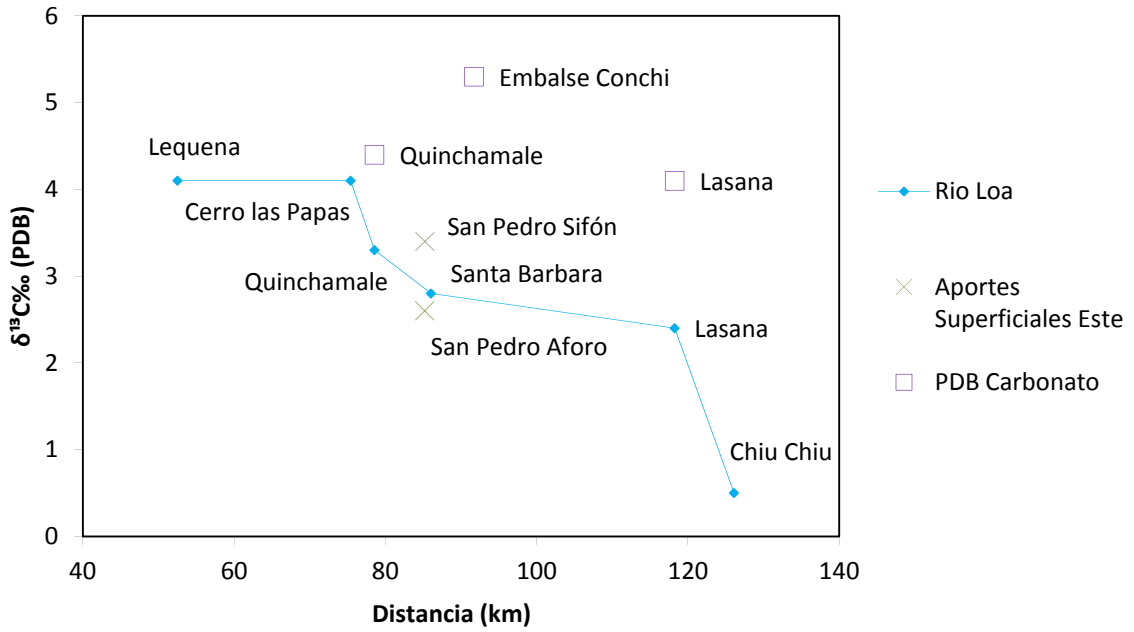


Figura 7-18. Evolución de la composición de $\delta^{13}C$ a lo largo del río Loa. Fuente: modificado de Aravena y Suzuki, 1990.

7.2 PARÁMETROS DE TERRENO

Se presentan los valores y el análisis de los parámetros *in situ* recogidos en las dos campañas de terreno que se han realizado; la primera en octubre de 2013 y la segunda en diciembre de 2013. Los parámetros medidos en los puntos de agua accesibles son la temperatura (ºC), el pH, la conductividad eléctrica (µS/cm), los sólidos totales disueltos (ppm) y el oxígeno disuelto (ppm). Los datos se obtuvieron mediante la utilización de una sonda multiparamétrica modelo HI-9828 de la casa comercial Hanna Instruments. En la **Figura 7-19** se muestra una fotografía del equipo utilizado.

Figura 7-19. Sonda multiparamétrica HI-9828. Fuente: elaboración propia.

Los puntos de agua en los que se midieron los parámetros *in situ* son aguas superficiales y subterráneas, estas últimas se muestrearon tanto en pozos como en vertientes.

En la **Tabla 7-2** se presentan los valores de los parámetros obtenidos en el terreno de la primera campaña y en la **Tabla 7-3** los correspondientes a la segunda campaña.

Subcuenca	Nombre	T (°C)	pH	CE (µS/cm)	SDT (ppm)	OD (ppm)
Ascotán	1-LAP	18,90	7,20	1.590	795	-
Ascotán	2-LAP	25,50	7,70	3.890	1.945	0,62
Ascotán	3-LAP	25,80	8,30	7.137	3.599	0,25
Ascotán	4-LAP	30,00	7,90	5.707	2.898	17,70
Ascotán	5-LAP	23,10	7,30	6.773	3.386	1,50
Ascotán	6-LAV	14,20	7,50	6.884	3.442	4,95
Ascotán	7-LAV	21,60	7,10	7.064	3.532	2,92
Ascotán	8-LAV	19,90	7,20	7.065	3.533	2,81
Ascotán	9-LAV	24,30	7,30	6.642	3.321	3,14
Ascotán	10-LAP	43,40	6,80	4.950	2.475	1,18
Ascotán	11-LAP	34,70	6,70	2.416	1.208	1,73
Ascotán	13-LAV	25,40	8,40	4.161	2.080	7,85
Ascotán	14-LAV	17,20	7,30	1.254	627	5,28
Carcote	15-LAV	14,30	7,30	124.700	62.360	2,41
Carcote	16-LAV	13,50	7,30	18.760	9.381	3,06
Carcote	17-LAV	12,80	6,90	28.610	14.310	3,17
Carcote	18-LAV	21,70	7,30	2.167	1.084	3,52
Carcote	19-LAV	16,20	7,20	23.670	11.840	4,39
Ollagüe	20-LAV	7,80	7,10	214	107	7,30
Ollagüe	21-LAV	23,90	7,20	418	209	5,65
Ollagüe	22-LAV	15,10	7,10	279	140	7,46
Alconcha	23-LAV	13,10	5,90	1.406	703	6,96
Alconcha	24-LAV	20,90	6,80	452	226	4,32
Loa	25-LAS	10,20	7,40	932	466	9,15
Loa	26-LAS	10,70	7,10	1.340	670	7,87
Loa	27-LAS	15,70	7,20	1447	723	6,60
Loa	29-LAV	18,90	7,10	1.809	904	6,97
Loa	28-LAS	19,70	6,80	488	244	6,11
Loa	30-LAS	20,30	7,10	3.196	1.598	6,02
Loa	32-LAS	10,60	7,30	3.104	1.552	9,89
Loa	33-LAS	16,10	7,50	2.908	1.454	10,67
Loa	34-LAS	16,90	7,70	2.929	1.464	8,38
Alconcha	35-LAV	19,80	7,30	215	107	4,26
Alconcha	36-LAV	20,60	7,70	583	292	3,08
Loa	37-LAV	13,90	6,80	1.617	808	6,11
Loa	38-LAS	21,40	7,20	2.601	1.301	5,30
Loa	39-LAV	23,10	7,00	933	466	3,67
Loa	40-LAS	15,70	7,50	405	203	3,47
Loa	41-LAV	9,70	7,20	619	310	4,40
Pampa Puno	42-LAV	19,70	7,20	1.315	658	3,51
Loa	43-LAV	13,10	7,00	524	262	4,92
Loa	44-LAS	15,70	7,50	1.200	600	7,11
Loa	45-LAS	15,30	7,80	1.310	655	5,59
Loa	46-LAS	14,40	7,80	1.112	556	5,54
Loa	47-LAS	20,50	7,60	2.052	1.026	6,41
San Pedro	48-LAS	16,70	8,10	1.758	879	6,57
San Pedro	49-LAV	20,70	7,10	620	310	4,86
San Pedro	50-LAV	25,10	7,30	394	197	1,78
San Pedro	51-LAV	17,40	8,10	291	146	3,46
San Pedro	52-LAV	20,00	7,40	112	56	2,97
San Pedro	53-LAV	30,20	7,10	1.181	590	1,85
San Pedro	54-LAV	22,70	7,90	466	233	2,71
San Pedro	55-LAS	24,80	7,10	1.427	714	3,26
Ascotán	56-LAV	18,80	7,10	4.054	2.027	4,14
Ascotán	57-LAS	12,30	7,20	223	111	2,05
Loa	61-LAS	11,50	7,20	492	246	2,90
Carcote	PT-1	15,50	7,20	10.510	5.254	3,37
Carcote	PT-2	17,70	6,70	11.820	5.908	2,73
Ascotán	PT-3	16,80	7,50	8.211	4.104	1,35
Loa	PT-4	16,50	7,20	1.475	737	7,85
Loa	PT-6	20,50	7,60	2.052	1.026	6,41
Loa	PT-7	22,30	7,50	929	465	4,20
Loa	PT-8	17,90	7,10	832	416	3,99

Tabla 7-2. Parámetros de terreno medidos en 63 muestras durante la primera campaña de terreno, octubre de 2013. Donde “T” es temperatura; “CE” es Conductividad Eléctrica; “SDT” son los Sólidos Disueltos Totales; “OD” es Oxígeno Disuelto. Fuente: elaboración propia.

Subcuenca	Nombre	T (°C)	pH	CE (µS/cm)	SDT (ppm)	OD (ppm)
Ascotán	1-LAP2	15,16	7,40	1.316	658	0,75
Ascotán	2-LAP2	21,84	7,32	3.484	1.742	0,61
Ascotán	3-LAP2	25,16	7,53	6.528	3.264	0,32
Ascotán	4-LAP2	26,44	7,51	5.339	2.670	0,42
Ascotán	5-LAP2	21,78	8,40	5.828	2.914	0,01
Ascotán	6-LAV2	19,33	8,52	5.723	2.862	0,20
Ascotán	8-LAV2	23,38	8,20	6.101	3.051	0,12
Ascotán	9-LAV2	25,26	7,85	5.650	2.825	0,19
Ascotán	11-LAP2	32,48	6,85	2.206	1.103	0,65
Ascotán	13-LAV2	16,44	8,76	3.584	1.792	0,44
Ascotán	14-LAV2	11,42	6,85	1.022	511	1,21
Carcote	18-LAV2	23,29	7,79	2.183	1.091	0,29
Ollagüe	20-LAV2	15,33	8,33	286	143	0,22
Ollagüe	21-LAV2	11,37	9,87	491	246	0,23
Ollagüe	22-LAV2	15,72	7,77	257	129	0,19
Alconcha	23-LAV2	12,84	5,96	1.458	729	0,41
Alconcha	24-LAV2	20,93	7,21	491	246	0,29
Loa	25-LAS2	11,87	8,00	1.086	543	3,49
Loa	26-LAS2	11,91	6,92	1.365	683	4,58
Loa	27-LAS2	17,22	7,15	1.533	766	5,19
Loa	28-LAS2	17,30	7,33	593	296	7,75
Loa	29-LAV2	19,56	7,00	1.862	931	5,00
Loa	30-LAS2	20,11	6,81	3.179	1.590	1,48
Loa	32-LAS2	15,73	8,38	2.895	1.448	0,31
Loa	33-LAS2	17,97	7,26	3.026	1.513	2,36
Loa	34-LAS2	20,73	7,17	3.111	1.555	4,36
Alconcha	35-LAV2	18,77	7,67	305	153	0,32
Loa	37-LAV2	13,97	6,71	1.870	935	0,70
Loa	38-LAS2	15,98	6,88	2.780	1.390	1,05
Loa	39-LAV2	23,59	6,95	1.057	529	0,57
Loa	40-LAS2	21,37	8,01	287	143	0,40
Loa	41-LAV2	9,63	9,62	184	92	1,91
Pampa Puno	42-LAV2	15,69	7,05	1.117	559	2,16
Loa	43-LAV2	13,48	7,09	447	224	4,57
Loa	45-LAS2	16,98	7,24	1.344	672	4,01
Loa	46-LAS2	16,12	7,58	1.180	590	4,26
Loa	47-LAS2	23,16	9,07	2.000	1.000	0,44
San Pedro	48-LAS2	19,37	7,92	2.708	1.354	0,30
San Pedro	49-LAV2	19,26	8,85	874	437	0,08
San Pedro	50-LAV2	25,35	8,76	373	187	0,11
San Pedro	51-LAV2	21,19	10,98	755	377	0,11
San Pedro	52-LAV2	27,21	8,10	200	100	0,06
San Pedro	53-LAV2	28,24	7,48	1.169	585	0,15
San Pedro	54-LAV2	23,36	9,30	425	213	0,15
San Pedro	55-LAS2	24,77	8,34	1.359	679	0,34
Ascotán	56-LAV2	19,84	6,90	4.170	2.085	3,18
Ascotán	57-LAS2	17,57	6,94	221	111	1,01
Loa	61-LAS2	15,94	8,61	448	224	0,23
Loa	70-LAS2/71-LAS2	17,18	7,16	1.200	600	5,90
Loa	72-LAP2	13,32	7,21	484	242	0,54
Loa	73-LAS2	16,86	7,48	1.637	819	0,98
Loa	74-LAS2	23,32	7,53	953	476	0,56
Alconcha	75-LAV2	12,05	7,63	199	100	0,55
Loa	77-LAS2	13,79	8,16	1.213	606	0,15
Loa	78-LAS2	16,19	7,19	878	439	0,26
Pampa Puno	79-LAV2	18,01	7,51	438	219	0,21
Loa	81-LAV2	27,52	7,37	2.789	1.395	0,14
Ascotán	PT-3-2	17,29	8,61	6.955	3.477	0,00
Loa	PT-10-2	23,28	7,15	959	479	0,85
Loa	PT-11-2	15,46	7,28	1.696	848	0,06
Loa	PT-12-2	18,10	7,46	2.036	1.018	0,25
San Pedro	PT-13-2	17,52	7,93	1.936	968	0,31
Loa	PT-14-2	16,49	9,36	1.885	943	0,38

Tabla 7-3. Parámetros de terreno medidos en 63 muestras durante la segunda campaña de terreno, diciembre de 2013. Donde “T” es temperatura; “CE” es Conductividad Eléctrica; “SDT” son los Sólidos Disueltos Totales; “OD” es Oxígeno Disuelto. Fuente: elaboración propia.

7.2.1 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Se realiza un análisis estadístico de los valores de terreno para mostrar la variación entre los diferentes puntos de agua. De esta manera, se presentan los valores máximos, mínimos, promedio y desviación estándar de todos los puntos medidos en la zona de estudio y de cada subcuenca por separado. Por tanto, con los valores máximos y mínimos se obtiene la amplitud del rango de variación, con el promedio el valor representativo del conjunto y con la desviación estándar se obtiene el grado de variabilidad del conjunto además de la representatividad del valor promedio.

En primer lugar se analizan los parámetros de la primera campaña y a continuación los de la segunda campaña.

Primera campaña: Octubre 2013

En la **Tabla 7-4** se muestran los valores mínimos, máximos, promedio y desviación estándar de los parámetros de terreno medidos en toda la campaña de terreno de octubre de 2013. En la **Tabla 7-5** se muestran los valores de cada subcuenca por separado.

Como se puede observar el valor más estable es el pH, con un promedio de 7,3 y una desviación estándar de 0,4. El valor de pH más ácido se midió en la subcuenca de Alconcha en la antigua azufrera de Puquíos, con un valor de 5,9. El valor más alto, un pH de 8,4, es decir, el más básico, se ha encontrado en la muestra de una vertiente al noreste del Salar de Ascotán.

Los valores de Oxígeno Disuelto (OD) medidos varían entre 0,3 y 17,7 ppm. Ambos valores se han obtenido en dos pozos al este y sureste del salar de Ascotán. La gran diferencia entre el valor máximo de Oxígeno Disuelto y sus valores inmediatamente más bajos hacen dudar de la bondad de este dato, además de que este valor máximo es de una muestra obtenida de un pozo y en el resto de ellos el valor de OD no supera nunca los 2 ppm. El valor más alto con la excepción anterior es de 10,7 ppm y se midió en el curso superficial del río Loa en su paso por la localidad de Lasana.

Los valores de temperatura (T) medidos en la zona de estudio tienen un amplio rango, ya que van de 7,8 ºC medidos en una vertiente de la subcuenca de Ollagüe hasta los 43,4 ºC medidos en un pozo en la parte sur del salar de Ascotán, mostrando la mayor influencia geotermal. El promedio de los valores de temperatura en los puntos de agua medidos es de 18,9 ºC, un valor alto teniendo en cuenta que la cota más baja de la zona

de estudio es de 2.500 msnm y la mayoría de la superficie supera ampliamente los 3.000 msnm, ya queen el área de estudio la temperatura media anual en superficie es de aproximadamente de 14ºC a 2.500 msnm. Este valor promedio medido en los puntos de agua muestreado pone de manifiesto el geotermalismo presente en la zona debido a su actividad volcánica reciente y la existencia de volcanes activos como el volcán San Pedro y el volcán Ollagüe.

Los valores de Conductividad Eléctrica (CE) y Sólidos Disueltos Totales (SDT) son directamente proporcionales y reflejan una misma característica del agua. Estos dos parámetros varían con la cantidad de sales disueltas en el agua, a mayor cantidad de sales mayor es el valor de CE y SDT. Este es el parámetro medido con mayor variación de la zona de estudio, ya que se muestrearon aguas muy poco mineralizadas, como se refleja el mínimo con el valor de 112 µS/cm en un manantial de la cuenca de San Pedro, y aguas muy salobres como el valor máximo de 124.700 µS/cm en una vertiente del suroeste del Salar de Carcote. El promedio de 5.487 µS/cm y la desviación estándar de 16.162 refleja que la variabilidad del contenido en sales disueltas del agua es elevada.

Valor	T (ºC)	pH	CE (µS/cm)	SDT (ppm)	OD (ppm)
Mínimo	7,8	5,9	112	56	0,25
Máximo	43,4	8,4	124.700	62.360	17,7
Promedio	18,9	7,3	5.487	2.745	4,8
Desv. Estándar	6,1	0,4	16.162	8.083	2,9

Tabla 7-4. Valores estadísticos de los parámetros “in situ” para un total de 63 muestras, medidos en la primera campaña de terreno, en octubre de 2013. Donde: “T” es temperatura; “CE” es Conductividad Eléctrica; “SDT” son los Sólidos Disueltos Totales; “OD” es Oxígeno Disuelto. Fuente: elaboración propia.

SUBCUENCA ALCONCHA - N° Muestras=4

Valor	T (°C)	pH	CE (µS/cm)	SDT (ppm)	OD (ppm)
Mínimo	13,1	5,9	215	107	3,1
Máximo	20,9	7,7	1.406	703	7,0
Promedio	18,6	6,9	664	332	4,7
Desv. Estándar	3,7	0,8	518	259	1,6

SUBCUENCA OLLAGÜE - N° Muestras=3

Valor	T (°C)	pH	CE (µS/cm)	SDT (ppm)	OD (ppm)
Mínimo	7,8	7,1	214	107	5,7
Máximo	23,9	7,2	418	209	7,5
Promedio	11,7	5,4	228	114	5,1
Desv. Estándar	8,1	0,1	104	52	1,0

SUBCUENCA CARCOTE - N° Muestras=7

Valor	T (°C)	pH	CE (µS/cm)	SDT (ppm)	OD (ppm)
Mínimo	12,8	6,7	2.167	1.084	2,4
Máximo	21,7	7,3	124.700	62.360	4,4
Promedio	16,0	7,1	31.462	15.734	3,2
Desv. Estándar	3,0	0,2	42.045	21.026	0,6

SUBCUENCA ASCOTÁN - N° Muestras=16

Valor	T (°C)	pH	CE (µS/cm)	SDT (ppm)	OD (ppm)
Mínimo	12,3	6,7	223	111	0,3
Máximo	43,4	8,4	8.211	4.104	17,7
Promedio	23,2	7,4	4.876	2.443	3,8
Desv. Estándar	7,9	0,5	2.464	1.235	4,3

SUBCUENCA PAMPA PUNO - N° estras=1

Nombre	T (°C)	pH	CE (µS/cm)	SDT (ppm)	OD (ppm)
42-LAV	19,7	7,2	1.315	658	3,5

SUBCUENCA SAN PEDRO - N°muestras=8

Valor	T (°C)	pH	CE (µS/cm)	SDT (ppm)	OD (ppm)
Mínimo	16,7	7,1	112	56	1,8
Máximo	30,2	8,1	1.758	879	6,6
Promedio	22,2	7,5	781	391	3,4
Desv. Estándar	4,5	0,4	597	298	1,6

SUBCUENCA LOA - N° Muestras=24

Valor	T (°C)	pH	CE (µS/cm)	SDT (ppm)	OD (ppm)
Mínimo	9,7	6,8	405	203	2,9
Máximo	23,1	7,8	3.196	1.598	10,7
Promedio	16,3	7,3	1.513	756	6,2
Desv. Estándar	4,0	0,3	887	443	2,0

Tabla 7-5. Valores estadísticos por subcuencas de los parámetros “in situ” medidos en la campaña de terreno de octubre de 2013. Donde: “T” es temperatura; “CE” es Conductividad Eléctrica; “SDT” son los Sólidos Disueltos Totales; “OD” es Oxígeno Disuelto Fuente: elaboración propia.

Segunda campaña: Diciembre 2013

En la **Tabla 7-6** se muestran los valores mínimos, máximos, promedio y desviación estándar de los parámetros de terreno medidos en la campaña de terreno de diciembre de 2013. En la **Tabla 7-7** se muestran los valores de cada subcuenca por separado.

Del mismo modo que en la primera campaña, el pH es el parámetro más estable, con una desviación de 0,9. El promedio obtenido es de 7,8, muy cercano al de la primera campaña, que es de 7,3. El valor de pH más ácido corresponde al mismo de la primera campaña, medido en la subcuenca de Alconcha en la antigua azufrera de Puquios (23-LAV), con un valor de 5,9. El valor más alto y por tanto más básico, se localiza en la cabecera de la cuenca de San Pedro (51-LAV), con un valor de 10,9. En la primera campaña se obtuvo un valor en el mismo punto de 8,1. El valor más alto en la primera campaña se sitúa en una vertiente al noreste del salar de Ascotán. La diferencia existente puede ser causa de un desajuste en la sonda multiparamétrica. En el apartado correspondiente a los análisis del laboratorio se realiza un análisis más exhaustivo.

El rango de valores de Oxígeno Disuelto (OD) se encuentra entre 0,0 y 7,8 ppm. El mínimo corresponde a un pozo en el sureste del salar de Ascotán (PT-3) y el más elevado en el curso superficial del río Loa, entre la quebrada Macho Muerto y la quebrada Taira (28-LAS2). En la primera campaña el valor inferior se localizó también en un pozo en el sureste del salar de Ascotán (3-LAP), de 0,3 ppm. El valor más elevado de la primera campaña fue de 17,7 ppm en otro pozo del sureste del salar de Ascotán (4-LAP). Se corrobora que este valor es una errata, ya que el valor medido en la segunda campaña en la misma muestra es de 0,42. El valor promedio obtenido es de 1,2 ppm.

El rango de temperaturas (T) es amplio, entre 9,6 y 32,5ºC. El promedio de los valores de temperatura en los puntos medidos es de 18,9 ºC, exactamente el mismo que el calculado con los datos de la primera campaña.

El valor mínimo, de 9,6 ºC, se encuentra en la cabecera del río Loa (41-LAV). A partir del Modelo Digital de Temperaturas generado en el apartado de “Caracterización Hidrológica” (**Figura 5-7**), se ha obtenido la temperatura del aire en este punto, la cual es de 2 ºC. El valor máximo de temperatura se encuentra en un pozo del sur del salar de Ascotán (11-LAP), muy próximo al mismo en el que se encontró la máxima temperatura en la primera campaña (10-LAP), la cual es de 43,4 ºC. La temperatura media del aire en este punto es de 5,3 ºC.

Nuevamente se puede decir que las temperaturas medidas en terreno tienen valores altos en comparación con la temperatura del aire. En la **Tabla 7-6** se muestra la temperatura media del aire en las diferentes subcuencas, calculada como la media de las temperaturas del aire en los puntos muestreados, a partir del Modelo Digital de Temperaturas (**Figura 5-7**). También se observa la temperatura media del agua en las diferentes subcuencas, medida con la sonda multiparamétrica y obtenida como promedio de las diferentes muestras.

En la **Figura 7-20** se representa en un gráfico la diferencia entre la temperatura media del agua y la temperatura media del aire en las diferentes subcuencas. De esta forma se obtiene una primera idea sobre la posible influencia del geotermalismo presente en la zona debido a la actividad volcánica reciente y a los volcanes activos, como el volcán San Pedro y el volcán Ollagüe. Las subcuencas de San Pedro, Carcote y Ascotán son las que mayor diferencia presentan entre la temperatura del agua y la temperatura del aire, con una diferencia de 19ºC, 18ºC y 16ºC respectivamente. A continuación se encuentra Alconcha, con una diferencia de 14ºC, Pampa Puno con 13ºC, Ollagüe con 11ºC y finalmente la cuenca del Loa con 10ºC de diferencia.

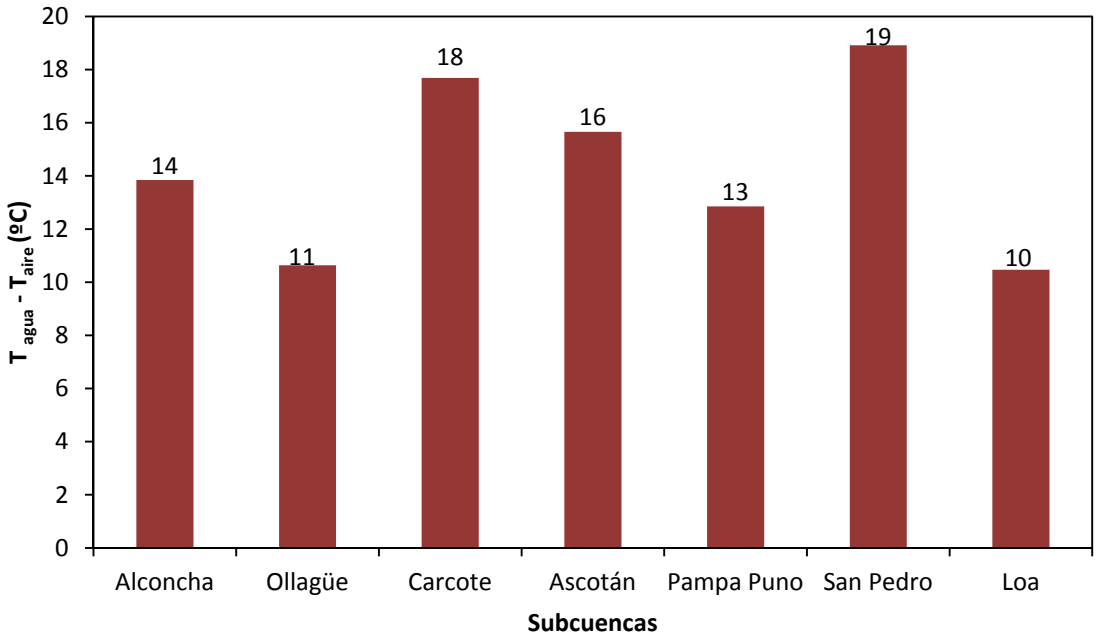


Figura 7-20. Diferencia entre la Temperatura del agua media (Tagua) y la Temperatura media del aire (Taire) en cada subcuenca. Fuente: elaboración propia.

La Conductividad Eléctrica (CE) y Sólidos Disueltos Totales (SDT) son directamente proporcionales y por tanto se obtiene una misma característica del agua a partir de su análisis. Ambos parámetros varían con la cantidad de sales disueltas en el agua, a mayor cantidad de sales mayor es el valor de CE y SDT. Son los parámetros que mayor variación tienen. Esto refleja la variedad de aguas presentes en la zona de estudio, encontrando aguas de precipitación poco mineralizadas hasta salmueras en las cuencas endorreicas.

Por una parte la CE tiene una desviación estándar de 1.755 µS/cm y los SDT de 878 ppm, lo cual demuestra que la variabilidad en el contenido de sales es muy elevada. La CE mínima corresponde a una vertiente de la cabecera del río Loa (41-LAV) con un valor de 184 µS/cm y la más alta al sureste del Salar de Ascotán (PT-3) con 6.955 µS/cm. En la primera campaña el valor más alto corresponde a la muestra en una vertiente del suroeste del Salar de Carcote (15-LAV), con un valor de 124.700 µS/cm. No es posible contrastar este valor con la segunda campaña, ya que en el salar de Carcote las aguas son muy salinas y la toma de muestras en esta zona podría afectar a la calibración de la sonda multiparamétrica.

El promedio obtenido de CE es de 1.923 µS/cm . El obtenido en la primera campaña es de 16.162 µS/cm. Esta diferencia se debe principalmente a que en el salar de Carcote sólo se ha medido en un punto los parámetros de terreno, y en la primera campaña se midieron 7.

Valor	T_{aire} (°C)	T (°C)	pH	CE (µS/cm)	SDT (ppm)	OD (ppm)
Mínimo	-	9,6	6,0	184	92	0,0
Máximo	-	32,5	11,0	6.955	3.477	7,8
Promedio	3,1	18,9	7,8	1.923	961	1,2
Desv. Estándar	-	4,8	0,9	1.755	878	1,8

Tabla 7-6. Valores estadísticos de los parámetros “in situ” medidos en la segunda campaña de terreno, en diciembre de 2013. Donde “T_{aire}” es temperatura media del aire obtenida del Modelo Digital de Temperaturas (Figura 5-7), “T” es temperatura; “CE” es Conductividad Eléctrica; “SDT” son los Sólidos Disueltos Totales; “OD” es Oxígeno Disuelto. Fuente: elaboración propia.

SUBCUENCA ALCONCHA - N° Muestras=4

Valor	T_{aire} (°C)	T_{agua} (°C)	pH	CE (µS/cm)	SDT (ppm)	OD (ppm)
Mínimo	-	12,05	5,96	199	100	0,29
Máximo	-	20,93	7,67	1.458	729	0,55
Promedio	2,3	16,15	7,12	613	307	0,39
Desv. Estándar	-	4,38	0,80	576	288	0,12

SUBCUENCA OLLAGÜE - N° Muestras=3

Valor	T_{aire} (°C)	T_{agua} (°C)	pH	CE (µS/cm)	SDT (ppm)	OD (ppm)
Mínimo	-	11,37	7,77	257	129	0,19
Máximo	-	15,72	9,87	491	246	0,23
Promedio	3,5	14,14	8,66	345	173	0,21
Desv. Estándar	-	2,41	1,09	128	64	0,02

SUBCUENCA CARCOTE - N° Muestras=1

Nombre	T_{aire} (°C)	T_{agua} (°C)	pH	CE (µS/cm)	SDT (ppm)	OD (ppm)
18-LAV-2	5,6	23,29	7,79	2.183	1.091	0,29

SUBCUENCA ASCOTÁN - N° Muestras=14

Valor	T_{aire} (°C)	T_{agua} (°C)	pH	CE (µS/cm)	SDT (ppm)	OD (ppm)
Mínimo	-	11,42	6,85	221	111	0,00
Máximo	-	32,48	8,76	6.955	3.477	3,18
Promedio	5,3	20,96	7,69	4.152	2.076	0,65
Desv. Estándar	-	5,41	0,70	2.220	1.110	0,81

SUBCUENCA PAMPA PUNO - N° Muestras=2

Valor	T_{aire} (°C)	T_{agua} (°C)	pH	CE (µS/cm)	SDT (ppm)	OD (ppm)
Mínimo	-	15,69	7,05	438	219	0,21
Máximo	-	18,01	7,51	1.117	559	2,16
Promedio	4,0	16,85	7,28	778	389	1,19
Desv. Estándar	-	1,64	0,33	480	240	1,38

SUBCUENCA SAN PEDRO - N° Muestras=9

Valor	T_{aire} (°C)	T_{agua} (°C)	pH	CE (µS/cm)	SDT (ppm)	OD (ppm)
Mínimo	-	17,52	7,48	200	100	0,06
Máximo	-	28,24	10,98	2.708	1.354	0,34
Promedio	4,0	22,92	8,63	1.089	544	0,18
Desv. Estándar	-	3,78	1,04	815	408	0,11

SUBCUENCA LOA - N° Muestras=30

Valor	T_{aire} (°C)	T_{agua} (°C)	pH	CE (µS/cm)	SDT (ppm)	OD (ppm)
Mínimo	-	9,63	6,71	184	92	0,06
Máximo	-	27,52	9,62	3.179	1.590	7,75
Promedio	7,0	17,47	7,57	1.533	766	2,09
Desv. Estándar	-	4,05	0,76	889	444	2,19

Tabla 7-7. Valores estadísticos por subcuencas de los parámetros “in situ” medidos en la primera campaña de terreno, en octubre de 2013. Donde “T_{aire}” es temperatura media del aire obtenida del Modelo Digital de Temperaturas (Figura 5-7), “T_{agua}” es temperatura media del agua medida con la sonda multiparamétrica; “CE” es Conductividad Eléctrica; “SDT” son los Sólidos Disueltos Totales; “OD” es Oxígeno Disuelto Fuente: elaboración propia.

7.2.2 DISTRIBUCIÓN DE LOS VALORES DE CE

El parámetro de Conductividad Eléctrica (CE) tiene una gran fiabilidad en las mediciones de terreno y aporta mucha información al comparar los valores de los puntos de agua medidos dentro de una cuenca. El valor de la CE refleja la suma de sales disueltas en el agua. Este contenido en sales proviene de la disolución de los minerales con los que está en contacto el agua. La cantidad de sales depende del tiempo de contacto entre el agua y los materiales geológicos además de la solubilidad de estos materiales. Si el agua está en contacto con rocas de baja solubilidad aumentará lentamente su contenido en sales disueltas y esto dependerá además de la temperatura en la que estén agua y roca. Por el contrario si el agua entra en contacto con materiales evaporíticos rápidamente incrementará su contenido en sales teniendo valores de CE elevados. En la zona del Loa Alto encontraremos los dos casos mencionados y una gran cantidad de muestras en estado intermedio de estos dos extremos. Por ese motivo se realizará un análisis de la distribución de los valores de solubilidad a partir de un mapa de los valores de CE y un análisis del perfil de CE en el rio Loa.

En las **Figura 7-21** y **Figura 7-22** se representa el mapa de la cuenca del Loa Alto con los valores de CE medidos en terreno en ambas campañas (Octubre 2013 y Diciembre de 2013). Los puntos medidos se presentan con un círculo en que el color de este depende del rango de valores de CE en el que se encuentre (ver leyenda de las Figuras) y además se representa el valor de CE medido en cada punto.

Primera campaña: Octubre 2013

Como se puede observar en el mapa de CE los valores más bajos de CE representados con círculos azules (0-500 µS/cm) y verde oscuro (500-1.000 µS/cm) se encuentran mayoritariamente en las zonas más elevadas. Los valores más elevados de CE están alrededor del Salar de Carcote ya que no se tuvo acceso a puntos de agua sin influencia salobre del salar. En cambio en la cuenca del Salar de Ascotán se pudo tener a acceso a aguas muy poco mineralizadas, con CE menores a 500 µS/cm, y a aguas con mayor cantidad de sales disueltas sin ser aguas saladas con valores entre los 5.000 y los 8.500 µS/cm.

En las subcuencas de Alconcha, Ollagüe y San Pedro se muestrearon aguas poco mineralizadas, con la mayoría de valores por debajo de los 500 µS/cm. Esto significa que son aguas que han estado muy poco tiempo en contacto con los materiales geológicos por los que circulan y además estos materiales tienen una solubilidad baja.

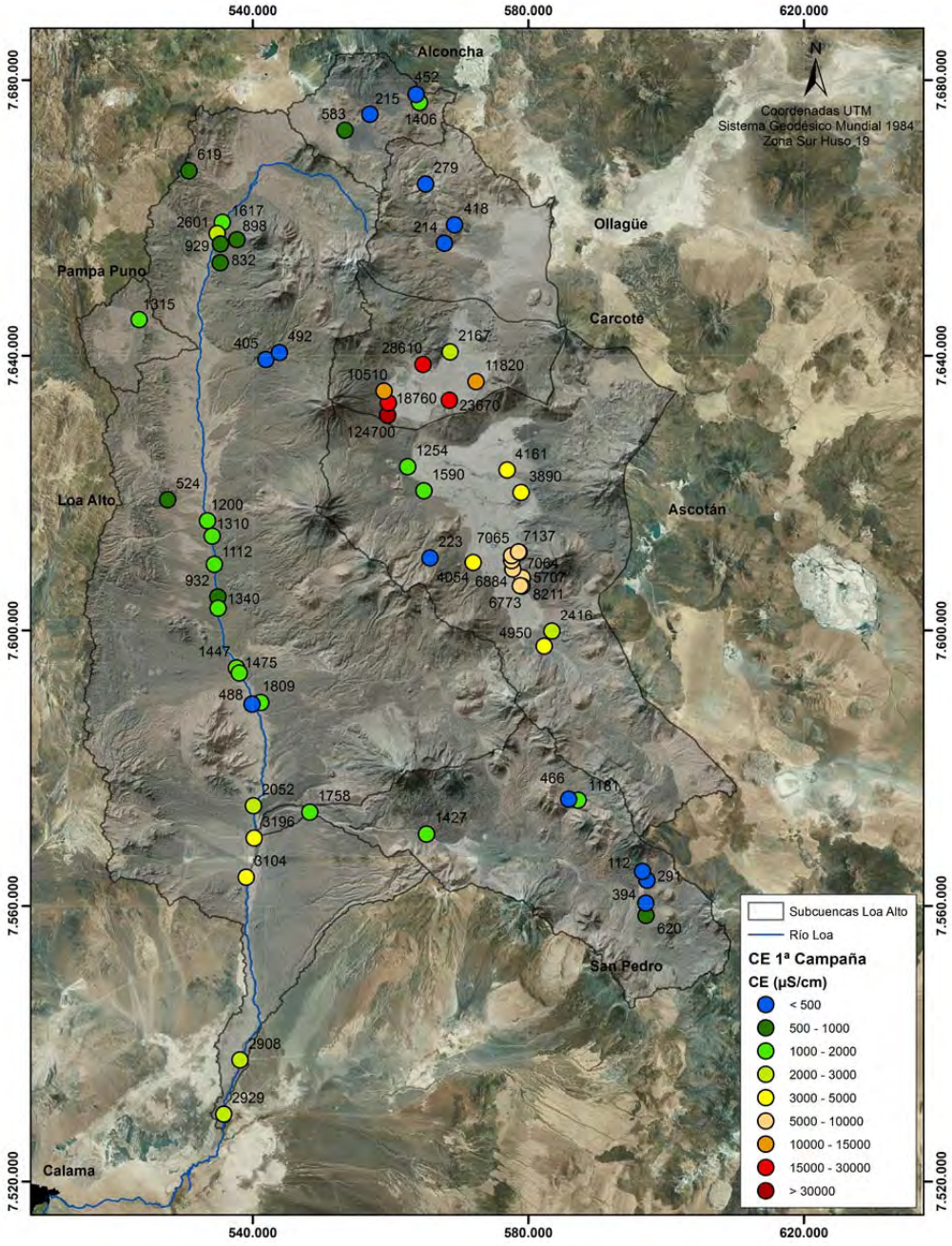


Figura 7-21. Mapa de valores de CE tomados en la primera campaña de terreno, octubre de 2013. Fuente: elaboración propia.

Segunda campaña: Diciembre 2013

No se observan cambios significativos en las conductividades eléctricas medidas en la primera y en la segunda campaña. Los cambios que existen en las conductividades podrían ser causa del error de la sonda, por lo que esta fluctuación se analizará más adelante con las concentraciones de cloruros de los análisis de laboratorio.

Al igual que en la primera campaña, los colores azules y verde oscuro representan las aguas con baja CE, y estas se encuentran en zonas más altas. Las conductividades medidas aumentan hacia zonas bajas. Los valores más altos se encuentran en torno al salar de Ascotán, ya que en esta ocasión los valores del la cuenca de Carcote no fueron medidos Los valores de conductividad muy elevados pueden cambiar la calibración de la sonda multiparametrica, por lo que se opto por no realizar estas medidas

En los salares de Alconcha, Ollagüe, y San Pedro, se muestrearon aguas poco mineralizadas,lo que indica, al igual que en la primera campaña, que son aguas con poca permanencia en el acuífero, y que además el material atravesado es poco soluble.

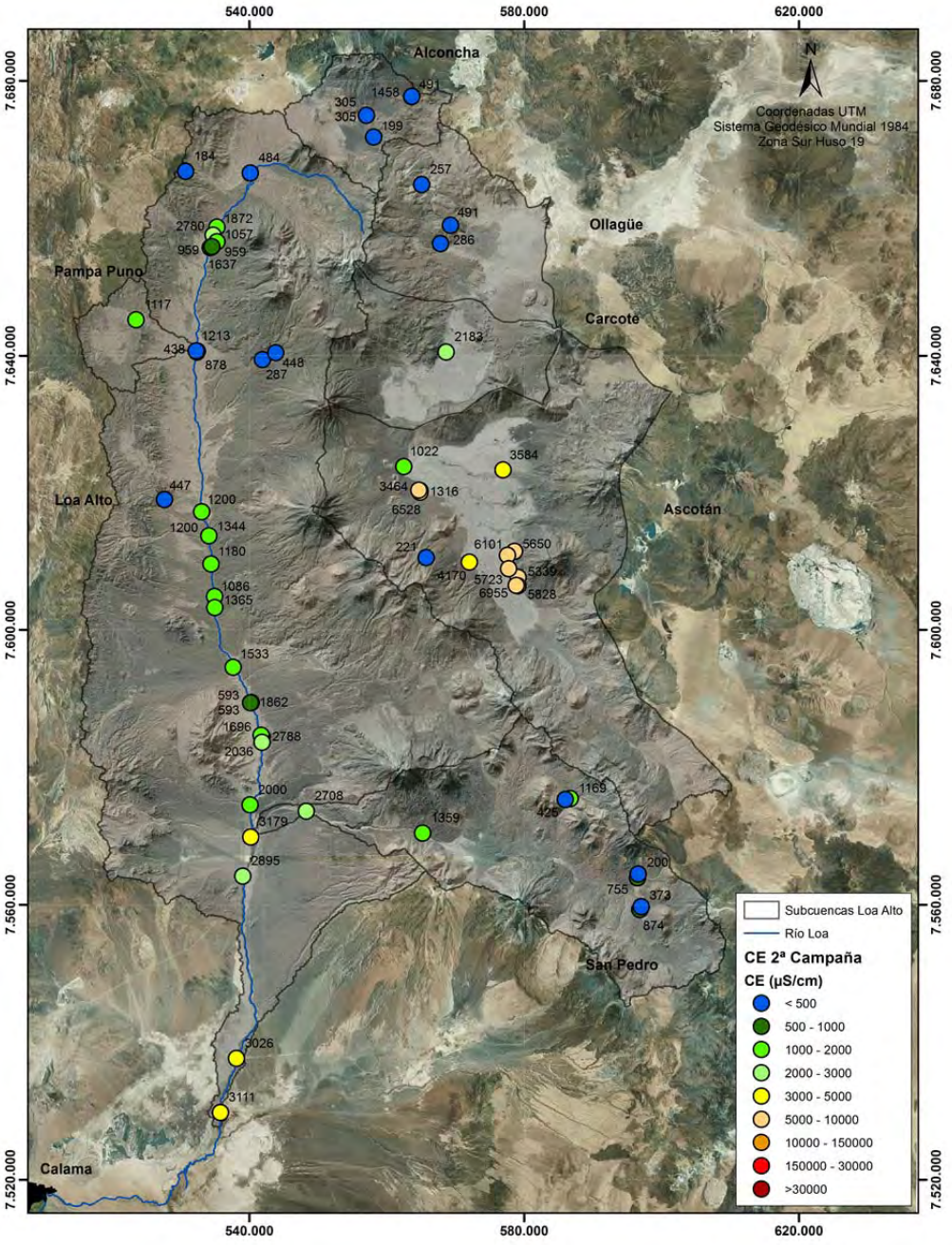


Figura 7-22 Mapa de valores de CE tomados en la segunda campaña de terreno, diciembre de 2013. Fuente: elaboración propia.

7.2.3 PERFIL DE CE DEL RÍO LOA

A continuación, se realiza un análisis de la variación de la Conductividad Eléctrica (CE) en función de la distancia desde su origen, este punto se toma como el manantial más al norte que da origen al curso del río Loa. El objetivo del análisis del perfil de CE del río Loa es ver la influencia de los diferentes aportes, tanto superficiales como subterráneos, que tiene el curso superficial.

En la **Figura 7-23** se presenta el perfil de CE tomadas en el curso superficial del río Loa y de los diferentes puntos de agua en función de su distancia al nacimiento del río. Los puntos de agua representados corresponden a manantiales y aguas superficiales situados dentro de la cuenca aportante al río Loa desde su origen hasta Chiu Chiu.

Como se puede observar en la **Figura 7-23** el perfil de CE del río Loa tiene 3 tramos bien diferenciados mostrando diferencias en los tramos entre la primera y la segunda campaña de terreno.

En la primera compaña se pueden distinguir los siguientes tramos:

- Desde su nacimiento hasta el punto donde se ubica la represa Lequena muestra una disminución del valor de la CE de 2.600 hasta 930 µS/cm.
- Desde la represa Lequena hasta el su paso por el vado Santa Bárbara en el que aumenta el valor de CE de 932 a 3.200 µS/cm.
- Desde el vado Santa Bárbara hasta Chiu Chiu la CE se mantiene con poca variación pasando de 3200 a 2900 µS/cm en su paso por Chiu Chiu.

En la segunda campaña se pueden distinguir los siguientes tramos:

- Desde su nacimiento hasta el punto muestreado después de la quebrada Sapunta muestra una disminución de los valores de CE de 2.780 hasta 878 µS/cm.
- Desde después de la quebrada Sapunta hasta el vado Santa Bárbara el valor de CE aumenta de 878 a 3.179 µS/cm.
- Desde el vado Santa Bárbara hasta Chiu Chiu La conductividad se mantiene prácticamente sin cambios, pasando de 3.179 a 3.111 µS/cm.

En el primer tramo del perfil de CE se puede observar como los puntos de agua medidos tienen una CE significativamente menor al río Loa. De las 7 vertientes y cursos superficiales solo la quebrada Paco Paco (900 µS/cm) y la el río Chela (400-500 µS/cm) aportan superficialmente

Sin embargo, se produce una disminución de las CE en el primer tramo del rio Loa. En la primera campaña, se podía observar que las medidas de CE disminuían hasta "represa Lequena", Por lo que se puede considerar que existen aportes importantes de aguas menos cargadas, como serían la quebrada Paco Paco y el río Chela. En la segunda campaña los datos indican que el aporte importante se produce antes de Sapunta, y de este punto a la represa Lequena la CE aumenta. Por tanto el Rio Chela no aporta lo suficiente como para cambiar significativamente la CE del rio Loa. Existen otros aportes en el primer tramo del rio Loa que reducen la CE.

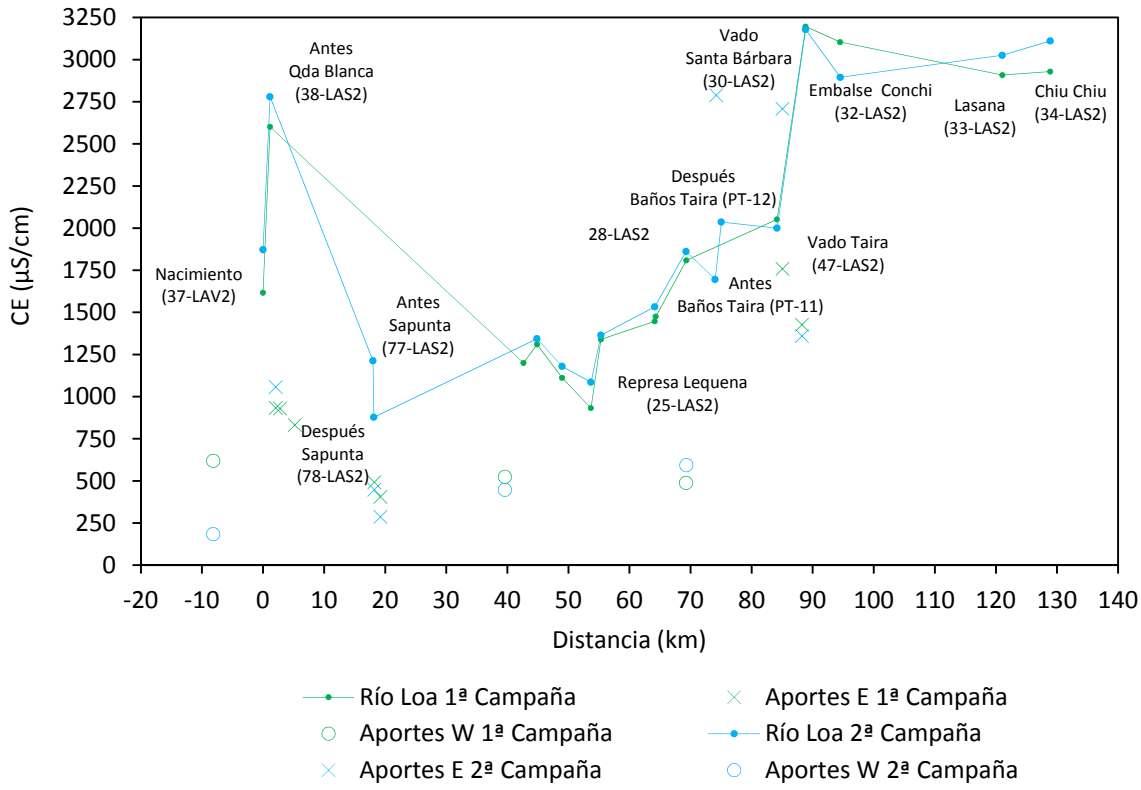


Figura 7-23: Perfil de conductividades del rio Loa en la primera y la segunda campaña. Fuente: elaboración propia.

7.3 ANÁLISIS HIDROQUÍMICO

El primer paso para conocer la composición química de las aguas muestreadas en las campañas de terreno es la clasificación de las especies químicas disueltas en el agua según su abundancia relativa. De esta manera, de mayor a menor abundancia, se distingue entre elementos mayores, elementos menores y elementos traza.

El tipo de agua se determina generalmente gracias a las concentraciones de sus elementos mayores. De este modo, existen aguas de tipo cálcica, sódica, magnésica, clorada, potásica, sulfatada, carbonatada y bicarbonatada. Aunque la concentración de elementos menores y traza puede ser solamente del orden de pocos microgramos por litro, su presencia es de gran relevancia desde un punto de vista de la calidad de las aguas.

Por lo tanto, la composición química de las aguas permite conocer la tipología de las aguas, propiedades asociadas a su composición como índices de saturación o dureza y posibles casos de contaminación.

En la **Tabla 7-8** y **Tabla 7-10** se presentan un listado con los compuestos químicos disueltos en la muestra de agua y sus concentraciones expresadas en mg/L, y en la **Tabla 7-9** y **Tabla 7-11** se presentan los valores de la composición hidroquímica de las muestras dobles tomadas en las campañas de terreno de octubre de 2013 y de diciembre de 2013 respectivamente.

Nombre	pH	T° Analisis pH	ALC	C. E.	T° Análisis CE	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	Al	B	As	Fe	CO_2	Si	NO_3
1 LAP	8,06	25,3	160,90	1493	25,2	185,80	29,10	38,10	35,50	196,30	27,60	462,10	0,06	0,05	0,015	4,21	<0,05	10,60	0,0
2 LAP	8,51	25,3	31,10	3350	25,3	662,50	42,70	54,80	22,10	37,94	85,40	1021,60	<0,01	<0,01	<0,006	<0,03	<0,05	0,92	0,0
3 LAP	8,79	25,4	38,64	6220	25,3	934,20	95,60	136,10	55,50	47,14	87,90	1945,90	0,02	0,02	0,022	<0,03	<0,05	1,24	0,0
5 LAP	8,32	25,6	40,72	6220	25,5	1214,20	69,00	75,20	68,90	49,68	180,40	1872,20	0,06	16,20	0,125	0,73	<0,05	9,73	0,0
6 LAV	7,79	25,1	97,76	6210	25,2	771,20	73,80	245,40	73,20	119,27	268,40	1833,00	0,05	19,60	<0,006	<0,03	0,69	40,58	0,0
7 LAV	7,74	25,2	181,34	6270	25,1	766,90	71,10	238,80	69,50	221,23	252,00	1833,00	0,04	17,50	<0,006	<0,03	0,92	38,62	0,0
8 LAV	8,04	25,3	107,43	6272	25,4	765,30	76,60	245,30	68,80	131,07	273,60	1833,60	0,01	18,30	0,396	<0,03	0,55	45,61	0,0
9 LAV	8,19	25	92,18	5900	24,9	786,90	78,20	202,80	65,50	115,03	263,90	1706,70	0,06	16,90	0,340	<0,03	0,14	33,34	5,2
10 LAP	7,11	25,1	109,67	4250	25,1	624,80	82,60	114,30	21,60	133,79	170,70	1148,20	<0,01	48,80	0,650	11,40	4,12	65,01	0,0
11 LAP	6,99	25,6	124,74	2050	25,5	281,40	34,60	65,90	20,10	152,19	101,00	493,70	0,73	20,80	<0,006	6,49	2,64	49,70	0,0
12 LAP	7,18	25,1	133,47	2030	25,1	239,60	32,60	64,60	18,50	162,84	100,70	486,30	0,25	16,30	<0,006	4,82	2,52	47,84	0,0
13 LAV	9,34	24,9	55,50	3820	25,0	530,10	54,90	132,80	33,10	67,71	177,40	1144,60	0,18	8,58	<0,006	<0,03	<0,05	26,76	0,0
14 LAV	8,09	25,4	183,47	1123	25,4	116,98	15,73	42,81	27,90	223,83	98,00	185,90	0,11	2,50	0,014	<0,03	<0,05	29,53	0,0
15 LAV	7,93	25,3	434,74	109700	25,4	19448,19	1775,82	4068,23	1227,70	531,39	12179,60	34767,10	0,40	2,79	0,288	0,03	16,7	24,28	0,0
16 LAV	7,47	25,2	33,38	19530	25,1	3498,68	285,11	560,77	196,74	40,72	1344,00	5394,90	0,32	63,80	0,400	<0,03	2,15	32,81	0,0
17 LAV	7,20	25	49,10	28600	25,1	3658,92	288,04	1119,04	165,70	59,91	2682,14	5642,00	0,21	53,00	0,109	0,34	3,57	26,12	2,8
18 LAV	*	*	*	*	*	293,85	24,46	64,23	23,46		89,90	647,50	0,14	6,47	0,182	<0,03	-	33,82	0,0
19 LAV	7,57	25,6	55,60	23100	25,5	3841,89	253,85	908,79	198,83	67,83	2178,00	6386,30	0,11	43,50	0,138	<0,03	2,36	26,45	0,0
20 LAV	7,46	25,2	17,66	223	25,3	20,43	5,31	12,79	3,94	21,54	64,00	8,34	0,15	1,95	0,008	0,06	<0,05	26,23	0,0
21 LAV	7,82	25,4	41,22	407	25,4	20,37	6,60	29,67	8,31	50,29	95,43	21,37	0,15	1,84	<0,006	0,04	<0,05	23,82	0,1
22 LAV	7,51	25,1	24,85	280	25,0	11,66	5,32	25,57	6,34	30,32	108,75	8,71	0,12	0,14	<0,006	0,05	<0,05	26,79	0,0
23 LAV	8,31	25,1	<0,02	1397	25,3	90,18	22,99	113,47	58,75	<0,02	680,95	39,68	43,34	2,27	<0,006	0,29	17,71	38,45	0,0
24 LAV	7,81	25,1	53,22	440	25,0	44,91	11,55	19,16	7,97	64,93	45,92	69,00	0,12	1,12	0,022	<0,03	<0,05	28,41	0,0
25 LAS	7,71	24,9	138,78	1142	24,9	107,56	13,78	58,95	18,98	169,31	229,10	146,90	0,06	5,58	0,179	0,03	<0,05	32,71	0,0
26 LAS	8,10	25,1	229,85	1328	25,3	96,00	10,46	97,90	24,66	280,41	202,50	179,00	0,18	7,16	<0,006	0,06	0,23	23,75	0,0
27 LAS	8,04	25,8	255,74	1458	25,6	126,39	15,28	90,77	28,07	312,00	83,80	261,50	0,10	8,93	<0,006	<0,03	<0,05	28,25	0,0

Nombre	pH	T° Analisis pH	ALC	C. E.	T° Análisis CE	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	Al	B	As	Fe	CO_2	Si	NO_3
28 LAS	7,73	25,2	269,77	1812	25,1	163,12	14,50	99,44	27,80	329,12	91,80	354,50	0,28	9,43	0,201	<0,03	1,46	26,30	0,0
29 LAV	7,43	25	19,69	489	24,9	25,20	6,07	39,05	11,32	24,02	150,40	17,00	0,11	8,95	<0,006	<0,03	0,27	13,45	0,0
30 LAS	7,24	25,4	506,27	3060	25,4	303,90	23,72	186,09	75,05	617,65	446,00	468,61	0,20	11,20	<0,006	<0,03	7,09	35,28	0,0
31 LAS	7,41	25,1	492,08	3070	25,1	303,28	24,27	186,81	77,05	600,34	219,50	669,00	0,18	13,10	0,111	0,03	4,58	40,37	0,0
32 LAS	7,74	25,2	371,95	2910	25,3	301,68	24,68	138,31	73,97	453,78	207,10	605,00	0,24	11,10	<0,006	0,50	2,06	33,16	0,0
33 LAS	8,31	25,4	316,75	2780	25,5	285,35	22,90	88,72	69,70	386,75	195,10	600,30	0,27	10,70	<0,006	0,36	<0,05	25,96	0,0
34 LAS	8,33	24,9	272,25	2850	25,0	324,84	25,06	86,10	76,46	332,15	203,50	634,30	0,22	13,00	0,240	<0,03	<0,05	26,69	0,0
35 LAV	7,71	29,4	27,03	218	25,0	14,58	6,54	12,08	4,36	35,88	54,30	6,77	0,30	0,82	0,017	<0,03	<0,05	27,67	0,0
36 LAV	7,72	25,3	82,73	562	25,2	28,89	20,84	60,58	13,36	100,93	153,40	44,55	0,33	2,02	0,008	0,58	0,23	16,84	0,0
37 LAS	6,73	24,9	209,86	1747	25,0	240,14	21,56	64,98	17,19	256,03	233,90	284,10	0,21	12,90	0,490	0,51	4,8	13,21	0,0
38 LAS	7,47	25,3	83,43	2610	25,3	328,86	24,67	87,55	14,16	101,78	330,50	445,80	0,33	14,60	0,125	0,27	0,31	18,17	0,0
39 LAV	7,23	25,5	116,11	987	25,3	96,69	12,12	39,96	17,32	141,66	200,80	112,20	0,24	6,75	0,262	0,09	1,65	33,09	0,0
40 LAS	7,66	25,2	82,63	288	25,1	23,29	7,28	15,67	6,29	100,81	27,73	35,91	0,35	1,72	0,012	0,37	0,23	49,83	0,0
41 LAV	7,75	25	45,14	187,2	25,0	5,26	1,81	19,44	4,26	55,07	46,59	8,11	0,26	0,44	0,007	0,06	<0,05	8,18	1,7
42 LAV	7,64	25,4	297,80	870	25,3	19,57	3,82	100,46	7,19	363,31	111,10	29,30	0,38	3,70	0,012	0,42	1,97	7,02	0,0
43 LAV	7,48	25,2	89,58	449	25,1	23,16	2,40	47,72	7,01	109,28	83,90	35,71	0,02	0,89	0,022	<0,03	0,92	10,64	2,8
44 LAS	8,06	25,1	144,04	1135	25,1	118,73	14,13	64,73	37,87	175,73	273,20	205,10	0,04	3,27	0,212	<0,03	0,23	39,92	0,0
45 LAS	8,31	25,4	146,22	1137	25,3	102,79	13,09	64,50	19,12	178,39	227,40	145,50	0,02	4,49	0,182	0,13	<0,05	31,25	0,0
46 LAS	8,48	25,7	11,87	1143	25,2	104,50	13,88	68,24	19,92	14,48	224,90	143,30	0,08	4,49	<0,006	<0,03	<0,05	34,41	0,0
47 LAS	7,94	25,5	264,47	2040	25,3	209,22	15,70	132,16	42,07	264,47	316,76	412,70	0,05	9,95	0,121	0,83	0,82	35,85	0,0
48 LAS	8,72	25,2	254,80	1347	25,2	121,04	15,22	68,62	22,62	310,85	110,04	226,60	<0,01	4,49	0,117	<0,03	<0,05	31,90	0,0
49 LAV	7,59	25,1	92,31	607	25,2	66,12	8,65	22,82	8,84	112,61	101,90	77,00	<0,01	1,90	<0,006	0,10	0,69	32,75	0,0
50 LAV	7,76	25,3	66,91	286	25,3	27,05	4,56	14,39	5,43	81,63	40,20	41,71	<0,01	0,67	<0,006	< 0,03	0,23	26,75	1,2
51 LAV	9,02	25,1	87,40	223	25,2	18,31	3,66	15,23	6,13	106,62	20,80	28,23	0,08	0,28	<0,006	< 0,03	<0,05	21,83	1,3
52 LAV	7,47	25	23,66	85,3	25,0	12,39	2,39	4,54	0,74	28,86	10,30	19,10	0,13	0,26	0,014	0,32	<0,05	8,94	0,9
53 LAV	7,47	24,9	126,13	1144	25,1	318,90	89,30	55,80	13,90	153,88	133,74	491,73	<0,01	6,95	0,016	<0,03	1,01	91,95	0,7

Nombre	pH	T° Analisis pH	ALC	C. E.	T° Análisis CE	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	Al	B	As	Fe	CO_2	Si	NO_3
54 LAV	8,61	25,2	211,15	418	25,2	72,70	10,49	11,12	2,42	157,60	67,75	32,06	<0,01	0,76	0,008	5,79	<0,05	23,90	1,5
55 LAS	7,40	25,5	284,26	1416	25,4	125,87	14,17	62,55	39,36	346,79	107,90	225,40	<0,01	3,39	0,191	<0,03	2,56	41,90	0,0
56 LAV	7,72	25,1	277,71	3922	25,1	493,78	62,75	111,07	48,89	338,81	282,60	965,10	0,07	24,30	0,234	<0,03	2,48	14,90	0,0
57 LAS	7,92	25,3	39,04	212	25,4	10,60	1,18	15,71	6,44	47,62	53,70	16,34	0,04	0,63	<0,006	0,28	<0,05	0,65	0,0
58 LAV	7,86	25,7	75,84	285	25,5	26,94	4,90	15,51	5,65	92,52	41,20	41,54	0,20	0,91	0,154	0,16	0,23	24,49	0,0
59 LAV	7,38	25,2	87,99	452	25,3	20,41	2,13	43,34	6,21	107,35	85,00	24,40	<0,01	0,98	<0,006	0,31	0,69	9,39	0,0
60 LAV	7,62	25,1	30,75	221	25,1	16,20	7,40	14,59	4,72	37,52	54,00	24,98	<0,01	0,85	0,015	<0,03	0,23	28,67	0,0
61 LAS	7,68	25,4	60,71	482	25,4	32,90	7,77	23,61	11,01	74,07	110,40	35,30	0,32	3,00	0,171	1,26	0,23	26,37	0,0

Tabla 7-8. Listado de los valores de la composición química de las muestras de la campaña de octubre 2003. Donde "Tº" es temperatura en ºC; "ALC" es alcalinidad en mg $CaCO_3$/L; "CE" es conductividad eléctrica en µS/cm; y el resto de componentes es en mg/L. Fuente: laboratorio DICTUC.

Nombre	pH	ALC	C. E.	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	Al	B	As	Fe	CO_2	Si	NO_3
11-LAP	6,99	124,74	2050	281,40	34,60	65,90	20,10	152,19	101,00	493,70	0,73	20,80	<0,006	6,49	2,64	49,70	0,00
12-LAP	7,18	133,47	2030	239,60	32,60	64,60	18,50	162,84	100,70	486,30	0,25	16,30	<0,006	4,82	2,52	47,84	0,00
30-LAS	7,24	506,27	3060	303,90	23,72	186,09	75,05	617,65	446,00	468,61	0,20	11,20	<0,006	<0,03	7,09	35,28	0,00
31-LAS	7,41	492,08	3070	303,28	24,27	186,81	77,05	600,34	219,50	669,00	0,18	13,10	0,111	0,03	4,58	40,37	0,00
35-LAV	7,71	27,03	218	14,58	6,54	12,08	4,36	35,88	54,30	6,77	0,30	0,82	0,017	<0,03	<0,05	27,67	0,00
60-LAV	7,62	30,75	221	16,2	7,40	14,59	4,72	37,52	54,00	24,98	<0,01	0,85	0,015	<0,03	0,23	28,67	0,00
43-LAV	7,48	89,58	449	23,16	2,40	47,72	7,01	109,28	83,90	35,71	0,02	0,89	0,022	<0,03	0,92	10,64	2,75
59-LAV	7,38	87,99	452	20,41	2,13	43,34	6,21	107,35	85,00	24,40	<0,01	0,98	<0,006	0,31	0,69	9,39	0,00
50-LAV	7,76	66,91	286	27,05	4,56	14,39	5,43	81,63	40,20	41,71	<0,01	0,67	<0,006	< 0,03	0,23	26,75	1,15
58-LAV	7,86	75,84	285	26,94	4,90	15,51	5,65	92,52	41,20	41,54	0,20	0,91	0,154	0,16	0,23	24,49	0,00

Tabla 7-9. Listado de los valores de la composición química de las muestras dobles de la campaña de octubre 2013. Donde "ALC" es alcalinidad en mg $CaCO_3$/L; "CE" es conductividad eléctrica en µS/cm; y el resto de componentes es en mg/L. Fuente: laboratorio DICTUC

Nombre	pH	T° Analisis pH	ALC	C. E.	T° Análisis CE	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	HCO_3-	SO_4^{2-}	Cl^-	Al	B	As	Fe	CO_2	Si	NO_3
1-LAP2	8,00	25,0	155,90	1311	25,0	192,20	16,04	51,66	33,15	190,20	373,59	54,33	<0,01	3,40	<0,006	<0,03	0,23	59,7	3,90
2-LAP2	8,71	25,1	24,89	3330	25,0	565,80	33,24	97,02	34,62	30,36	1089,00	101,07	<0,01	6,19	<0,006	<0,03	<0,05	71,8	7,69
3- LAP2	8,78	24,8	40,07	6180	24,9	1065,00	53,94	192,07	69,12	48,88	2112,00	114,85	<0,01	16,70	<0,006	<0,03	<0,05	66,4	1,02
5-LAP2	8,10	25,0	198,00	6230	25,1	1048,00	69,67	209,05	79,56	241,56	2094,00	120,28	0,02	18,90	0,020	0,06	<0,05	13,9	7,17
8-LAV2	7,60	24,9	70,65	6280	24,8	1081,00	79,46	278,82	83,58	86,20	22,36	176,65	0,10	18,00	0,104	0,17	0,69	106,0	6,56
11-LAV2	7,03	24,9	145,08	2020	24,9	300,20	21,65	76,02	22,93	177,00	482,40	284,49	<0,01	16,90	<0,006	0,09	2,52	117,0	12,52
13-LAV2	7,65	24,9	122,41	3910	24,8	783,00	48,86	241,37	56,83	149,34	99,51	2138,00	0,01	7,93	0,147	<0,03	<0,05	76,6	2,78
14-LAS2	7,43	24,9	113,57	986	24,8	124,60	14,10	48,70	29,20	138,55	210,00	109,00	<0,01	1,68	0,006	<0,03	1,83	85,1	0,94
16-LAV2	7,60	24,8	133,92	2970	24,9	4081,00	246,91	616,01	208,45	163,38	6827,00	2954,00	<0,01	38,10	0,028	0,03	0,73	66,1	11,67
18-LAV2	7,53	24,9	99,03	2250	25,1	398,00	26,07	71,39	25,81	120,82	736,00	10,35	0,04	4,76	0,019	0,03	0,46	93,6	39,35
19-LAV2	7,33	24,8	367,57	2330	24,9	4143,94	196,10	919,31	186,62	448,43	8054,00	362,43	0,02	21,80	0,016	0,13	1,14	56,2	25,36
20-LAV2	7,92	24,9	71,52	231	24,8	33,07	7,06	19,76	6,56	87,26	21,43	16,03	0,02	0,83	0,008	0,11	0,59	72,4	8,52
21-LAV2	7,72	25,1	205,41	505	25,0	39,72	11,01	42,40	13,64	250,60	14,20	15,88	0,03	1,33	<0,006	0,11	<0,05	59,8	0,63
22-LAV2	7,56	25,0	135,49	270	25,1	16,05	6,03	41,08	8,94	165,30	28,24	28,36	0,02	0,47	<0,006	0,06	0,82	77,2	1,39
23-LAV2	7,71	24,8	66,65	1387	24,9	78,69	33,18	126,85	75,24	81,32	198,03	521,22	27,90	1,20	<0,006	0,54	<0,05	81,7	0,00
24-LAV2	7,66	25,1	71,82	433	25,0	62,56	13,76	24,87	9,53	87,61	67,32	104,50	0,02	0,83	0,009	<0,03	0,46	76,2	1,27
25-LAS2	8,10	24,9	538,07	1138	24,8	131,10	16,92	84,88	25,24	656,45	9,12	15,00	0,02	4,16	0,020	0,09	0,14	77,5	1,62
26-LAS2	7,63	24,8	624,25	1324	24,8	281,20	30,21	123,89	37,59	761,58	208,60	196,70	<0,01	4,87	0,015	0,10	0,73	70,2	5,64
27-LAS2	7,64	25,0	58,44	1456	25,1	191,00	31,60	114,00	33,40	71,30	502,10	164,74	0,03	6,75	0,016	0,05	0,92	77,2	0,00
28-LAS2	8,29	24,9	36,34	560	25,0	41,20	7,05	54,20	13,70	44,34	28,69	216,40	0,14	9,47	<0,006	0,21	0,23	37,9	1,92
28- LAS2	8,33	25,0	36,98	562	25,0	42,90	7,60	62,10	14,90	45,12	155,34	59,89	0,09	9,53	<0,006	0,07	<0,05	36,0	62,08
29-LAV2	7,71	24,9	290,63	1808	25,0	237,00	17,00	139,00	37,40	354,57	474,00	127,68	<0,01	7,94	0,013	<0,03	0,23	80,2	2,75
30-LAS2	7,02	25,1	203,18	3090	25,0	455,00	45,80	131,00	92,30	247,87	878,00	316,98	<0,01	8,69	0,017	<0,03	7,55	91,2	0,00
32-LAS2	7,68	24,9	81,58	2920	24,8	396,00	26,46	138,27	82,83	99,53	1080,00	40,81	0,02	8,73	0,012	0,06	1,24	83,6	0,00
33-LAS2	8,26	24,9	365,71	2900	24,9	479,00	54,50	127	89,1	446,16	945,49	279,49	0,02	8,36	0,0149	0,09	<0,05	69,8	0

Nombre	pH	T° Analisis pH	ALC	C. E.	T° Análisis CE	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	HCO_3-	SO_4^{2-}	Cl^-	Al	B	As	Fe	CO_2	Si	NO_3
34-LAS2	8,23	24,9	313,72	2920,0	24,9	471,00	48,30	116,00	90,30	382,74	894,00	145,30	0,03	8,23	0,0152	<0,11	0,69	56,4	0,00
35-LAV2	7,57	25,0	122,07	217,0	25,1	22,44	8,68	15,61	6,00	149,69	8,94	5,47	0,01	0,31	<0,006	0,05	<0,05	77,8	0,00
35-LAV2	7,98	25,1	66,87	219,0	25,0	22,58	8,71	15,89	5,96	81,58	8,33	61,92	0,01	0,26	<0,006	<0,03	<0,05	77,2	26,62
37-LAV2	6,67	25,0	233,07	1740,0	25,0	299,49	15,93	81,18	22,04	284,34	454,53	150,00	<0,01	7,10	<0,006	<0,03	8,92	88,9	7,24
38-LAS2	7,71	24,9	66,58	2700,0	24,8	511,00	38,22	146,00	24,29	81,23	752,75	333,00	0,02	9,15	0,018	0,22	0,37	61,6	0,00
39-LAV2	7,23	24,8	129,97	978,0	24,9	143,00	18,90	51,30	22,00	81,30	135,12	227,91	0,03	2,70	0,021	16,03	2,97	91,5	20,59
40-LAS2	8,50	25,1	109,85	267,0	25,1	32,06	6,78	16,24	6,70	119,19	14,20	5,33	0,01	0,76	<0,006	0,13	<0,05	55,5	0,00
41-LAV2	7,70	25,1	65,71	180,9	25,0	6,61	2,56	21,59	5,00	80,17	11,20	36,96	0,03	0,20	<0,006	0,03	0,23	24,9	0,40
42-LAV2	7,36	24,9	308,20	1061,0	24,8	51,30	6,20	168,00	20,40	376,00	59,39	348,22	<0,01	6,24	<0,006	<0,03	0,46	68,7	3,40
43-LAV2	7,425	25,0	298,60	443,0	25,1	34,68	10,97	61,95	8,82	364,29	4,18	13,98	0,04	0,77	<0,006	0,08	0,23	28,0	0,00
45-LAS2	8,10	25,0	298,60	1128,0	25,1	135,85	18,35	85,93	25,57	364,29	159,10	190,92	0,05	4,45	0,021	0,08	<0,05	50,2	1,80
46-LAS2	8,42	24,9	534,36	1134,0	25,0	132,05	18,08	85,66	25,57	649,12	48,96	77,39	0,04	4,42	0,021	0,07	<0,05	78,4	1,12
47-LAS2	7,76	24,9	304,36	2060,0	24,8	264,00	18,10	141,00	48,40	371,32	471,70	88,30	0,03	10,00	0,016	0,10	0,05	87,1	0,00
48-LAS2	8,67	25,0	58,32	1274,0	25,1	167,00	16,00	78,20	46,20	71,16	396,67	107,50	<0,01	1,84	0,027	<0,03	<0,05	87,5	0,00
49-LAV2	7,70	25,0	82,28	607,0	25,1	81,91	9,08	25,11	9,11	100,38	145,65	25,53	0,01	2,12	0,073	0,05	1,37	92,2	10,27
51-LAV2	8,79	25,0	90,21	223,0	25,0	22,76	4,15	21,02	9,87	96,57	40,34	16,72	0,10	0,51	0,009	0,12	<0,05	62,9	2,50
52-LAV2	7,88	25,1	17,45	87,7	25,0	12,00	2,01	5,33	0,69	21,28	5,60	12,60	<0,01	<0,01	<0,006	<0,03	0,23	52,7	0,57
53-LAV2	7,39	24,8	278,71	1137,0	24,9	146,00	18,54	58,36	15,90	340,03	217,94	26,31	<0,01	8,76	0,010	<0,03	0,92	111,0	1,08
54-LAV2	8,54	25,1	140,43	414,0	24,9	83,48	10,24	10,63	2,30	171,33	36,43	77,26	0,08	0,44	<0,006	0,10	<0,05	71,7	21,49
55-LAV2	7,71	24,8	54,95	1413,0	24,9	179,00	19,60	52,20	46,70	67,04	503,00	25,68	<0,01	3,50	0,016	<0,03	1,42	114,0	10,07
56-LAV2	7,34	24,8	298,31	3900,0	24,9	638,86	45,68	125,04	64,03	363,94	952,20	258,89	<0,01	0,04	0,148	<0,03	1,83	92,7	9,14
57-LAS2	7,52	24,9	72,69	203,0	25,0	21,20	1,19	33,73	15,24	88,68	36,08	98,10	<0,01	0,54	0,014	0,03	0,23	71,4	58,12
61-LAS2	7,53	25,0	124,15	473,0	24,9	47,17	8,18	26,02	12,71	151,46	57,76	64,65	0,05	2,56	0,017	0,09	0,23	74,0	19,98
70-LAS2	7,80	24,8	244,49	1125,0	24,9	145,35	17,86	92,92	28,74	298,28	149,50	246,16	0,03	4,18	0,021	0,03	1,05	85,1	21,97
71-LAS2	7,78	24,9	235,74	1129,0	25,0	150,10	21,26	94,69	28,74	287,60	168,04	274,89	0,24	5,03	0,021	<0,03	0,32	93,8	6,24

Nombre	pH	T° Analisis pH	ALC	C. E.	T° Análisis CE	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	HCO_3-	SO_4^{2-}	Cl^-	Al	B	As	Fe	CO_2	Si	NO_3
72-LAP2	8,27	24,9	230,27	393,0	25,0	74,20	10,10	10,50	5,05	280,93	7,15	6,00	5,28	0,52	<0,006	2,04	<0,05	74,9	29,61
73-LAS2	7,83	24,9	66,87	1571,0	24,8	327,87	24,15	94,35	27,52	81,58	556,00	304,98	0,02	4,76	0,021	0,11	0,46	72,8	49,66
74-LAS2	7,85	24,7	122,99	921,0	24,8	143,10	16,44	52,57	23,37	150,04	272,88	117,35	0,01	3,27	0,027	0,03	0,69	80,1	9,76
75-LAV2	7,77	24,9	93,04	162,8	24,9	10,03	6,54	26,36	4,01	113,51	14,38	6,17	0,02	0,64	<0,006	0,04	0,23	50,8	22,46
76-LAV2	7,03	25,0	355,01	1168,0	25,1	2153,00	102,37	838,11	189,94	433,11	4470,00	278,68	0,03	11,60	0,018	0,04	0,69	100,0	3,57
77-LAS2	8,20	25,1	244,46	875,0	25,2	95,14	10,81	41,96	16,01	298,24	102,10	32,17	0,03	2,85	0,025	0,11	<0,05	82,0	86,40
78-LAS2	8,25	24,9	303,14	874,0	24,8	104,27	11,70	49,50	20,97	369,83	107,90	51,00	<0,01	2,92	0,026	0,05	<0,05	81,7	0,00
79-LAV2	8,24	25,0	182,36	405,0	25,1	5,99	7,09	67,49	6,05	222,48	6,42	28,74	<0,01	0,55	0,007	<0,03	<0,05	16,8	13,77
80-LAV2	7,41	25,0	110,78	3920,0	25,1	8622,00	338,21	1953,52	288,75	135,15	19274,00	814,00	<0,01	47,50	0,026	0,04	1,14	52,1	2,40
81-LAV2	6,37	24,9	187,07	3060,0	25,0	262,00	18,00	287,00	88,70	228,22	1211,00	70,12	0,02	24,70	<0,006	0,03	8,92	95,1	9,39

Tabla 7-10. Listado de los valores de la composición química de las muestras de la campaña de diciembre 2003. Donde "T°" es temperatura en ºC; "ALC" es alcalinidad en mg $CaCO_3$/L; "CE" es conductividad eléctrica en µS/cm; y el resto de componentes es en mg/L. Fuente: laboratorio DICTUC.

Nombre	pH	ALC	C. E.	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	HCO_3-	SO_4^{2-}	Cl^-	Al	B	As	Fe	CO_2	Si	NO_3
28-LAS2	8,29	36,34	560	41,20	7,05	54,20	13,70	44,34	28,69	216,4	0,14	9,47	<0,006	0,21	0,23	37,9	1,92
28- LAS2	8,33	36,98	562	42,90	7,60	62,10	14,90	45,12	155,34	59,89	0,09	9,53	<0,006	0,07	<0,05	36,0	62,08
35-LAV2	7,57	122,07	217	22,44	8,68	15,61	6,00	149,69	8,94	5,47	0,01	0,31	<0,006	0,05	<0,05	77,8	0,00
35-LAV2	7,98	66,87	219	22,58	8,71	15,89	5,96	81,58	8,33	61,92	0,01	0,26	<0,006	<0,03	<0,05	77,2	26,62
70-LAS2	7,80	244,49	1125	145,35	17,86	92,92	28,74	298,28	149,50	246,16	0,03	4,18	0,021	0,03	1,05	85,1	21,97
71-LAS2	7,78	235,74	1129	150,10	21,26	94,69	28,74	287,60	168,04	274,89	0,24	5,03	0,021	<0,03	0,32	93,8	6,24

Tabla 7-11 Listado de los valores de la composición química de las muestras dobles de la campaña de diciembre 2013. Donde "ALC" es alcalinidad en mg $CaCO_3$/L; "CE" es conductividad eléctrica en µS/cm; y el resto de componentes es en mg/L. Fuente: laboratorio DICTUC

7.3.1 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

A continuación se analiza estadísticamente los valores de la composición hidroquímica obtenidos en el laboratorio con el objetivo de mostrar la variación entre los diferentes puntos de agua medidos. En el análisis hidroquímico realizado por el laboratorio se obtuvo el valor de temperatura, pH, alcalinidad, conductividad eléctrica, sodio, potasio, calcio, magnesio, bicarbonato, sulfato, cloruro, aluminio, boro, arsénico, hierro, carbonato, sílice y nitrato. De esta manera se presentan los valores máximos, mínimos, promedio y desviación estándar de los parámetros y elementos químicos de todos los puntos muestreados en la zona de estudio y de cada subcuenca por separado. Por tanto, con los valores máximos y mínimos se obtiene la amplitud del rango de variación, con el promedio el valor representativo del conjunto y con la desviación estándar se obtiene el grado de variabilidad del conjunto además de la representatividad del valor promedio.

En primer lugar se analizan los resultados obtenidos en el laboratorio de las muestras tomadas durante la primera campaña y a continuación los de la segunda campaña de terreno.

Primera campaña: Octubre 2013

En la **Tabla 7-12** se presentan los valores mínimos, máximos, promedio y desviación estándar de los parámetros y especies químicas, medidos en el laboratorio, de las muestras tomadas en la primera campaña de terreno. En la **Tabla 7-13** se muestran los valores mínimos, máximos, promedio y desviación estándar de los parámetros y elementos químicos separados por subcuencas. Por último, en la **Tabla 7-14** se presentan los valores de los parámetros y las especies químicas obtenidas en el laboratorio de las 5 muestras dobles.

El promedio del parámetro pH es 7,8 y la desviación estándar es 1,1. La muestra más ácida, cuyo pH es 6,7, se ubica en una vertiente en el nacimiento del Loa mientras que la muestra más básica, pH 9,3, se localiza en un vertiente en el borde noreste del salar de Ascotán. Este rango de pH es más amplio que el registrado en terreno, sin embargo la muestra más ácida coincide en terreno y en el laboratorio.

La alcalinidad presenta un amplio rango, variando entre 12 mg $CaCO_3$/L en una muestra tomada en el río Loa y 506,3 mg $CaCO_3$/L en el río Loa después de la confluencia del río San Pedro. El promedio de los valores de alcalinidad de las 60

muestras analizadas en el laboratorio es 142 mg $CaCO_3$/L y la desviación estándar es 122 mg $CaCO_3$/L.

El parámetro de conductividad eléctrica refleja la cantidad de sales disueltas en el agua. El promedio de este parámetro es 4.818 µS/cm y la desviación estándar es 14.730 µS/cm. Esta desviación es elevada debido el amplio rango de valores de C.E. entre la subcuenca del salar de Carcote y el resto de subcuencas, siendo el valor mínimo 85,3 µS/cm en una vertiente del volcán Inacaliri en la subcuenca de San Pedro y el valor máximo 106.700 µS/cm en una vertiente del salar de Carcote. Sin embargo el valor máximo de CE en el resto de subcuencas es 6.272,0 µS/cm en el borde este del salar de Ascotán.

Los cationes analizados en el laboratorio son Na^+, K^+, Ca^{2+} y Mg^{2+}. El promedio de Na^+ es 725,4 mg/L y la desviación estándar es 2.585,3 mg/L; el promedio de K^+ es 66,8 mg/L y la desviación estándar es 232,4 mg/L; el promedio de Ca^{2+} es 181,8 mg/L y la desviación estándar es 544,5 mg/L; y el promedio de Mg^{2+} es 55,9 mg/L y la desviación estándar es 159,6 mg/L. La desviación estándar es alta debido a la gran diferencia de concentraciones de cationes entre la subcuenca del salar de Carcote y el resto de la zona de estudio. La muestra 15-LAV, tomada en el salar de Carcote presenta las máximas concentraciones de cationes, siendo 19.448,2 mg/L de Na^+, 1.775,8 mg/L de K^+, 4.068,2 mg/L de Ca^{2+} y 1.227,7 mg/L de Mg^{2+}. Las siguientes concentraciones máximas en los cationes se han registrado en muestras ubicadas en el salar de Alconcha con 1.214,2 mg/L de Na^+, 95,6 mg/L de K^+,245,4 mg/L de Ca^{2+} y en la estación fluviométrica Siloli con 77,1 mg/L de Mg^{2+}. Los valores mínimos de concentración de cationes están más repartidos entre varias subcuencas, siendo 5,3 mg/L de Na^+ en una vertiente al NW del nacimiento del río Loa, 1,2 mg/L de K^+ en una vertiente en el borde poniente del salar de Ascotán y 4,5 mg/L de Ca^{2+} y 0,7 mg/L de Mg^{2+} en la vertiente del volcán Inacaliri.

Los aniones obtenidos en el laboratorio son HCO_3^-, SO_4^{2-} y Cl^-. El promedio de HCO_3^- es 171,1 mg/L y la desviación estándar es 146,9 mg/L; el promedio de SO_4^{2-} es 451,5 mg/L y la desviación estándar es 1.604,9 mg/L; por úlitmo el promedio de Cl^- es 1.284,1 mg/L y la desviación estándar es 4.585,4 mg/L. Del mismo modo que sucede en las concentraciones de cationes, la desviación estándar de los aniones es muy elevada debido al amplio rango de valores máximos y mínimos. El valor mínimo de HCO_3^- es de 14,5 mg/L y el máximo de 617,7 mg/L, que corresponden a aguas superficiales del río Loa después de la confluencia del río San Pedro y a la altura del cerro Palpana respectivamente. El valor de concentración más bajo de SO_4^{2-} es 10,3

mg/L en la vertiente del volcán Inacaliri y el valor máximo 12.179,6 mg/L, corresponde a la muestra 15-LAV del borde este del salar de Ascotán. El valor mínimo de concentración de Cl^- es 6,8 mg/L y corresponde con la muestra tomada en una vertiente del salar de Alconcha, mientras que el máximo es 34.767,1 mg/L de la muestra 15-LAV tomada en el salar de Ascotán.

Los metales analizados en el laboratorio son aluminio, arsénico y hierro. El promedio de Al es 1,0 y la desviación estándar es 5,6; el promedio de As es 0,1 y la desviación estándar es 0,1; y el promedio de Fe es 1,3 y la desviación estándar es 1,9. Los valores de Al inferiores a 0,01 mg/L se registran en muestras tomadas en el salar de Ascotán y en la subcuenca del Loa; sin embargo el valor máximo es 43,3 mg/L en el sector de Puquios (subcuenca de Alconcha). La concentración de As es inferior a 0,006 mg/L en la subcuenca del salar de Alconcha, de Ollagüe y Pampa Puno; y la de Fe es inferior a 0,03 mg/L en varios puntos de muestreo en la subcuenca de Ollagüe, Carcote y en el río Loa. El valor máximo de As es de 0,6 mg/L y de 11,4 mg/L en Fe, ambas muestras fueron tomadas en la parte sur del salar de Ascotán.

El promedio de Boro es 9,80 mg/L y la desviación estándar corresponde a 13,20 mg/L. El valor mínimo de concentración de B es inferior a 0,01 mg/L en una muestra tomada en un pozo al poniente del salar de Ascotán, mientras que el valor máximo es de 63,8 mg/L registrado en una vertiente del salar de Carcote.

El CO_2 tiene un promedio de 2,5 mg/L y una desviación estándar de 3,3 mg/L. El rango de valores varía entre una concentración minima de 0,05 mg/L en la subcuenca de salar de Ollagüe y un valor máximo, 17,7 mg/L, en Puquios.

De un modo complementario a los requisitos solicitados en las bases técnicas del proyecto se han analizado la molécula de Si y el NO_3. El promedio de la Si es 28,1 mg/L y la desviación estándar es 15,4 mg/L; y el promedio de NO_3 es 0,3 mg/L y la desviación estándar es 0,9 mg/L. El valor mínimo de Si corresponde a 0,7 mg/L en la vertiente del borde poniente del salar de Ascotán y el valor máximo es 92,0 mg/L en la aducción de Colana de la subcuenca de San Pedro. El valor mínimo de NO_3 es 0 mg/L en la subcuenca de Alconcha y de Pampa Puno y el valor máximo es 5,2 mg/L en una vertiente en el borde oriental del salar de Ascotán.

N° Muestras Totales=60

Valor	pH	ALC	C. E.	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	Al	B	As	Fe	CO_2	Si	NO_3
Mínimo	6,7	12	85	5,26	1,18	4,54	0,74	14,48	10,3	6,77	0,01	0,02	0,01	0,03	0,14	0,65	0,0
Máximo	9,3	506	109.700	19.448,20	1.775,80	4.068,20	1.227,70	617,70	12.179,6	34.767,10	43,30	63,80	0,60	11,40	17,70	92,00	5,2
Promedio	7,8	142	4.818	725,40	66 ,80	181,80	55,90	171,10	451,5	1.284,10	1,00	9,80	0,10	1,30	2,50	28,10	0,3
Desv. Estándar	1,1	122	14.730	2.585,30	232,40	544,50	159,60	146,90	1.604,9	4.585,40	5,60	13,20	0,10	1,90	3,30	15,40	0,9

Tabla 7-12. Valores estadísticos de los resultados del laboratorio de las muestras de la primera campaña de terreno, en octubre 2013. Donde "ALC" es alcalinidad en mg $CaCO_3$/L; "CE" es conductividad eléctrica en µS/cm; y el resto de componentes es en mg/L Fuente: elaboración propia.

SUBCUENCA ALCONCHA - N° Muestras=5

Valor	pH	ALC	C. E.	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	Al	B	As	Fe	CO_2	Si	NO_3
Mínimo	7,6	27,0	218,0	14,6	6,5	12,1	4,4	35,9	45,9	6,8	0,1	0,8	0,0	0,3	0,2	16,8	0,0
Máximo	8,3	83,0	1397,0	90,2	23,0	113,5	58,8	100,9	680,9	69,0	43,3	2,3	0,0	0,6	17,7	38,5	0,0
Promedio	7,8	54,0	654,0	44,6	15,5	51,3	21,1	67,2	233,6	40,0	11,0	1,6	0,0	0,4	9,0	27,8	0,0
Desv. Estándar	0,3	35,0	515,0	32,8	7,8	46,6	25,4	42,9	302,2	25,6	21,5	0,7	0,0	0,3	8,8	8,8	0,0

SUBCUENCA OLLAGÜE - N° Muestras=3

Valor	pH	ALC	C. E.	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	Al	B	As	Fe	CO_2	Si	NO_3
Mínimo	7,5	17,7	223,0	11,7	5,3	12,8	3,9	21,5	64,0	8,3	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	23,8	0,0
Máximo	7,8	41,2	407,0	20,4	6,6	29,7	8,3	50,3	108,8	21,4	0,2	2,0	0,0	0,1	0,0	26,8	0,1
Promedio	7,6	27,9	303,3	17,5	5,7	22,7	6,2	34,1	89,4	12,8	0,1	1,3	0,0	0,1	#¡DIV/0!	25,6	0,0
Desv. Estándar	0,2	12,1	94,2	5,0	0,7	8,8	2,2	14,7	23,0	7,4	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	1,6	0,1

SUBCUENCA CARCOTE - Nº Muestras=5

Valor	pH	ALC	C. E.	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	Al	B	As	Fe	CO_2	Si	NO_3
Mínimo	7,2	33,4	19.530,0	293,9	24,5	64,2	23,5	40,7	89,9	647,5	0,1	2,8	0,1	0,0	2,2	24,3	0,0
Máximo	7,9	434,7	109.700,0	19.448,2	1.775,8	4.068,2	1.227,7	531,4	12.179,6	34.767,1	0,4	63,8	0,4	0,3	16,7	33,8	2,8
Promedio	7,5	143,2	45.232,5	6.148,3	525,5	1.344,2	362,5	175,0	3.694,7	10.567,6	0,2	33,9	0,2	0,2	6,2	28,7	0,6
Desv. Estándar	3,4	180,3	42.485,1	7.577,9	707,5	1.574,2	489,0	237,9	4.843,5	13.716,1	0,1	27,7	0,1	0,1	6,7	4,3	1,3

SUBCUENCA ASCOTÁN - Nº Muestras=15

Valor	pH	ALC	C. E.	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	Al	B	As	Fe	CO_2	Si	NO_3
Mínimo	7,0	31,1	212,0	10,6	1,2	15,7	6,4	37,9	27,6	16,3	0,0	0,0	0,0	0,3	0,1	0,7	0,0
Máximo	9,3	277,7	6.272,0	1.214,2	95,6	245,4	73,2	338,8	282,6	1.945,9	0,7	48,8	0,6	11,4	4,1	65,0	5,2
Promedio	8,0	111,6	3.956,1	559,0	54,7	118,9	42,4	136,3	161,6	1.129,9	0,1	15,0	0,2	4,7	1,8	27,7	0,3
Desv. Estándar	0,6	68,9	2.167,2	336,7	27,3	79,6	23,0	84,1	88,7	679,8	0,2	13,0	0,2	3,4	1,3	20,4	1,3

SUBCUENCA PAMPA PUNO - Nº Muestras=1

Valor	pH	ALC	C. E.	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	Al	B	As	Fe	CO_2	Si	NO_3
42-LAV	7,6	297,8	870,0	19,6	3,8	100,5	7,2	363,3	111,1	29,3	0,4	3,7	0,0	0,4	2,0	7,0	0,0

SUBCUENCA SAN PEDRO - Nº Muestras=9

Valor	pH	ALC	C. E.	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	Al	B	As	Fe	CO_2	Si	NO_3
Mínimo	7,4	23,7	85,3	12,4	2,4	4,5	0,7	28,9	10,3	19,1	0,1	0,3	0,0	0,1	0,2	8,9	0,0
Máximo	9,0	284,3	1.416,0	318,9	89,3	68,6	39,4	346,8	133,7	491,7	0,2	7,0	0,2	5,8	2,6	92,0	1,5
Promedio	8,0	135,8	645,7	87,7	17,0	30,1	11,7	154,6	70,4	131,5	0,1	2,2	0,1	1,6	0,9	33,8	0,6
Desv. Estándar	0,6	91,6	517,1	96,5	27,5	24,9	12,3	106,3	44,5	158,1	0,1	2,3	0,1	1,9	0,8	23,6	0,6

SUBCUENCA LOA - Nº Muestras=24

Valor	pH	ALC	C. E.	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	Al	B	As	Fe	CO_2	Si	NO_3
Mínimo	6,7	11,9	187,2	5,3	1,8	15,7	4,3	14,5	27,7	8,1	0,0	0,4	0,0	0,0	0,2	8,2	0,0
Máximo	8,5	506,3	3.070,0	328,9	25,1	186,8	77,1	617,7	446,0	669,0	0,4	14,6	0,5	1,3	7,1	49,8	2,8
Promedio	7,7	191,6	1.525,3	152,0	14,4	79,3	31,2	231,1	190,4	264,7	0,2	7,4	0,2	0,3	1,7	27,1	0,2
Desv. Estándar	0,4	141,3	982,8	114,5	7,8	47,7	25,9	171,4	100,9	223,9	0,1	4,5	0,1	0,3	1,9	11,1	0,7

Tabla 7-13. Valores estadísticos por subcuencas de los resultados del laboratorio de las muestras de la primera campaña de terreno, en octubre 2013 Donde “ALC” es alcalinidad en mg $CaCO_3$/L; “CE” es conductividad eléctrica en µS/cm; y el resto de componentes es en mg/L. Fuente: elaboración propia.

Nombre	pH	ALC	C. E.	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	Al	B	As	Fe	CO_2	Si	NO_3	Error balance iónico (%)
11-LAP	6,99	124,74	2050	281,40	34,60	65,90	20,10	152,19	101,00	493,70	0,73	20,80	<0,006	6,49	2,64	49,7	0,00	-2,5
12-LAP	7,18	133,47	2030	239,60	32,60	64,60	18,50	162,84	100,70	486,30	0,25	16,30	<0,006	4,82	2,52	47,84	0,00	-14,4
ERROR (%)	-2,68	-6,76	0,98	16,05	5,95	1,99	8,29	-6,76	0,30	1,51	97,96	24,26	-	29,53	4,65	3,81		
30-LAS	7,24	506,27	3060	303,90	23,72	186,09	75,05	617,65	446,00	468,61	0,20	11,20	<0,006	<0,03	7,09	35,28	0,00	-10,8
31-LAS	7,41	492,08	3070	303,28	24,27	186,81	77,05	600,34	219,50	669,00	0,18	13,10	0,111	0,03	4,58	40,37	0,00	12,1
ERROR (%)	-2,32	2,84	-0,33	0,20	-2,29	-0,39	-2,63	2,84	68,07	-35,23	10,53	-15,64	-	-	43,02	-13,46		
35-LAV	7,71	27,03	218	14,58	6,54	12,08	4,36	35,88	54,30	6,77	0,30	0,82	0,017	<0,03	<0,05	27,67	0,00	-5,5
60-LAV	7,62	30,75	221	16,20	7,40	14,59	4,72	37,52	54,00	24,98	<0,01	0,85	0,0151	<0,03	0,23	28,67	0,00	-19,5
ERROR (%)	1,17	-12,88	-1,37	-10,53	-12,34	-18,82	-7,93	-4,47	0,55	114,71	-	-3,59	11,840	-!	-	-3,55		
43-LAV	7,48	89,58	449	23,16	2,40	47,72	7,01	109,28	83,90	35,71	0,02	0,89	0,022	<0,03	0,92	10,64	2,75	-13,1
59-LAV	7,38	87,99	452	20,41	2,13	43,34	6,21	107,35	85,00	24,4	<0,01	0,98	<0,006	0,31	0,69	9,39	0,00	-15,4
ERROR (%)	1,35	1,79	-0,67	12,62	11,92	9,62	12,10	1,78	-1,30	37,63	-	-9,63	-	-	28,57	12,48	200,00	
50-LAV	7,76	66,91	286	27,05	4,56	14,39	5,43	81,63	40,20	41,71	<0,01	0,67	<0,006	< 0,03	0,23	26,75	1,15	-31,3
58-LAV	7,86	75,84	285	26,94	4,90	15,51	5,65	92,52	41,20	41,54	0,20	0,91	0,154	0,16	0,23	24,49	0	-33,2
ERROR (%)	-1,28	-12,51	0,35	0,41	-7,19	-7,49	-3,97	-12,51	-2,46	0,41	-	-30,38	-	-	0,00	8,82	200,00	

Tabla 7-14. Valores de los parámetros y las especies químicas obtenidas en el laboratorio de las muestras tomadas en la primera campaña de terreno, octubre 2013 y el error de cada parámetro y de la muestra. Donde "ALC" es alcalinidad en mg $CaCO_3$/L; "CE" es conductividad eléctrica en µS/cm; y el resto de componentes es en mg/L. Fuente: elaboración propia.

En la **Tabla 7-15** se presentan los coeficientes de correlación de las variables analizadas en el laboratorio de las muestras tomadas en la campaña de terreno en octubre 2013. Se han excluido del cálculo de coeficiente de correlación las muestras con CE>5000 µS/cm, muestras que pertenecen a los puntos próximos a los salares, de esta forma las correlaciones son más representativas de las aguas con menor cantidad de solutos disueltos. Se resaltan los valores de correlación de tres formas distintas para remarcar los coeficientes de correlación más relevantes. Los coeficientes de correlación altos (mayores a 0,85) con color rojo, los valores de coeficiente medio (mayores a 0,60 y menores a 0,85) con color naranja y los valores de coeficiente de correlación más negativos (menores a -0,35).

Los mayores coeficientes de correlación se presentan entre la CE y el Cl (0,95) y Na (0,94), el TAC con HCO_3 (0,99), el Cl con el Na (0,98), el Al con el CO_2 y el δ^2H con el $\delta^{18}O$ (0,94).

Los coeficientes de correlación moderados (color naranja) están formados entre la CE y los elementos mayoritarios exceptuando los SO_4^{2-} además del B y As, también en los elementos mayoritarios entre si. A remarcar está la correlación entre el B con el As y Fe, el K con el Cl, Na y Fe.

Las correlaciones inversas demayor magnitud se encuentran entre la temperatura y el oxigeno disuelto, el pH con el Al, As y CO_2, y el oxígeno disuelto con el Fe.

Los valores de coeficiente de correlación presentados muestran relaciones comunes entre los diferentes compuestos del agua, ya que muestran comportamientos similares frente a variaciones de pH, aumento de los iones mayoritarios con el aumento de la CE y expresiones interdependientes como los HCO3. La alta correlación entre B y As puede deberse a un origen común.

	°C	pH	CE	OD	TAC	HCO_3	SO_4	Cl	Na	K	Ca	Mg	Al	B	As	Fe	CO_2	Si	NO_3	$\delta^{13}C$	$\delta^{18}O$	$\delta^{2}H$
°C	1.00																					
pH	-0.11	1.00																				
CE	0.32	0.00	1.00																			
OD	-0.62	0.13	0.13	1.00																		
TAC	-0.09	-0.03	0.54	0.21	1.00																	
HCO_3	-0.11	-0.06	0.55	0.23	0.99	1.00																
SO_4	-0.16	-0.34	0.46	0.35	0.53	0.54	1.00															
Cl	0.44	0.10	0.95	-0.01	0.36	0.33	0.23	1.00														
Na	0.46	0.04	0.94	-0.06	0.32	0.30	0.30	0.98	1.00													
K	0.57	-0.10	0.72	-0.17	0.17	0.17	0.25	0.81	0.83	1.00												
Ca	0.07	-0.09	0.80	0.26	0.78	0.78	0.67	0.63	0.60	0.45	1.00											
Mg	-0.11	-0.07	0.71	0.40	0.81	0.81	0.61	0.55	0.51	0.32	0.80	1.00										
Al	-0.14	-0.53	0.01	0.11	0.06	0.08	0.65	-0.12	-0.06	0.08	0.17	0.24	1.00									
B	0.54	-0.26	0.80	-0.09	0.30	0.31	0.29	0.77	0.82	0.71	0.55	0.35	-0.10	1.00								
As	0.37	-0.36	0.66	0.05	0.21	0.21	0.49	0.61	0.67	0.45	0.42	0.30	-0.10	0.80	1.00							
Fe	0.76	-0.21	0.48	-0.47	-0.02	-0.06	-0.15	0.62	0.63	0.80	0.09	-0.04	-0.07	0.73	0.51	1.00						
CO_2	-0.06	-0.77	0.32	0.11	0.71	0.72	0.78	0.13	0.21	0.18	0.47	0.54	0.88	0.14	0.65	0.06	1.00					
Si	0.44	-0.22	0.20	-0.09	0.16	0.15	0.18	0.23	0.24	0.54	0.23	0.18	0.17	0.38	0.23	0.51	0.13	1.00				
NO_3	0.00	0.18	-0.33	-0.23	-0.18	-0.20	-0.28	-0.27	-0.26	-0.19	-0.31	-0.32	-0.05	-0.26	-0.31	0.10	-0.13	-0.18	1.00			
$\delta^{13}C$	-0.08	0.18	0.50	0.41	0.58	0.56	0.35	0.40	0.37	0.30	0.52	0.57	-0.10	0.33	0.41	0.17	0.07	0.36	-0.30	1.00		
$\delta^{18}O$	0.00	0.14	0.20	0.09	0.46	0.47	0.02	0.09	0.06	0.01	0.32	0.28	-0.25	0.20	0.01	0.09	-0.32	-0.04	0.11	0.10	1.00	
$\delta^{2}H$	-0.12	0.18	0.22	0.14	0.59	0.60	0.03	0.11	0.07	-0.02	0.36	0.39	-0.26	0.15	-0.02	0.01	-0.33	-0.02	0.11	0.26	0.94	1.00

Tabla 7-15. Coeficiente de correlación de las variables de la composición hidroquímica de las muestras de la primera campaña de terreno de octubre 2013. Donde "ºC" es temperatura, "C.E." es conductividad eléctrica, "OD" es oxígeno disuelto y "TAC" es la alcalinidad. Fuente: elaboración propia.

Segunda campaña: Diciembre 2013

A continuación se analizan los valores mínimos, máximos, promedio y desviación estándar de los parámetros y especies químicas, obtenidos en el laboratorio, de las muestras tomadas en la segunda campaña de terreno. En la **Tabla 7-16** se presentan los valores mínimos, máximos, promedio y desviación estándar de los parámetros y especies químicas de las 60 muestras tomadas en la cuenca completa de estudio. En la **Tabla 7-17** se muestran estos valores separados por subcuencas.

El pH más ácido registrado durante toda la campaña de muestreo es de 6,4 correspondiendo a la muestra tomada en una vertiente en Baños Taira; el valor más básico es 8,8, de una muestra ubicada en la estación fluviométrica Siloli de la subcuenca San Pedro. El promedio del parámetro pH es 7,8 y la desviación estándar es 0,5.

El promedio de los valores de alcalinidad obtenidos en el análisis del laboratorio es 177,1 mg $CaCO_3$/L y la desviación estándar es 133,8 mg $CaCO_3$/L. El rango de valores de alcalinidad varía de 17,5 mg $CaCO_3$/L en la muestra tomada en la vertiente del volcán Inacaliri y de 624,3 mg $CaCO_3$/L en la muestra 26-LAS correspondiente a agua superficial del río Loa.

La conductividad eléctrica indica la concentración de sales disueltas en el agua. El promedio de este parámetro es 3.170,9 µS/cm y la desviación estándar es 6.831,7 µS/cm. El valor promedio y la desviación estándar son elevados debido a que el rango de C.E es muy amplio, siendo el valor mínimo 87,7 µS/cm, correspondiendo a la muestra tomada en la vertiente del volcán Inacaliri, y el valor máximo 39.200,0 µS/cm en el salar de Carcote. Cabe destacar que en la segunda campaña no se analizó en el laboratorio la muestra 15-LAV ubicada en la subcuenca de Carcote, la cual se caracteriza por presentar los mayores valores de conductividad eléctrica y elementos mayoritarios, pero sigue sucediendo lo mismo en las muestras tomadas en esta subcuenca.

Los cationes analizados en el laboratorio son Na^+, K^+, Ca^{2+} y Mg^{2+}. El promedio de Na^+ es 531,43 mg/L y la desviación estándar es 1.319,78 mg/L; el promedio de K^+ es 34,22 mg/L y la desviación estándar es 57,43 mg/L; el promedio de Ca^{2+} es 151,36 mg/L y la desviación estándar es 291,38 mg/L; y el promedio de Mg^{2+} es 43,86 mg/L y la desviación estándar es 54,80 mg/L. El valor mínimo de concentración de Na^+ se encuentra en la quebrada Sapunta (79-LAV2), siendo de 5,99 mg/L de Na^+; el valor mínimo de K^+ se registra en la muestra tomada en una quebrada del sector oeste de la

subcuenca de Ascotán y corresponde con 1,19 mg/L de K^+. Las concentraciones más bajas de Ca^{2+} y Mg^{2+} corresponden a la muestra tomada en la quebrada del volcán Inacaliri, siendo de 5,33 mg/L Ca^{2+} y de 0,69 mg/L Mg^{2+}, tal y como sucedía en la primera campaña de terreno. Los valores máximos de los cationes analizados los presenta la muestra 80-LAV2, ubicada en el norte del salar de Carcote, siendo 8.622 mg/L de Na^+, 338,21 mg/L K^+, 1.953,52 mg/L Ca^{2+} y 288,75 mg/L Mg^{2+}.

Los aniones analizados en el laboratorio son HCO_3^-, SO_4^{2-} y Cl^-. El promedio de HCO_3^- es 215,83 mg/L y la desviación estándar es 163,30 mg/L; el promedio de SO_4^{2-} es 219,29 mg/L y la desviación estándar es 465,45 mg/L; y el promedio de Cl^- es 1.011,29 mg/L y la desviación estándar es 2.810,88 mg/L. El valor mínimo de concentración de HCO_3^-, 21,28 mg/L, se muestreó en la estación fluviométrica de Siloli, mientras que el valor máximo, 761,58 mg/L en el río Loa. Las concentraciones más bajas de SO_4^{2-} y Cl^- las presentan las aguas del río Loa, siendo 2.954 mg/L y 19.274 mg/L respectivamente, mientras que los valores más altos los tienen muestras que se ubican en el salar de Carcote.

El promedio del boro es 6,85 mg/L y la desviación estándar es 8,87 mg/L. El rango de concentración de B varía entre valores inferiores a 0,01, en una muestra de la subcuenca de San Pedro, y 47,50 mg/L de B en la muestra 80-LAV2 localizada al norte de Carcote.

Los metales analizados en el laboratorio son aluminio, arsénico y hierro. Para el cálculo del promedio y de la desviación estándar de los tres metales se ha considerado 0 cuando el valor era inferior al valor detectable en el laboratorio. El promedio de Al es 0,58 mg/L y la desviación estándar es 3,65 mg/L; el promedio de As es 0,02 mg/L y la desviación estándar es 0,03 mg/L; y el promedio de Fe es 0,36 mg/L y la desviación estándar es 2,07 mg/L. Las muestras tomadas en Pampa Puno, alguna muestra del salar de Carcote, Ascotán, del río Loa y en la subcuenca San Pedro presentan concentraciones menores al 0,01 mg/L de Al, mientras que la muestra 23-LAV2 ubicada en Puquios tiene 27,90 mg/L. La concentración de As es menor a 0,006 mg/L en muestras ubicadas en la subcuenca del salar de Alconcha, de Ollagüe, Ascotán, Pampa Puno, San Pedro y en el río Loa, mientras que el valor máximo, 0,15 mg/L de As, se presenta en una muestra tomada en una vertiente del límite oriental del salar de Ascotán. En las subcuencas de Pampa Puno, Ascotán, Alconcha, San Pedro y el río Loa existen muestras que tienen una concentración de Fe menor al 0,03 mg/L, sin embargo en el norte del río Loa hay una muestra que contiene 16,03 mg/L.

El CO_2 tiene un promedio de 0,90 mg/L y una desviación estándar de 1,87 mg/L. Los valores mínimos de CO_2 los presentan algunas muestras tomadas en todas las subcuencas del área de estudio exceptuando la subcuenca del salar de Carcote. La mayor concentración de CO_2 es de 8,92 mg/L, y se ubica en una muestra del río Loa en los Baños de Taira.

Los análisis de Si y el NO_3 que se han incluido en el presente estudio tienen un promedio de 72,75 mg/L y 10,91 mg/L respectivamente, y una desviación estándar de 28,28 mg/L y 27,77 mg/L. La subcuenca de Ascotán registra el valor mínimo de contenido en Si, 13,90 mg/L, en un pozo del límite oeste del salar, y el valor máximo, 72,75 mg/L, en un pozo ubicada en el sector sur del salar. En todas las subcuencas existen muestras analizadas que no contiene NO_3, sin embargo en una vertiente del borde poniente del salar de Ascotán el agua tiene una concentración de 86,40 mg/L NO_3.

En la **Tabla 7-18** se muestra los valores de los parámetros y las especies químicas obtenidas en el laboratorio de las 3 muestras dobles tomadas en la segunda campaña de terreno realizada en diciembre de 2013.

N° Muestras Totales=60

Valor	pH	ALC	C. E.	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	Al	B	As	Fe	CO_2	Si	NO_3
Mínimo	6,4	17,5	87,7	5,99	1,19	5,33	0,69	21,28	5,33	4,18	0,01	0,04	0,01	0,03	0,05	13,90	0,00
Máximo	8,8	624,3	39.200,0	8.622,00	338,21	1.953,52	288,75	761,58	2.954,00	19.274,00	27,90	47,50	0,15	16,03	8,92	117,00	86,40
Promedio	7,8	177,1	3.170,9	531,43	34,22	151,36	43,86	215,83	219,29	1.011,29	0,58	6,85	0,02	0,36	0,90	72,75	10,91
Desv. Estándar	0,5	133,8	6.831,7	1.319,78	57,43	291,38	54,80	163,30	465,45	2.810,88	3,65	8,87	0,03	2,07	1,87	21,88	17,21

Tabla 7-16. Valores estadísticos de los resultados del laboratorio de las muestras de la segunda campaña de terreno, en diciembre 2013. Donde "ALC" es alcalinidad en mg $CaCO_3$/L; "CE" es conductividad eléctrica en µS/cm; y el resto de componentes es en mg/L Fuente: elaboración propia.

SUBCUENCA ALCONCHA - N° Muestras=5

Valor	pH	ALC	C. E.	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	Al	B	As	Fe	CO_2	Si	NO_3
Mínimo	7,6	66,7	162,8	10,03	6,54	15,61	4,01	81,32	5,47	8,33	0,01	0,26	<0,006	<0,03	<0,05	50,80	0,00
Máximo	8,0	122,1	1.387,0	78,69	33,18	126,85	75,24	149,69	521,22	198,03	27,90	1,20	0,01	0,54	0,46	81,70	5,64
Promedio	7,7	84,1	483,8	39,26	14,17	41,92	20,15	102,74	139,86	59,40	5,59	0,65	0,002	0,13	0,14	72,74	1,71
Desv. Estándar	0,2	23,8	515,4	29,64	10,95	47,74	30,86	29,39	217,19	81,34	12,47	0,39	0,004	0,23	0,21	12,44	2,32

SUBCUENCA OLLAGÜE - N° Muestras=3

Valor	pH	ALC	C. E.	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	Al	B	As	Fe	CO_2	Si	NO_3
Mínimo	7,6	71,5	231,0	16,05	6,03	19,76	6,56	87,26	15,88	14,20	0,02	0,47	<0,006	0,06	<0,05	59,80	0,00
Máximo	7,9	205,4	505,0	39,72	11,01	42,40	13,64	250,60	28,36	28,24	0,03	1,33	0,01	0,11	0,82	77,20	20,59
Promedio	7,7	137,5	335,3	29,61	8,03	34,41	9,71	167,72	20,09	21,29	0,02	0,88	0,00	0,09	0,47	69,80	7,00
Desv. Estándar	0,2	67,0	148,2	12,21	2,63	12,71	3,60	81,70	7,16	7,02	0,01	0,43	0,00	0,03	0,42	8,99	11,77

SUBCUENCA CARCOTE - N° Muestras=5

Valor	pH	ALC	C. E.	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	Al	B	As	Fe	CO_2	Si	NO_3
Mínimo	7,0	99,0	2.250,0	398,00	26,07	71,39	25,81	120,82	10,35	736,00	<0,01	4,76	0,02	0,03	0,46	52,10	0,00
Máximo	7,6	367,6	39.200,0	8.622,00	338,21	1.953,52	288,75	448,43	2.954,00	19.274,00	0,04	47,50	0,03	0,13	1,14	100,00	62,08
Promedio	7,4	213,3	31.226,0	3.879,59	181,93	879,67	179,91	260,18	883,89	7.872,20	0,02	24,75	0,02	0,05	0,83	73,60	19,74
Desv. Estándar	0,2	135,8	14.580,7	3.070,16	121,93	685,44	95,59	165,66	1.192,84	6.957,49	0,02	17,87	0,01	0,04	0,30	21,90	25,86

SUBCUENCA ASCOTÁN - N° Muestras=10

Valor	pH	ALC	C. E.	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	Al	B	As	Fe	CO_2	Si	NO_3
Mínimo	7,0	24,9	203,0	21,20	1,19	33,73	15,24	30,36	54,33	36,08	<0,01	0,04	<0,006	<0,03	<0,05	13,90	0,00
Máximo	8,8	298,3	6.280,0	1.081,00	79,46	278,82	83,58	363,94	2.138,00	2.236,00	0,10	18,90	0,15	0,17	2,52	117,00	86,40
Promedio	7,8	124,2	3.435,0	581,99	38,38	135,35	48,83	151,47	345,57	968,48	0,01	9,03	0,04	0,04	0,73	76,06	21,29
Desv. Estándar	0,6	81,5	2.281,6	408,03	25,49	88,45	24,70	99,43	634,07	881,02	0,03	7,79	0,06	0,06	0,96	28,28	27,77

SUBCUENCA PAMPA PUNO - N° Muestras=2

Valor	pH	ALC	C. E.	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	Al	B	As	Fe	CO_2	Si	NO_3
Mínimo	7,4	182,4	405,0	5,99	6,20	67,49	6,05	222,48	28,74	6,42	<0,01	0,55	<0,006	<0,03	<0,05	16,80	0,00
Máximo	8,2	308,2	1.061,0	51,30	7,09	168,00	20,40	376,00	348,22	59,39	0,00	6,24	0,01	0,00	0,46	68,70	7,69
Promedio	7,8	245,3	733,0	28,65	6,65	117,75	13,23	299,24	188,48	32,91	0,00	3,40	0,00	0,00	0,23	42,75	3,85
Desv. Estándar	0,6	89,0	463,9	32,04	0,63	71,07	10,15	108,56	225,91	37,46	0,00	4,02	0,00	0,00	0,33	36,70	5,44

SUBCUENCA SAN PEDRO - N° Muestras=7

Valor	pH	ALC	C. E.	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	Al	B	As	Fe	CO_2	Si	NO_3
Mínimo	7,4	17,5	87,7	12,00	2,01	5,33	0,69	21,28	12,60	5,60	<0,01	<0,01	<0,006	<0,03	<0,05	52,70	0,00
Máximo	8,8	278,7	1.413,0	179,00	19,60	78,20	46,70	340,03	107,50	503,00	0,10	8,76	0,07	0,12	1,42	114,00	10,27
Promedio	8,1	103,2	736,5	98,88	11,37	35,84	18,68	123,97	41,66	192,23	0,03	2,45	0,02	0,04	0,56	84,57	3,78
Desv. Estándar	0,6	86,1	534,2	67,26	6,91	27,30	19,63	105,52	36,10	192,95	0,04	3,03	0,03	0,05	0,66	23,39	4,27

SUBCUENCA LOA - N° Muestras=28

Valor	pH	ALC	C. E.	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	Al	B	As	Fe	CO_2	Si	NO_3
Mínimo	6,4	36,3	180,9	6,61	2,56	10,50	5,00	44,34	5,33	4,18	<0,01	0,20	<0,006	<0,03	<0,05	24,90	0,00
Máximo	8,5	624,3	3.090,0	511,00	54,50	287,00	92,30	761,58	333,00	1.211,00	5,28	24,70	0,03	16,03	8,92	95,10	58,12
Promedio	7,8	224,1	1.418,9	201,19	20,42	90,38	34,18	273,25	137,65	352,12	0,22	5,97	0,01	0,71	1,29	70,91	9,97
Desv. Estándar	0,5	157,3	927,1	151,69	13,09	56,15	27,76	191,66	104,79	368,80	0,99	4,77	0,01	3,02	2,61	19,91	13,60

Tabla 7-17. Valores estadísticos por subcuencas de los resultados del laboratorio de las muestras de la segunda campaña de terreno, en diciembre 2013 Donde “ALC” es alcalinidad en mg $CaCO_3$/L; “CE” es conductividad eléctrica en µS/cm; y el resto de componentes es en mg/L. Fuente: elaboración propia.

Nombre	pH	ALC	C. E.	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	Al	B	As	Fe	CO_2	Si	NO_3	Error balance iónico (%)
28-LAS2	8,29	36,34	560	41,20	7,05	54,20	13,70	44,340	216,40	28,69	0,14	9,47	0,006	0,21	0,23	37,90	21,49	-0,97
28-LAS2	8,33	36,98	562	42,90	7,60	62,10	14,90	45,120	59,89	155,34	0,09	9,53	0,006	0,07	0,05	36,00	9,14	-4,78
ERROR (%)	-0,48	-1,75	-0,36	-4,04	-7,51	-13,59	-8,39	-1,744	113,29	-137,64	43,48	-0,63	0,00	100,00	128,57	5,14	80,64	
35-LAV2	7,57	122,07	217	22,44	8,68	15,61	6,00	149,690	5,47	8,94	0,01	0,31	0,006	0,05	0,05	77,80	1,27	-6,95
35-LAV2	7,98	66,87	219	22,58	8,71	15,89	5,96	81,580	61,92	8,33	0,01	0,26	0,006	0,03	0,05	77,20	1,62	-7,42
ERROR (%)	-5,27	58,43	-0,92	-0,62	-0,35	-1,78	0,67	58,901	-167,53	7,06	0,00	17,54	0,00	50,00	0,00	0,77		
70-LAS2	7,80	244,49	1125	145,35	17,86	92,92	28,74	298,280	246,16	149,50	0,03	4,18	0,0208	0,03	1,05	85,10	7,17	-2
71-LAS2	7,78	235,74	1129	150,10	21,26	94,69	28,74	287,600	274,89	168,04	0,24	5,03	0,0206	0,03	0,32	93,80	12,52	-4,1
ERROR (%)	0,26	3,64	-0,35	-3,22	-17,38	-1,89	0,00	3,646	-11,03	-11,68	-155,56	-18,46	0,97	0,00	106,57	-9,73	-54,34	

Tabla 7-18. Valores de los parámetros y las especies químicas obtenidas en el laboratorio de las muestras tomadas en la primera campaña de terreno, octubre 2013 y el error de cada parámetro y de la muestra. Donde “ALC” es alcalinidad en $mCaCO_3/L$; “CE” es conductividad eléctrica en µS/cm; y el resto de componentes es en mg/L. Fuente: elaboración propia.

En la **Tabla 7-19** se muestran los valores del coeficiente de correlación que existen entre los parámetros (pH, temperatura, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto y alcalinidad), los elementos mayoritarios, los metales (Al, As, Fe), Boro, CO_2, Si, NO_3 y la molécula del agua (H_2O). Del mismo modo que sucedía en los coeficientes de correlación del análisis hidroquímico de la primera campaña de terreno, destaca el alto coeficiente de correlación que hay entre los cationes (Na^+, K^+, Ca^{2+} y Mg^{2+}), siendo del 1,00 al 0,95. También el coeficiente de correlación entre la alcalinidad y el HCO_3^- es muy elevado (1), y entre el $\delta^{18}O$ y el δ^2H (0,96). Menos elevado que los anteriores, hay correlación entre el Boro y la conductividad eléctrica (0,61).

	°C	pH	C. E.	OD	TAC	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Al	B	As	Fe	CO_2	Si	NO_3	$\delta^{18}O$	δ^2H
°C	1,00	0,02	0,33	-0,28	-0,25	-0,25	-0,05	0,39	0,30	0,22	0,20	0,21	-0,23	0,52	0,07	0,17	0,21	0,38	-0,03	0,01	0,04
pH	0,02	1,00	-0,10	-0,34	-0,17	-0,17	-0,06	-0,08	-0,06	-0,17	-0,17	-0,20	-0,35	-0,12	0,11	-0,17	-0,31	-0,16	-0,32	-0,10	-0,10
C. E.	0,33	-0,10	1,00	-0,12	0,01	0,01	0,32	0,39	0,41	0,48	0,38	0,55	-0,03	0,61	0,49	-0,07	0,27	0,08	0,28	-0,06	-0,07
OD	-0,28	-0,34	-0,12	1,00	0,35	0,35	0,03	-0,16	-0,13	-0,03	0,06	-0,01	-0,11	0,07	-0,19	-0,09	-0,19	-0,25	0,34	0,46	0,42
TAC	-0,25	-0,17	0,01	0,35	1,00	1,00	-0,04	0,01	0,03	0,06	0,10	0,14	-0,12	0,01	-0,08	-0,13	0,02	0,06	0,02	0,03	0,10
HCO_3^-	-0,25	-0,17	0,01	0,35	1,00	1,00	-0,04	0,01	0,03	0,07	0,10	0,14	-0,12	0,01	-0,07	-0,13	0,02	0,06	0,02	0,03	0,11
SO_4^{2-}	-0,05	-0,06	0,32	0,03	-0,04	-0,04	1,00	0,39	0,49	0,60	0,40	0,53	0,15	0,54	0,36	0,00	-0,01	0,00	0,13	-0,04	-0,09
Cl^-	0,39	-0,08	0,39	-0,16	0,01	0,01	0,39	1,00	0,99	0,95	0,98	0,88	-0,06	0,83	0,00	-0,06	0,00	-0,10	0,18	-0,11	-0,17
Na^+	0,30	-0,06	0,41	-0,13	0,03	0,03	0,49	0,99	1,00	0,98	0,97	0,89	-0,07	0,84	0,05	-0,06	-0,02	-0,10	0,21	-0,12	-0,19
K^+	0,22	-0,17	0,48	-0,03	0,06	0,07	0,60	0,95	0,98	1,00	0,93	0,93	0,01	0,87	0,08	-0,06	-0,02	-0,08	0,26	-0,13	-0,19
Ca^{2+}	0,20	-0,17	0,38	0,06	0,10	0,10	0,40	0,98	0,97	0,93	1,00	0,90	-0,02	0,81	0,04	-0,07	0,02	-0,06	0,16	-0,10	-0,16
Mg^{2+}	0,21	-0,20	0,55	-0,01	0,14	0,14	0,53	0,88	0,89	0,93	0,90	1,00	0,11	0,84	0,07	-0,08	0,11	0,04	0,27	-0,10	-0,13
Al	-0,23	-0,35	-0,03	-0,11	-0,12	-0,12	0,15	-0,06	-0,07	0,01	-0,02	0,11	1,00	-0,14	-0,01	0,01	-0,15	0,09	-0,04	-0,17	-0,20
B	0,52	-0,12	0,61	0,07	0,01	0,01	0,54	0,83	0,84	0,87	0,81	0,84	-0,14	1,00	0,03	-0,10	0,19	-0,03	0,21	0,03	-0,03
As	0,07	0,11	0,49	-0,19	-0,08	-0,07	0,36	0,00	0,05	0,08	0,04	0,07	-0,01	0,03	1,00	-0,03	0,07	0,22	-0,11	-0,13	-0,19
Fe	0,17	-0,17	-0,07	-0,09	-0,13	-0,13	0,00	-0,06	-0,06	-0,06	-0,07	-0,08	0,01	-0,10	-0,03	1,00	0,22	0,16	0,00	-0,10	-0,10
CO_2	0,21	-0,31	0,27	-0,19	0,02	0,02	-0,01	0,00	-0,02	-0,02	0,02	0,11	-0,15	0,19	0,07	0,22	1,00	0,33	0,07	-0,02	0,04
Si	0,38	-0,16	0,08	-0,25	0,06	0,06	0,00	-0,10	-0,10	-0,08	-0,06	0,04	0,09	-0,03	0,22	0,16	0,33	1,00	-0,03	-0,39	-0,32
NO_3	-0,03	-0,32	0,28	0,34	0,02	0,02	0,13	0,18	0,21	0,26	0,16	0,27	-0,04	0,21	-0,11	0,00	0,07	-0,03	1,00	0,06	0,06
$\delta^{18}O$	0,01	-0,10	-0,06	0,46	0,03	0,03	-0,04	-0,11	-0,12	-0,13	-0,10	-0,10	-0,17	0,03	-0,13	-0,10	-0,02	-0,39	0,06	1,00	0,96
δ^2H	0,04	-0,10	-0,07	0,42	0,10	0,11	-0,09	-0,17	-0,19	-0,19	-0,16	-0,13	-0,20	-0,03	-0,19	-0,10	0,04	-0,32	0,06	0,96	1,00

Tabla 7-19. Coeficiente de correlación de las variables de la composición hidroquímica de las muestras de la segunda campaña de terreno de diciembre 2013. Donde "ºC" es temperatura, "C.E." es conductividad eléctrica, "OD" es oxígeno disuelto y "TAC" es la alcalinidad. Fuente: elaboración propia.

7.3.2 BALANCE IÓNICO

El balance iónico es un método de control que mediante comprobaciones analíticas, permite validar el resultado de un análisis hidroquímico.

Para calcular el balance iónico se considera que en condiciones estables y de manera natural, las aguas subterráneas se encuentran en equilibrio químico o eléctrico, es decir, la suma de las concentraciones de aniones (-) debe ser igual a la suma de concentraciones de los cationes (+). Un método para comprobar la coherencia y el margen de error de un análisis hidroquímico consiste en igualar las sumas de las concentraciones de cationes y aniones, como se indica en la siguiente ecuación:

$$\sum \text{cationes} \left(\frac{\text{meq}}{\text{l}}\right) = \sum \text{aniones} \left(\frac{\text{meq}}{\text{l}}\right)$$

Una vez se realiza este balance se toma como error el porcentaje calculado con la siguiente ecuación:

$$Error\ (\%) = 200 \frac{\sum cationes - \sum aniones}{\sum cationes + \sum aniones}$$

El porcentaje de error obtenido de la última ecuación debe ser comparado con la conductividad eléctrica del agua para determinar si se trata de un rango aceptable o no.

Primera campaña: Octubre 2013

En los análisis hidroquímicos realizados también se incluyen las concentraciones de compuestos químicos neutros como la sílice (SiO_2), que al encontrarse disuelto en forma molecular, no se incluye en el balance iónico.

En la **Tabla 7-20** se presenta el listado de los errores del balance iónico de las 60 muestras de la campaña de octubre 2013. El rango de error del balance iónico varía entre -44,3% a 11,9%, siendo el promedio -12,30% y la desviación estándar de 12,38%. De las 60 muestras, 51 tienen valores negativos debido a que los valores de los aniones es mayor que los valores de los cationes, mientras que 9 muestras tienen valores positivo por tener mayor cantidad de cationes que aniones. El valor promedio de las muestras con error negativo es de -15,78% mientras que el promedio de los valores positivos es de 7,42%. En este análisis hidroquímico se ha considerado el 10% como error aceptable, ya que el promedio de la conductividad eléctrica de las 60 muestras analizadas es de 4.818 µS/cm.

Muestra	Error (%)
1-LAP	-20,9
2-LAP	9,9
3-LAP	-5,5
5-LAP	10,9
6-LAV	-9,8
7-LAV	-13,7
8-LAV	-11,4
9-LAV	-7,1
10-LAP	-3,6
11-LAP	-2,5
12-LAP	-14,4
13-LAV	-9,3
14-LAV	-9,9
15-LAV	-3,9
16-LAV	11,9
17-LAV	8,8
18-LAV	-8,2
19-LAV	3,8
20-LAV	3,4
21-LAV	-5,9
22-LAV	-20,8
23-LAV	-1,9
24-LAV	-2,7
25-LAS	-20,3
26-LAS	-19,9
27-LAS	-11,2
28-LAS	-16,2
29-LAV	3,1
30-LAS	-10,8
31-LAS	-12,1
32-LAS	-7,5
33-LAS	-16,5
34-LAS	-8,4
35-LAV	-5,5
36-LAV	-3,4
37-LAV	-8,7
38-LAS	-3,1
39-LAV	-19,7
40-LAS	-25,9
41-LAV	-28,6
42-LAV	-32,5
43-LAV	-13,1
44-LAS	-18,9
45-LAS	-20,3
46-LAS	10,4
47-LAS	-18,4
48-LAS	-23
49-LAV	-21,2
50-LAV	-31,3
51-LAV	-32,7
52-LAV	-33,2
53-LAV	4,6
54-LAV	-44,3
55-LAS	-15,8
56-LAV	-16,9
57-LAS	-26,6
58-LAV	-33,2
59-LAV	-15,4
60-LAV	-19,5
61-LAS	-19,3

Tabla 7-20. Listado con los valores del error del balance iónico de las muestras de la campaña octubre 2013. Fuente: elaboración propia

El error del balance iónico aceptable es del 10%, sin embargo 36 análisis tienen un error mayor al aceptable, de los cuales 3 tiene un error mayor al 10% y 33 muestras tienen un error negativo mayor a -10%. Esto puede ser debido a que el laboratorio ha sobreestimado el valores de aniones o subestimado los cationes. La caracterización hidrogeoquímica que se presenta en este informe estará condicionada por este error en el balance iónico.

La **Tabla 7-21** muestra los valores del error del balance iónico en las 5 muestras dobles. Estos valores varían de la siguiente manera: el error de la muestra 11-LAP es -2,5% y de la muestra 12-LAP es -14,%; de la pareja de muestras dobles 30-LAS y 31-LAS el error es -10,8 y -12,1% respectivamente, de la muestra doble 35-LAS y 60-LAS varía de -5,5 a -19,5%; el error de la muestra 43-LAV es -13,1% mientras que de la muestra 59-LAV es -15,4%; y de la muestra doble 50-LAV y 58-LAV es -31,3 y -33,2% respectivamente.

Muestra	Error (%)
11-LAP	-2,5
12-LAP	-14,4
30-LAS	-10,8
31-LAS	-12,1
35-LAV	-5,5
60-LAV	-19,5
43-LAV	-13,1
59-LAV	-15,4
50-LAV	-31,3
58-LAV	-33,2

Tabla 7-21. Valores del error del balance iónico de las muestras dobles tomadas en la primera campaña de terreno, octubre 2013. Fuente: elaboración propia.

Segunda campaña: Diciembre 2013

En la **Tabla 7-22** se presenta el listado de los errores del balance iónico de las 60 muestras tomadas durante la campaña de diciembre 2013. El rango de error del balance iónico varía entre -28,82% a 17,22%, siendo el promedio -5,03% y la desviación estándar de 9,32%. Del total de las muestras 45 tienen valores negativos y

las 15 restantes un valor positivo, esto es debido a la subestimación o sobreestimación de cationes y/o aniones en el análisis hidroquímico del laboratorio. El valor promedio de las muestras con error negativo es de -9,32% mientras que el promedio de los valores positivos es de 7,86%. En este análisis hidroquímico se ha considerado el 10% como error aceptable, ya que el promedio de la conductividad eléctrica de las 60 muestras analizadas es de 6.280 µS/cm.

Muestra	Error (%)
1-LAP2	-5,52
2-LAP2	-1,84
3-LAP2	-0,84
5-LAP2	-1,78
8-LAV2	2,54
11-LAP2	-15,68
13-LAV2	4,32
14-LAV2	-11,02
16-LAV2	-10,34
18-LAV2	3,14
19-LAV2	1,5
20-LAV2	15,22
21-LAV2	8,1
22-LAV2	-12
23-LAV2	-6,12
24-LAV2	-7,74
25-LAS2	9,26
26-LAS2	-1,64
27-LAS2	-9,88
28-LAS2	-1,94
28-LAS2	-9,56
29-LAS2	-5,76
30-LAS2	-1,86
32-LAS2	-4,06
33-LAS2	-11,04
34-LAS2	-1,38
35-LAV2	-13,9
35-LAV2	-14,84
37-LAV2	-7,56
38-LAS2	8,36
39-LAV2	9,96
40-LAS2	17,22
41-LAV2	-28,82
42-LAV2	-19,96
43-LAV2	-13,18
45-LAS2	-12,94
46-LAS2	-8,32
47-LAS2	7,88
48-LAS2	5,1
49-LAV2	-8
51-LAV2	-3,66
52-LAV2	10,38
53-LAV2	-11,68
54-LAV2	-19,52
55-LAS2	-7,26
56-LAV2	4,84
57-LAS2	-16,1
61-LAV2	-16,92
70-LAS2	-4
71-LAS2	-8,2
72-LAP2	-10,86
73-LAS2	-6,7
74-LAS2	-11,96
75-LAV2	-6,26
76-LAV2	10,14
77-LAS2	-7,5
78-LAS2	-11,82
79-LAS2	-2,72
80-LAV2	-10,76
81-LAV2	-16,1

Tabla 7-22. Listado con los valores del error del balance iónico de las muestras de la campaña diciembre 2013. Fuente: elaboración propia

El error del balance iónico aceptable es del 10%, sin embargo 24 análisis hidroquímico tienen un error mayor al aceptable, de los cuales 4 tiene un error mayor al 10% y 20 muestras tienen un negativo mayor a -10%. Esto puede ser debido a que el laboratorio ha sobreestimado el valores de aniones o subestimado los cationes. La caracterización hidrogeoquímica que se presenta en este informe estará condicionada por este error en el balance iónico.

La **Tabla 7-16** muestra los valores del error del balance iónico en las 3 muestras dobles. Estos valores varía de la siguiente manera: el error de la muestra 28-LAS2 varía de -0,97 a -4,78%; de la muestra doble 35-LAV2 cambia de -6,95 a -7,42%; y de la muestra doble 70-LAS2 y 71-LAS2 es -2 y -4,1% respectivamente.

Muestra	Error (%)
28-LAS2	-0,97
28-LAS2	-4,78
35-LAV2	-6,95
35-LAV2	-7,42
70-LAS2	-2
71-LAS2	-4,1

Tabla 7-23. Valores del error del balance iónico de las muestras dobles tomadas en la segunda campaña de terreno, diciembre 2013. Fuente: elaboración propia.

7.3.3 PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS

Los parámetros físico-químicos derivados de los resultados de laboratorio que se han calculado y/o analizado han sido alcalinidad, dureza, índice de saturación (IS) y relación de absorción de sodio (RAS).

Los valores de alcalinidad empleados han sido los facilitados por el laboratorio de hidroquímica que fueron calculados a partir de análisis volumétricos según la norma 2320 del *Standard Methods for the examination of water and wastewater* propuestas por la Norma Chilena Oficial NCh 1333.Of78 sobre calidad del agua para diferentes usos.

La dureza ha sido calculada a partir de la siguiente ecuación que calcula este parámetro físico-químico considerando la suma de concentraciones de calcio y magnesio (Custodio y Llamas, 2001):

$$CaCO_3 \frac{mg}{L} = 50\left(\frac{[Ca^{2+}]}{20} + \frac{[Mg^{2+}]}{12}\right)$$

Donde $[Ca^{2+}]$ y $[Mg^{2+}]$ son las concentraciones de calcio y magnesio en mg/L.

Por lo que respecta al IS, este ha sido calculado para calcita ($CaCO_3$), anhidrita ($CaSO_4$) y halita (NaCl) según la siguiente fórmula (Appelo y Postma, 2005):

$$IS = log\left(\frac{PAI}{K_s}\right)$$

Donde PAI representa el producto de la actividad de los iones y K_s la constante de solubilidad de cada mineral (**Tabla 7-24**).

Mineral	K_s	Fuente
Calcita	$10^{-8,35}$	*Fetter, 2001*
Anhidrita	$10^{-4,5}$	*Fetter, 2001*
Halita	$10^{1,54}$	*Domenico* y *Schwartz, 1999*

Tabla 7-24. Constantes de solubilidad (K_s) de la calcita, anhidrita y halita. Fuente: elaboración propia.

Finalmente, mediante el parámetro físico-químico RAS se ha obtenido una valoración de la calidad de las aguas para su uso como aguas de riego. La clasificación de las aguas en función de sus valores de RAS se ha realizado según las especificaciones del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (*USDA, 1954*). Este parámetro tiene en cuenta las concentraciones en meq/L de sodio con respecto a las de calcio y magnesio.

$$RAS = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}}$$

Primera Campaña: Octubre 2013

Alcalinidad

Las alcalinidades en la zona de estudio no superan los 300 mg $CaCO_3$/L de promedio. Por lo que respecta a los salares, las alcalinidades promedio del salar de Ascotán y de Carcote son similares con valores de aproximadamente 110 y 140 mg $CaCO_3$/L respectivamente. Por otro lado, los salares de Ollagüe y Alconcha han mostrado

alcalinidades comparativamente más bajas con valores promedio alrededor de los 30 mg $CaCO_3$/L.

La alcalinidad en vega Sapunta (Pampa Puno) muestra un valor de 298 mg $CaCO_3$/L que representa aproximadamente el doble de las muestras cercanas situadas en la zona de cabecera del río Loa.

La variación de la alcalinidad en el río Loa presenta de modo general un incremento desde las zonas más altas con valores alrededor de los 100 mg $CaCO_3$/L a las más bajas con un valor de hasta 272 mg $CaCO_3$/L en Chiu Chiu. Sin embargo, existen puntos concretos en el recorrido del río Loa donde la magnitud de este parámetro físico-químico presenta descensos significativos. Estos corresponden a las muestras 46-LAS y 28-LAS cuyas alcalinidades son de aproximadamente 12 y 20 mg $CaCO_3$/L respectivamente. Por lo contrario, la muestra 30-LAS situada tras la confluencia del río San Pedro muestra un incremento significativo de la alcalinidad con un valor de aproximadamente 500 mg $CaCO_3$/L que, aguas abajo, se reduce progresivamente.

En la cuenca del río San Pedro los valores de alcalinidad más bajos se sitúan en las muestras de la parte más alta con valores que varían entre 20 y 90 mg $CaCO_3$/L aproximadamente. Aguas más abajo, la alcalinidad del río alcanza valores de entre 250 y 300 mg $CaCO_3$/L.

Dureza

Los valores de dureza de las aguas más elevados de toda el área de estudio se encuentran en las vertientes de los salares de Ascotán y Carcote con promedios respectivos de aproximadamente 500 y 4500 mg $CaCO_3$/L. Por lo contrario, los valores de dureza más bajos, inferiores a 150 mg $CaCO_3$/L se asocian con vertientes de las zonas altas del río Loa y río San Pedro y las vertientes asociadas a los acuíferos colgados en los salares de Alconcha y Ollagüe.

En el río Loa la variación de la dureza sigue un patrón equivalente al de la alcalinidad. En su zona de cabecera la dureza del agua muestra un valor de 277 mg $CaCO_3$/L que incrementa hasta aproximadamente 300 mg $CaCO_3$/L en la muestra 44-LAS. A partir de aquí la dureza experimenta un descenso en el sector de las muestras 45-LAS, 46-LAS y 25-LAS y tras la muestra 26-LAS este parámetro vuelve a incrementar. Aguas más abajo, en la muestra 28-LAS se produce de nuevo un descenso significativo de la dureza del agua alcanzando un valor de aproximadamente 150 mg $CaCO_3$/L. Sin embargo, inmediatamente después los valores de dureza vuelven a aumentar rápidamente.

La influencia del aporte proveniente de la cuenca del río San Pedro aguas más abajo es también significativa, donde se registra el máximo incremento de dureza en el río Loa con valores de hasta 790 mg $CaCO_3$/L. La tendencia tras este máximo es ligeramente decreciente alcanzando un valor final en Chiu Chiu de aproximadamente 530 mg $CaCO_3$/L.

Índices de Saturación (SI)

La proporción de muestras con IS de la calcita superiores a cero indicando así saturación o sobresaturación con respecto a este mineral representa aproximadamente el 50% del total de muestras. Los índices más altos alcanzan magnitudes de aproximadamente de 1,5 y corresponden con dos vertientes situadas en los salares de Carcote y Ascotán, 15-LAV y 13-LAV respectivamente, y con las aguas superficiales del río San Pedro en su tramo bajo (48-LAS). El resto de muestras sobresaturadas en calcita presentan índices entre 0 y 1 y se distribuyen en todas las subcuencas exceptuando los salares de Alconcha y Ollagüe. Sin embargo, las vertientes muestreadas en estos salares se encuentran subsaturadas en este mineral. El valor más bajo de todos los IS calculados se ha obtenido en la muestra 23-LAV ubicada en el salar de Alconcha y su magnitud es de aproximadamente -3.

Las muestras de la subcuenca de San Pedro presentan una distribución de los IS de la calcita heterogénea. En su zona de cabecera, sólo dos del conjunto de vertientes muestreadas se encuentran sobresaturadas con respecto a este mineral (51-LAV y 54-LAV). Por otro lado, el agua superficial en el río San Pedro se encuentra ligeramente sobresaturada en la muestra situada aguas arriba más próxima a su nacimiento (55-LAS) con un IS de 0,10. Aguas más abajo se produce un incremento remarcable de este valor alcanzando un valor de 1,42 en la muestra 48-LAS.

En el salar de Carcote las muestras de agua sobresaturadas en calcita se encuentran en el borde sur del salar: 19-LAV y 15-LAV, esta última con el IS más alto de toda la zona de estudio (1,51). Las otras dos vertientes muestreadas en este salar, 16-LAV y 17-LAV, se encuentran subsaturadas con IS de -0,42 y -0.29 respectivamente.

En el salar de Ascotán la mayoría de muestras se encuentran sobresaturadas en calcita y estas corresponden a vertientes y pozos situados en la zona centro y norte del salar. Por lo contrario, las muestras subsaturadas en calcita provienen de los pozos del sector sur y de la vertiente 57-LAS situada fuera del salar.

La evolución general del IS de la calcita en el río Loa sigue una tendencia creciente desde su zona de cabecera, con valores de aproximadamente -0,72, hasta Chiu Chiu

donde se alcanzan valores de hasta aproximadamente 1 (**Figura 7-24**). Sin embargo, algunos puntos en el río Loa destacan por sus marcados descensos en el IS que corresponden con las muestras 46-LAS, 25-LAS y 28-LAS. Por lo que respecta a los aportes del río Loa, se han considerado tanto los aportes superficiales (tributarios) como las vertientes próximas al cauce del río. En la parte alta de la cuenca los aportes se encuentran subsaturados en calcita con la excepción de la muestra situada en Pampa Puno. Por otro lado, en la parte baja los IS de los aportes indican sobresaturación en calcita, especialmente el asociado a las aguas superficiales del río San Pedro (48-LAS) con un de los valores de IS de la calcita más elevados de toda la zona de estudio (1,42) aunque, a causa de las extracciones de agua en este río, superficialmente no se encuentra en conexión con el río Loa.

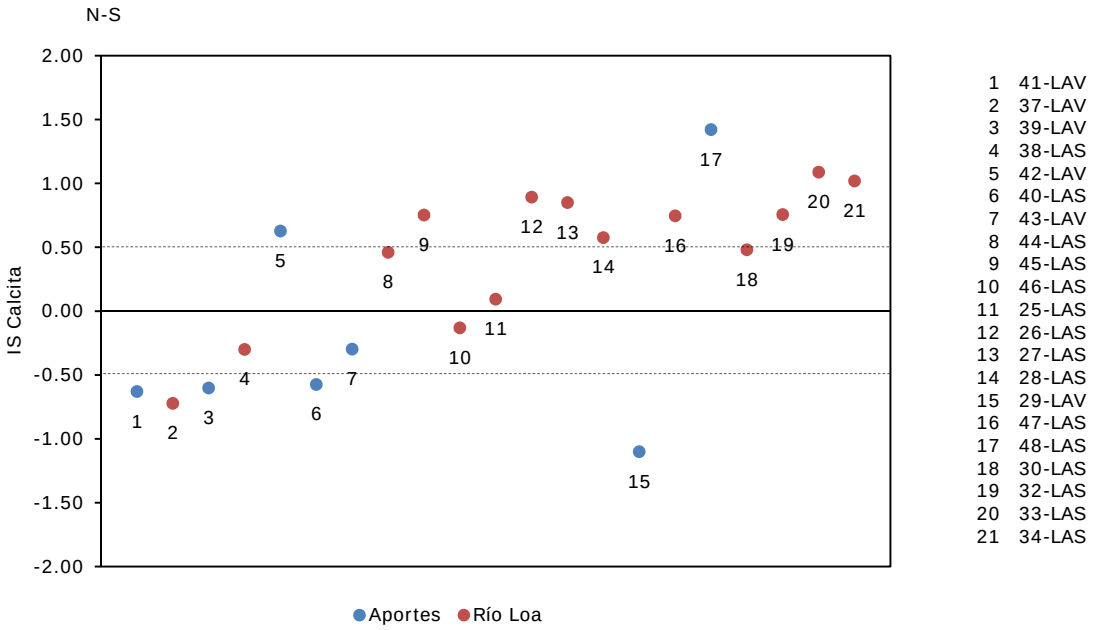


Figura 7-24. Variación del índice de saturación de la calcita (SI) en el río Loa y en sus aportes en forma de tributarios o vertientes próximas en octubre de 2013. Fuente: elaboración propia.

En relación con la anhidrita, tres de las cuatro muestras de Carcote han sido las que han presentado IS que indiquen sobresaturación con respecto a este mineral con valores superiores a 0. El resto de la zona de estudio presenta subsaturación en anhidrita. De mayor saturación a menos, después de las muestras de Carcote se sitúan las del salar de Ascotán.

El grado de saturación de la halita es de subsaturación para toda la zona de estudio. Su distribución sigue un patrón análogo al del IS de la anhidrita; los valores más

elevados situados en el salar de Carcote presentan un rango de entre -2,3 y -3,7 mientras que los más bajos, correspondientes a aguas de vertientes y aguas superficiales del resto de la zona de estudio alcanzan valores de hasta -9.

Relación de Absorción de Sodio (RAS)

El análisis de los valores RAS indican que las aguas del salar de Carcote implican peligro por alcalinización del suelo y, por este motivo, se consideran inadecuadas para su uso como aguas de riego (**Figura 7-25**). Este grado de peligro, aunque con una magnitud más baja, también lo presentan algunos pozos y vertientes del salar de Ascotán.

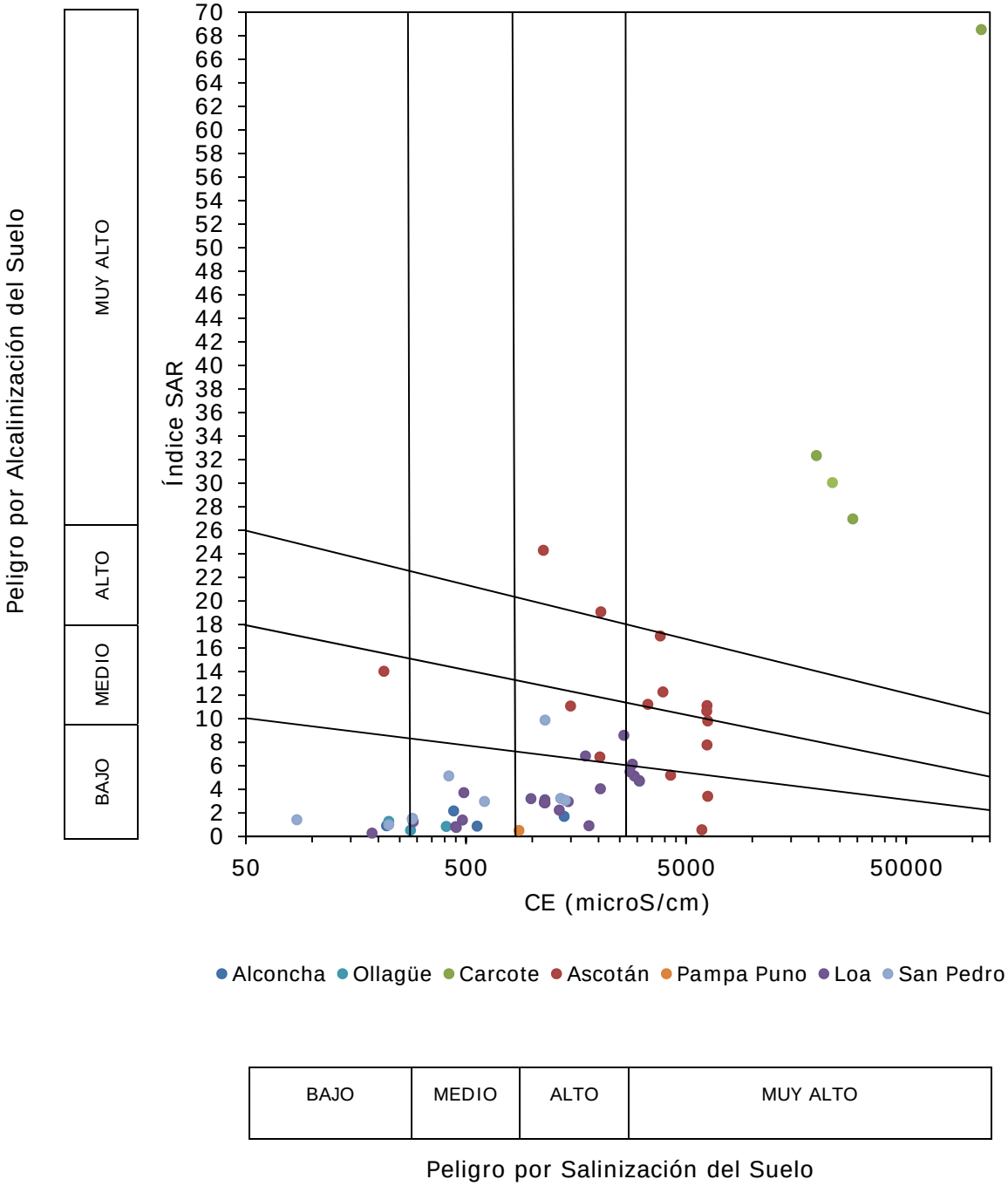


Figura 7-25. Clasificación de las aguas de riego en función de la Relación de Absorción de Sodio (RAS) y conductividad eléctrividad (CE) en las diferentes subcuencas a partir de los resultados químicos de octubre de 2013. Fuente: elaboración propia.

El resto de aguas de la zona de estudio conllevan un peligro de alcalinización del suelo de medio a bajo en relación a sus índices RAS.

Sin embargo, la calidad de un agua para su uso como agua de riego también está fuertemente condicionada por su conductividad eléctrica. En relación a este parámetro, cabe destacar los valores altos de conductividad eléctrica presentes en las aguas de los ríos Loa y San Pedro ya que son aguas con alta probabilidad de ser utilizadas como agua de riego. En el caso de las aguas del río Loa, todos los puntos de muestreo excepto uno (28-LAS) implican un peligro de salinización del suelo alto con conductividades eléctricas superiores a 750 μS/cm y, algunas de ellas, incluso peligro muy alto con valores de conductividad eléctrica superiores a los 2.250 μS/cm. Por otro lado, en el río San Pedro los valores más altos de conductividad eléctrica observados no sobrepasan el grado alto de nivel de peligro.

Las aguas de mejor calidad para su uso como aguas de riego en función del índice RAS y conductividad eléctrica son principalmente aguas de vertientes de las partes altas de las respectivas subcuencas. Por lo que respecta a aguas superficiales, sólo la muestra 40-LAS en vega Chela ha presentado un riesgo por acumulación de sodio y conductividad eléctrica bajo para sus uso como agua de riego.

Segunda campaña: Diciembre 2013

Alcalinidad

En la segunda campaña las subcuencas de los salares muestran una alcalinidad promedio de aproximadamente 140 mg $CaCO_3$/L. El salar de Carcote es el más alcalino de ellos con un valor de alcalinidad de aproximadamente 213 mg $CaCO_3$/L mientras que el salar de Alconcha es el menos alcalino con una alcalinidad promedio de 84 mg $CaCO_3$/L. El salar de Alconcha junto con el de Ollagüe son los que han mostrado mayor variación con respecto a la primera campaña; ambos salares han mostrado un aumento en la alcalinidad de aproximadamente el 50% y el 90% respectivamente. En el salar de Ascotán destaca la diferencia que existe entre las muestras provenientes de las vertientes en comparación con las aguas superficiales y subterráneas. La alcalinidad de las vertientes en el salar de Ascotán representa aproximadamente el doble de la alcalinidad promedio observada en aguas superficiales y subterráneas cuya magnitud es de aproximadamente 85 mg $CaCO_3$/L.

El resto de subcuencas presentan rangos de alcalinidad equivalentes a los de la primera campaña. La alcalinidad promedio de la subcuenca de Pampa Puno tiene un valor 298 mg $CaCO_3$/L que, con respecto a la primera campaña, ha sido reducido a causa de la baja alcalinidad obtenida en la nueva muestra 79-LAV2 con un valor de 182 mg $CaCO_3$/L.

En la subcuenca de San Pedro, mientras la alcalinidad de las vertientes es similar a las de la primera campaña con valores alrededor de 100 mg $CaCO_3$/L, en las aguas superficiales se detecta una reducción significativa de aproximadamente el 80% con un valor promedio de 57 mg $CaCO_3$/L.

La evolución de la alcalinidad en el río Loa sigue una tendencia general creciente desde sus partes altas (67 mg $CaCO_3$/L) hasta Chiu Chiu (314 mg $CaCO_3$/L). Sin embargo, existen dos zonas donde la alcalinidad sufre variaciones drásticas dentro de la tendencia general. En la primera de ellas, en la zona de las muestras 46-LAS2, 25-LAS2 y 26-LAS2 se produce un incremento significativo de aproximadamente 300 mg $CaCO_3$/L alcanzando valores de hasta 624 mg $CaCO_3$/L. Por otro lado, en las muestras consecutivas 27-LAS2 y 29-LAV2 situadas aguas más abajo se registra un descenso drástico en la alcalinidad que alcanza un valor promedio aproximado de 45 mg $CaCO_3$/L y representa el valor más bajo en todo el río Loa.

Dureza

La variación más significativa entre campañas se ha producido en los salares de Carcote y Ascotán. En el salar de Carcote se ha observado un descenso del 30% en el valor promedio de dureza. En el salar de Ascotán la dureza de las aguas subterráneas y superficiales han incrementado aproximadamente un 50% con respecto a la primera campaña mientras que la dureza de las vertientes se ha reducido en un 30%. Esto puede ser debido a el proceso de toma de muestras, transporte y preservación de las muestras y/o el proceso de análisis de estas en el laboratorio.

El resto de la zona de estudio presenta unos valores y distribución en la segunda campaña equivalentes a los de la primera campaña.

Índices de Saturación (IS)

En la campaña de diciembre, el 62% de los puntos muestreado presentan sobresaturación en calcita, con un IS>0 y un 30% claramente sobresaturadas con un IS>0,5. Por lo que respecta a las subcuencas de los salares, los de Alconcha y Ollagüe destacan por tener la mayoría de sus muestras subsaturadas en calcita y presentar una tendencia diferente a la de los salares de Ascotán y Carcote. En la subcuenca del salar de Ascotán existen tres muestras subsaturadas en calcita que corresponden a la muestra del pozo 11-LAP2, la vertiente del norte del salar 14-LAV2 y la vertiente 57-LAS2 de la zona este de la subcuenca. En Carcote, la única muestra subsaturada en calcita corresponde a la muestra 18-LAV2 situada al norte del salar.

En la subcuenca de Pampa Puno las dos muestras analizadas muestran sobresaturación en calcita observándose un incremento desde la muestra tomada aguas arriba en vega Sapunta con respecto a la tomada justo antes de la confluencia de la quebrada con el río Loa (79-LAV2) que muestra un IS de 0,92.

La evolución del IS de la calcita en río Loa obtenido de la campaña de diciembre presenta una evolución general similar al de la campaña de octubre mostrando un incremento desde su zona de cabecera hasta Chiu Chiu (**Figura 7-26**). Sin embargo, existen variaciones significativas en muestras concretas entre las dos campañas.

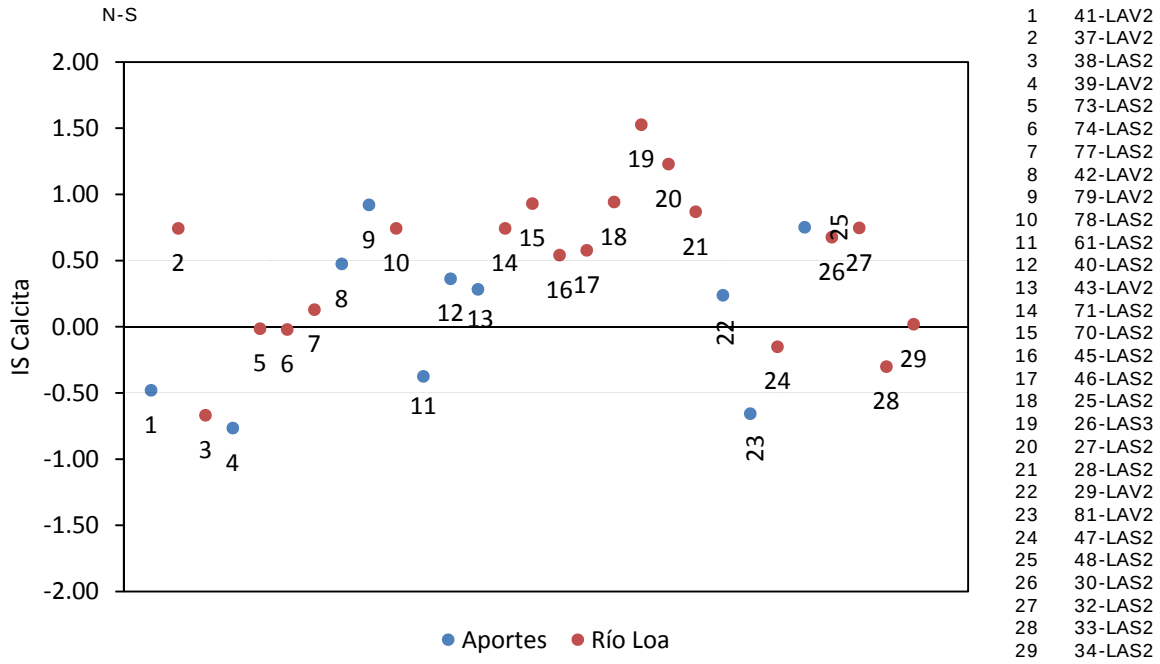


Figura 7-26. Variación del índice de saturación (SI) de la calcita en el río Loa y en sus aportes en forma de tributarios o vertientes próximas en diciembre de 2013. Fuente: elaboración propia.

En la zona alta, el río Loa se encuentra subsaturado en calcita hasta la muestra 73-LAS2 y de igual forma lo están las vertientes de esta zona. A partir de este punto, la mayoría de muestras provenientes del río así como los aportes se encuentran sobresaturados con respecto a este mineral y, en general, el IS no sobrepasa el valor de 1. Las muestras con los IS más elevados mayores a 1 son las 46-LAS2, 25-LAS2, 33-LAS2 y 34-LAS2; estas dos últimas se sitúan en la parte baja del río y sus valores son equivalentes a los obtenidos en la campaña de octubre. Los elevados IS de las

muestras 46-LAS2 y 25-LAS2 destacan ya que en la campaña anterior estas muestras presentaron IS relativamente más bajos cercanos al estado de saturación.

Por otro lado, existen dos tramos en el río Loa donde se producen marcados descensos en el IS que alcanzan mínimos locales de incluso subsaturación en las muestras 27-LAS2 y 30-LAS2. Un valor de IS bajo que también destaca es el que se observa en la muestra 81-LAV2 correspondiente a la vertiente de Baños Taira.

Con respecto al IS de la anhidrita en la zona de estudio, los rangos en la segunda campaña de diciembre son comparables a los calculados de la campaña de octubre. Los IS más bajos alcanzan valores de hasta aproximadamente -3,5 y mayoritariamente corresponden a vertientes de las subcuencas de San Pedro, el Loa, Ollagüe, Alconcha, Ascotán, Pampa Puno y una vertiente del salar de Carcote (18-LAV2). Los IS más elevados corresponden a la mayoría de muestras provenientes de las aguas superficiales del río Loa y a la mayoría de vertientes del salar de Carcote, aunque sólo una de ellas alcanza el estado de saturación.

Respecto al IS de la halita, la totalidad de las muestras de la zona de estudio se encuentran subsaturadas en relación a este mineral y su distribución es similar al del IS de la anhidrita. De igual modo que en la campaña anterior, las muestras con IS más elevados corresponden con las de los salares de Carcote y Ascotán y las aguas superficiales del río Loa. Los IS de la halita más elevados en el río Loa se encuentran principalmente en el tramo inferior del río a partir de la muestra 27-LAS2 incluyendo la muestra de la vertiente 81-LAS2. Sin embargo, en la zona de cabecera también existen dos muestras con IS de halita relativamente elevados asociados con las muestras 37-LAV2, 38-LAS2 y 73-LAS2.

Relación de Absorción de Sodio (RAS)

El análisis del índice RAS a partir de los resultados químicos de la campaña de diciembre muestran una magnitud y distribución equivalente a los de la campaña anterior de octubre (**Figura 7-27**).

Las vertientes del salar de Carcote excepto la 18-LAV2 corresponden de nuevo con las aguas de mayor riesgo para uso como aguas de peligro tanto por alcalinización como por salinización del suelo. Estas aguas, junto con las de la mayoría de vertientes y pozos del salar de Ascotán que también presentan un peligro de alto a muy alto, son clasificadas como no aptas para riego.

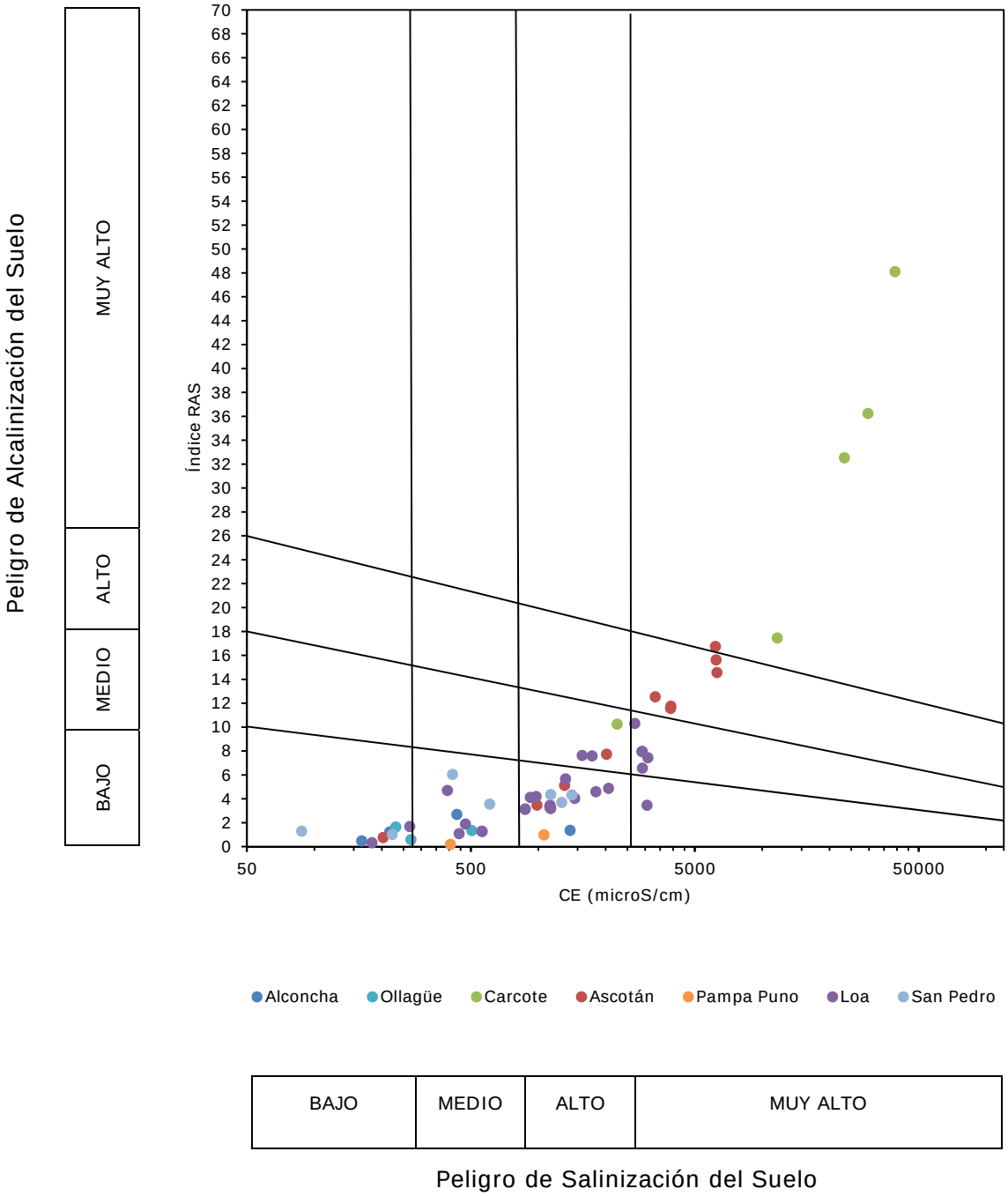


Figura 7-27. Clasificación de las aguas de riego en función de la Relación de Absorción de Sodio (RAS) y conductividad eléctrividad (CE) en las diferentes subcuencas a partir de los resultados químicos de diciembre de 2013. Fuente: elaboración propia.

Las aguas del río Loa, que son las principales destinadas a usos agrícolas, representan un peligro de alcalinización del suelo de grado medio en el tramo final de la zona de

estudio próximo a Chiu Chiu. Sin embargo, el peligro de salinización del suelo es muy alto con valores de conductividad eléctrica superiores a los 2.250 μS/cm.

El resto de muestras, que representan la mayoría de todas las muestras de la zona de estudio, conllevan un peligro de alcalinización bajo aunque, a causa de sus elevadas conductividades eléctricas, sólo el 30% del total de muestras conlleva además un peligro de salinización también bajo.

Estas muestras, las de mejor calidad para ser utilizadas como agua de riego, corresponden con todas las vertientes de la subcuenca de Alconcha excepto la muestra 23-LAV2, las vertientes de la subcuenca de Ollagüe, las vertientes de la parte alta de la subcuenca de San Pedro excepto la 53-LAV2, las aguas muestreadas en vega Chela y algunas muestras del tramo superior del río Loa (41-LAV2 y 72-LAP2) y una en el tramo central (29-LAV2).

7.4 ANÁLISIS ISOTÓPICO - $\delta^{18}O$, $\delta^{2}H$ y $\delta^{13}C$

En este Proyecto se utilizan análisis isotópicos para determinar el origen y aquellos procesos que afectan al agua dentro del ciclo hidrológico, desde su precipitación hasta su retorno al mar o evaporación. Los diferentes procesos que se pueden llegar a identificar van desde la altura de recarga, evaporación, mezcla de aguas, disolución y equilibrio con la roca a altas temperaturas entre otros.

Se analizan isótopos estables, los cuales no sufren ningún proceso de desintegración radioactiva. Los isótopos analizados son el ^{18}O, ^{2}H en la molécula del agua y el ^{13}C del carbono inorgánico disuelto en el agua, CID. El estudio de isótopos estables analiza el fraccionamiento que se produce entre isótopos ligeros y pesados, es decir la variación de su relación. La caracterización isotópica es una herramienta más de la hidrogeología complementaria a la hidroquímica y a las demás ciencias ligadas a la hidrogeología.

El $\delta^{18}O$ y el $\delta^{2}H$ se analizó en la primera campaña (Octubre 2013) y en la segunda campaña (Diciembre 2013), mientras que el $\delta^{13}C$ se analiza únicamente en la primera campaña de terreno. En total se tomaron 180 muestras para análisis isotópico, 120 muestras para $\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$ entre la primera (60) y segunda campaña (60), y 60 muestras para $\delta^{13}C$ en la primera campaña.

La baja concentración de los isótopos menos abundantes de un elemento en comparación con el isótopo más abundante de la materia, al igual que su poca variación en valores absolutos hace que la composción isotópica de un elemento se exprese como valores de desviación en unidades de por-milaje (‰). La desviación

isotópica se calcula comparando la relación isotópica de una muestra con la relación isotópica de un estándar (Ro) utilizado de forma mayoritaria. Como ejemplo, la relación isotópica de una muestra en oxígeno-18 (minoritario) respecto al oxígeno-16 (abundante) de una muestra se calcula de la siguiente manera:

$$R_{O^{18}/_{16}} = \frac{Número\ de\ átomos\ de\ masa\ atómica\ 18}{Número\ de\ átomos\ de\ masa\ atómica\ 16}$$

Los valores de relación isotópica son significativamente pequeños para trabajar cómodamente con ellos, por este motivo se usan las desviaciones isotópicas y se calcula de la siguiente manera (caso del oxígeno):

$$\delta^{18}(‰) = \left(\frac{R_{O^{18}/_{16}}\ muestra}{R_{O^{18}/_{16}}\ estándar} - 1\right) \cdot 1000$$

Para poder comparar los datos de desviaciones isotópicas entre diferentes muestras se utilizan estándares bien conocidos, como puede ser el agua de mar, un carbonato en concreto o otras materias dependiendo del isótopo a tratar. Para los isótopos ocupados en el presente estudio se han utilizado como estándares de referencia los usados de forma más habitual, para el $\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$ se ha utilizado el estándar Vienna Standard Mean Ocean Water (V-SMOW) y para el $\delta^{13}C$ se utiliza el Vienna-Pee De Belemnite (V-PDB).

7.4.1 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Se realiza un análisis estadístico del contenido isotópico de las aguas ($\delta^{13}C$, $\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$), con el objetivo de mostrar la variación isotópica entre los diferentes puntos de agua muestreados. De esta manera se presentan los valores máximos, mínimos, promedio y desviación estándar del conjunto de los puntos muestreados en la zona de estudio y de cada subcuenca por separado. Por tanto, con los valores máximos y mínimos se obtiene la amplitud del rango de variación, con el promedio el valor representativo del conjunto y con la desviación estándar se obtiene el grado de variabilidad del conjunto además de la representatividad del valor promedio.

En primer lugar se analizan los parámetros de la primera campaña y a continuación los de la segunda campaña de terreno.

Primera campaña de terreno: Octubre 2013.

En la **Tabla 7-25** se exponen los valores mínimos, máximos, promedio y desviación estándar del contenido de $\delta^{13}C$, $\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$ en las 60 muestras de aguas tomadas a lo

largo de la zona de estudio durante la primera campaña de terreno. En la **Tabla 7-26** se muestran los valores obtenidos para cada una de las 7 subcuencas presentes en la zona de estudio.

El valor mínimo de $\delta^{13}C$ es -15,5 ‰ corresponde a un pozo ubicado en la subcuenca de Ascotán (4-LAP). El valor máximo es de +4,06 ‰, la muestra más pesada isotópicamente corresponde a la muestra de aguas superficiales 32-LAS, localizada en la subcuenca del Loa. El promedio es de -4,20 ‰ y la desviación estándar es 5,1 ‰.

Los valores de $\delta^{18}O$ medidos varían entre -15,5 ‰ y -1,1 ‰. El valor más ligero corresponde al punto 22-LAV y el más pesado al 15-LAV, son vertientes, la primera ubicada en la subcuenca de Ollagüe y la segunda en la subcuenca de Carcote. El promedio de los valores de $\delta^{18}O$ es de -11,4 ‰. La desviación estándar es 2,5 ‰.

El $\delta^{2}H$ tiene un valor mínimo de -116 ‰ y corresponde con el punto de vertiente 22-LAV ubicado en la subcuenca de Ollagüe. El máximo es de -38 ‰ y se corresponde con la muestra 15-LAV, localizada en la subcuenca de Carcote. Los mismos puntos que para el $\delta^{18}O$. El valor promedio corresponde a -87 ‰ y la desviación estándar a 15 ‰.

CONJUNTO DE LA PRIMERA CAMPAÑA – Nº Muestras =60

Valor	$\delta^{13}C$	$\delta^{18}O$	$\delta^{2}H$
Mínimo	-15,5	-15,6	-116,0
Máximo	4,1	-1,1	-38,3
Promedio	-4,2	-11,4	-86,8
Desv. Estándar	5,1	2,5	14,7

Tabla 7-25. Valores estadísticos del contenido isotópico (^{13}C, ^{18}O y ^{2}H) de las aguas de la zona de estudio durante la primera campaña de terreno, octubre 2013. Fuente: elaboración propia.

SUBCUENCA ALCONCHA - Nº Muestras=5

Valor	$\delta^{13}C$	$\delta^{18}O$	$\delta^{2}H$
Mínimo	-8,8	-15,0	-109
Máximo	-3,9	-10,7	-92
Promedio	-6,6	-13,9	-105
Desv. Estándar	2,0	1,8	7

SUBCUENCA OLLAGÜE - Nº Muestras=3

Valor	$\delta^{13}C$	$\delta^{18}O$	$\delta^{2}H$
Mínimo	-15,0	-15,6	-116
Máximo	-6,9	-14,6	-107
Promedio	-8,1	-11,3	-84
Desv. Estándar	4,1	0,5	5

SUBCUENCA CARCOTE - Nº Muestras=5

Valor	$\delta^{13}C$	$\delta^{18}O$	$\delta^{2}H$
Mínimo	-6,4	-14,0	-105
Máximo	2,5	-1,1	-38
Promedio	-3,8	-10,7	-87
Desv. Estándar	3,7	5,4	28

SUBCUENCA ASCOTÁN - Nº Muestras=15

Valor	$\delta^{13}C$	$\delta^{18}O$	$\delta^{2}H$
Mínimo	-15,5	-13,2	-98
Máximo	-1,0	-10,9	-81
Promedio	-4,1	-12,2	-92
Desv. Estándar	4,4	0,7	6

SUBCUENCA PAMPA PUNO - Nº Muestras=1

Nombre	$\delta^{13}C$	$\delta^{18}O$	$\delta^{2}H$
42-LAV	-12,5	-5,8	-61

SUBCUENCA SAN PEDRO - Nº Muestras=9

Valor	$\delta^{13}C$	$\delta^{18}O$	$\delta^{2}H$
Mínimo	-10,9	-11,8	-92
Máximo	2,9	-9,3	-74
Promedio	-3,7	-10,8	-82
Desv. Estándar	4,8	0,9	5

SUBCUENCA LOA - Nº Muestras=22

Valor	$\delta^{13}C$	$\delta^{18}O$	$\delta^{2}H$
Mínimo	-14,3	-12,9	-97
Máximo	4,1	-4,1	-59
Promedio	-2,6	-10,4	-78
Desv. Estándar	5,8	2,0	10

Tabla 7-26. Valores estadísticos por subcuencas del contenido isotópico de las aguas muestreadas durante la primera campaña de terreno (octubre 2013). Fuente: elaboración propia.

Segunda campaña de terreno. Diciembre 2013.

En la **Tabla 7-27** se muestran los valores mínimos, máximos, promedio y desviación estándar del contenido de $\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$ en las 60 muestras de aguas tomadas a lo largo de la zona de estudio durante la segunda campaña de terreno. En la **Tabla 7-28** se muestran los valores obtenidos para cada una de las 7 subcuencas presentes en la zona de estudio.

El $\underline{\delta^{18}O}$ presenta un valor mínimo de -15,6 ‰ correspondiente a la muestra 22-LAV2 ubicada en la subcuenca de Ollagüe. El valor máximo es de 2,9 ‰ y pertenece a la muestra de aguas superficiales 79-LAS2, localizada en la subcuenca de Ascotán. El ^{18}O tiene como promedio -11,2 ‰ y la desviación estándar es de 3,4 ‰ .

El $\underline{\delta^{2}H}$ tiene un valor mínimo de -116,3 ‰ y corresponde con el punto de vertiente 22-LAV2 ubicado en la subcuenca de Ollagüe. El máximo es de -7,4 ‰ com la muestra 79-LAS2, localizada en una vertiente de la subcuenca de Ascotán. Los máximos y mínimos son los mismos puntos que para el $\delta^{18}O$. El valor promedio corresponde a -85,8 ‰ y la desviación estándar a 18,7 ‰ .

Valor	$\delta^{18}O$	$\delta^{2}H$
Mínimo	-15,6	-116,3
Máximo	2,9	-7,4
Promedio	-11,2	-85,8
Desv. Estándar	3,4	18,7

Tabla 7-27. Valores estadísticos del contenido isotópico (^{18}O y ^{2}H) de las aguas de la zona de estudio durante la segunda campaña de terreno (diciembre, 2013). Fuente: elaboración propia.

SUBCUENCA ALCONCHA - Nº Muestras=5

Valor	$\delta^{18}O$	$\delta^{2}H$
Mínimo	-14,96	-110,04
Máximo	-14,35	-107,40
Promedio	-14,72	-108,37
Desv. Estándar	0,25	1,16

SUBCUENCA OLLAGÜE - Nº Muestras=3

Valor	$\delta^{18}O$	$\delta^{2}H$
Mínimo	-15,62	-116,34
Máximo	-13,78	-105,53
Promedio	-14,53	-109,31
Desv. Estándar	0,97	6,10

SUBCUENCA CARCOTE - Nº Muestras=5

Nombre	$\delta^{18}O$	$\delta^{2}H$
Mínimo	-14,37	-107,53
Máximo	-11,38	-90,59
Promedio	-13,23	-101,13
Desv. Estándar	-1,26	6,72

SUBCUENCA ASCOTÁN - Nº Muestras=10

Nombre	$\delta^{18}O$	$\delta^{2}H$
Mínimo	-12,70	-97,41
Máximo	-10,57	-79,74
Promedio	-11,89	-91,17
Desv. Estándar	0,70	6,34

SUBCUENCA PAMPA PUNO - Nº Muestras=2

Nombre	$\delta^{18}O$	$\delta^{2}H$
Mínimo	-3,36	-46,48
Máximo	2,91	-7,40
Promedio	-0,23	-26,94
Desv. Estándar	4,43	27,64

SUBCUENCA SAN PEDRO - Nº Muestras=8

Valor	$\delta^{18}O$	$\delta^{2}H$
Mínimo	-12,03	-91,55
Máximo	-10,20	-77,72
Promedio	-11,11	-82,19
Desv. Estándar	0,69	4,74

SUBCUENCA LOA - Nº Muestras=28

Valor	$\delta^{18}O$	$\delta^{2}H$
Mínimo	-13,28	-97,60
Máximo	0,04	-44,59
Promedio	-10,37	-79,67
Desv. Estándar	3,17	14,18

Tabla 7-28. Valores estadísticos por subcuencas del contenido isotópico ($\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$) de las aguas muestreadas durante la segunda campaña de terreno (diciembre, 2013). Fuente: elaboración propia.

7.5 ANÁLISIS GRÁFICOS

A continuación se van a presentar un conjunto de técnicas de procesamiento de datos que facilitan su visualización e interpretación, cuyo fin es mostrar de la manera más directa y clara posible los datos obtenidos en análisis hidroquímicos de las aguas recogidas en el área de estudio con el objetivo de ver las relaciones entre ellos, evoluciones, semejanzas y diferencias, correlaciones que ayuden a entender el modelo conceptual hidroquímico de la zona de estudio. Se han realizado tres tipos de diagramas: diagramas Schoeller –Berkaloff, diagramas de correlación y diagramas de Stiff (estos últimos se presentan en el Anexo G, en un mapa en el que se presenta la composición hidroquímica de las muestras tomadas en toda el área de estudio.

Para ver la concentración hidroquímica de los elementos mayoritario se utilizan los diagramas semilogarítmicos de Schoeller -Berkaloff. Estos utilizan en el eje vertical una escala logarítmica para representar concentraciones en meq/L de los diferentes iones. En el eje horizontal se sitúan las diferentes especies químicas a representar. Para el caso de las concentraciones de sílice (SiO_2), ésta debe utilizar unidades de mmol/L, ya que, al ser eléctricamente neutra, no puede ser expresada en meq/L. El objetivo de estos gráficos es representar en un solo gráfico y de forma linear las composiciones químicas de diversas muestras de agua.

Para ver la correlación de dos elementos y/o iones entre ellos se utilizan los diagramas de dispersión, variaciones conjuntas además de la formación de grupos de muestras representativas de zonas geográficas o distintos ambientes, entre otros.

Otra representación gráfica de la composición química de las aguas son los diagramas Stiff Modificados, que se utilizaron en el mapa de Diagramas de Stiff adjuntos en los anexos. Estos diagramas consisten en varias escalas horizontales graduadas para mostrar las concentraciones de cationes y aniones respectivamente. La concentración se expresa en miliequivalentes por litro (meq/L). Para cada muestra de agua, se sitúan los puntos de las concentraciones de cationes y aniones por parejas. Posteriormente, se unen todos los puntos creando así un polígono cuyo número de vértices es igual al número total de iones representados. El resultado de los diagramas Stiff son polígonos donde, cada uno de ellos, hace referencia al análisis químico de una muestra de agua determinada

7.5.1 DIAGRAMAS DE SCHOELLER

Se realiza un análisis gráfico de las composiciones iónicas en elementos mayoritarios para caracterizar las diferentes marcas hidroquímicas dentro del área de estudio, ver diferencias y similitudes entre las subcuenas y dentro de cada una de ellas. En los cursos superficiales como el río Loa y en las líneas de flujo se analiza la evolución hidroquímica del agua y así se discute la interacción agua-roca y/o agua-atmósfera. Los diagramas utilizados son del tipo Schöeller, ya que facilitan la visualización gráfica de la composición hidroquímica y a la vez el grado de concentración de los solutos en el agua.

Para realizar la caracterización gráfica se presentará como mínimo un diagrama de Schöeller para cada una de las 7 subcuencas, con la excepción de las subcuencas de Pampa Puno y el río Loa. La caracterización del río Loa de divide en 3 diagramas distintos para apreciar claramente la composición de cada muestra. Las muestras de Pampa Puno se incluyen dentro de los diagramas de la cuenca del Loa y de esta forma quedar en contexto con las de su entorno.

Para el análisis de la distribución de las distintas marcas de agua, y de acuerdo a la poca variación en concentración mostrada por los parámetros fisicoquímicos entre las dos campañas, se utilizarán los datos de la primera campaña (Octubre de 2013) y una selección de puntos adicionales de la segunda campaña de terreno (Diciembre de 2013).

Por último, se comparan las composiciones hidroquímicas observadas a partir de las muestras tomadas en las campañas de terreno del 2013, y los obtenidas de la recopilación de antecedentes. El mapa de la zona de estudio donde están representados los diagramas de Stiff para la campaña de terreno de octubre y diciembre de 2013, está en el **Anexo G**. En relación con los diagramas Stiff de los antecedentes, estós se encuentran en el capítulo 7.1 del presente informe.

Subcuenca de Alconcha

En la **Figura 7-28** se presenta el diagrama de Schöeller de las muestras 23-LAV, 24-LAV, 35-LAV, 36-LAV y 75-LAV2. Observando los gráficos de cada muestra se puede observar que hay 4 marcas de agua distintas. En tres de ellas el anión con mayor presencia relativa es el SO_4^{2-} (muestras 23-LAV, 24-LAV, 35-LAV, 36-LAV) y una en que el anión mayoritario es el HCO_3^-. La mayor diferencia entre las muestras está en la concentración de cationes, en la muestra 23-LAV predomina el Ca^{+2} y Mg^{2+}, en la muestra 24-LAV predomina el Cl^- y Na^-, en la muestra 35-LAV y 36-LAV predomina el

Na^{+} y Ca^{+2} y en la muestra 75-LAV2 predomina el Ca^{+2}. De esta forma observamos 4 marcas hidroquímicas distintas. Las muestras 23-LAV y 24-LAV tienen una composición muy distinta a pesar de encontrarse a sólo decenas de metros de distancia, indicando líneas de flujo distintas. Las muestras 35-LAV y 36-LAV tienen una marca hidroquímica similar, pudiendo indicar que las dos pertenecen a una misma línea de flujo ya una se encuentra en la parte alta de la cuenca del salar (35-LAV) y la muestra 36-LAV en el límite del núcleo del salar.

En el salar de Alconcha hay dos muestras coincidentes entre la campaña de terreno realizada para el presente estudio, y la información recopilada en antecedentes. Estas muestras son la 75-LAV y la 35/60-LAV, que coinciden con la muestra ALC-V3 y ALC-V4 respectivamente. Ambas muestras (antecedentes y octubre 2013), están representadas en un diagrama Stiff con una escala de 10 meq/l, por lo que la comparación no necesita de cambios de escala. La muestra ALC-V3 tiene una composición bicarbonatada cálcica, al igual que la muestra 75-LAV2. La muestra ALC-V4 se caracteriza por presentar una composición sulfatada sódica cálcica y la 35/60-LAV tiene la misma marca química.

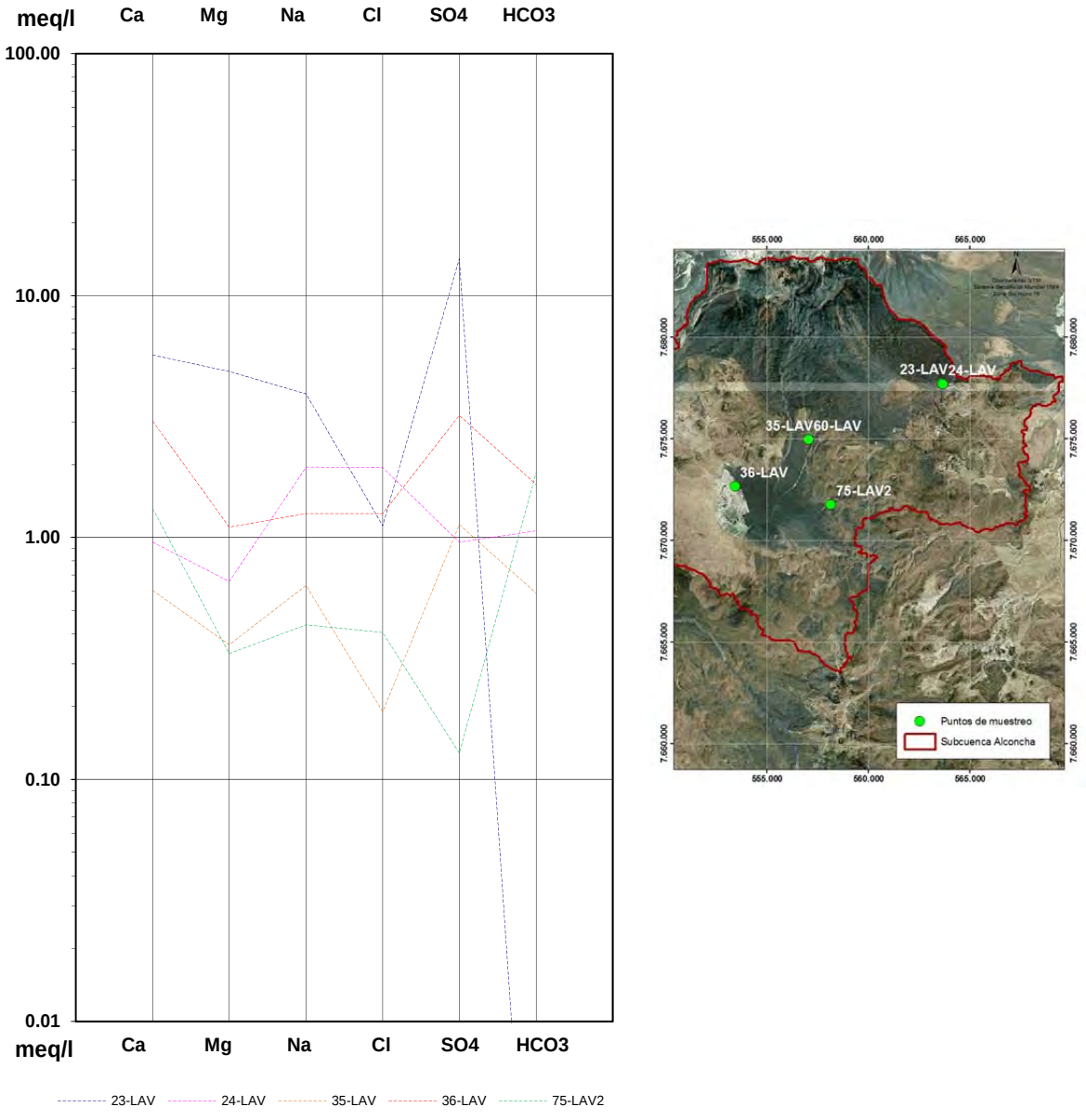


Figura 7-28. Diagrama Schoeller-Berkaloff de la subcuenca del salar de Alconcha. Fuente: elaboración propia.

Subcuenca de Ollagüe

En la **Figura 7-29** se representan las muestras tomadas en la subcuenca de Ollagüe. Las tres muestras (20-LAV, 21-LAV y 22-LAV) se tomaron al oeste y noroeste del salar de Ollagüe. Las tres muestras presentan el SO_4^{-2} como anión predominante. En referencia a la concentración relativa de cationes las muestras 21-LAV y 22-LAV tienen como catión predominante al Ca^{+2}, mientras que 20-LAV tiene una concentración predominante de Na^{+} y Ca^{+2}.

En el salar de Ollagüe, no se puede realizar la comparación entre la marca química registrada en la actual campaña de terreno y la de estudios anteriores, porque no se disponde de información hidroquímica en los antecedentes revisados.

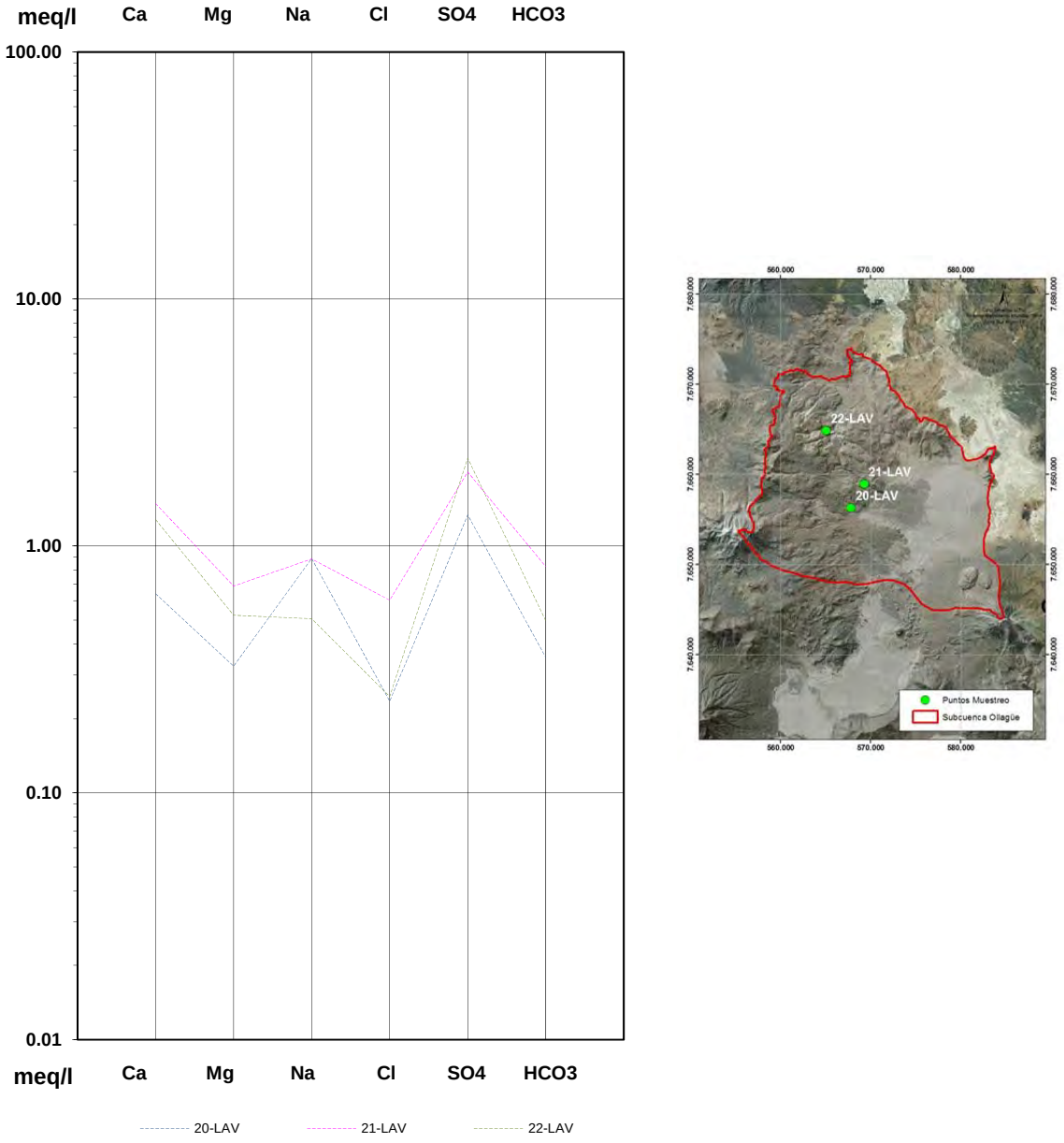


Figura 7-29 Diagrama Schoeller-Berkaloff de la subcuenca del salar de Ollagüe. Fuente: elaboración propia.

Subcuenca de Carcote

En la **Figura 7-30** se representan las 6 muestras tomadas alrededor del límite del salar de Carcote. Todas las muestras presentan una misma marca química predomínate: Na-Cl. Por su posición en la escala logarítmica de concentraciones se pueden observar 3 grupos. La muestra menos salina (18-LAV2), las tres muestras con concentración intermedia (16-LAV, 17-LAV, 19-LAV y 76-LAV2) y la muestra 15-LAV con una concentración elevada. La única diferencia entre las concentraciones relativas es la relación SO_4^{-2}/HCO_3^-, en las muestras 18-LAV2 y 76-LAV2 presentan la relación $SO_4^{-2}/ HCO_3^- < 1$ al contrario del resto.

En el Salar de Carcote, hay tres muestras que están presentes tanto en los antecedentes como en las campañas de terreno realizadas para el presente estudio. La muestra 76-LAV corresponde con la CAR-VD24, la 15-LAV con la CAR-V12, y la 80-LAV con la CAR-L3. Los diagramas Stiff están representados con diferente escala, siendo la de antecedentes de 5 meq/l y la de la actual campaña de 200-2000 meq/l; no obstante la marca química de las muestras es la misma, todas presentan un componente muy marcada de composición clorurada sódica.

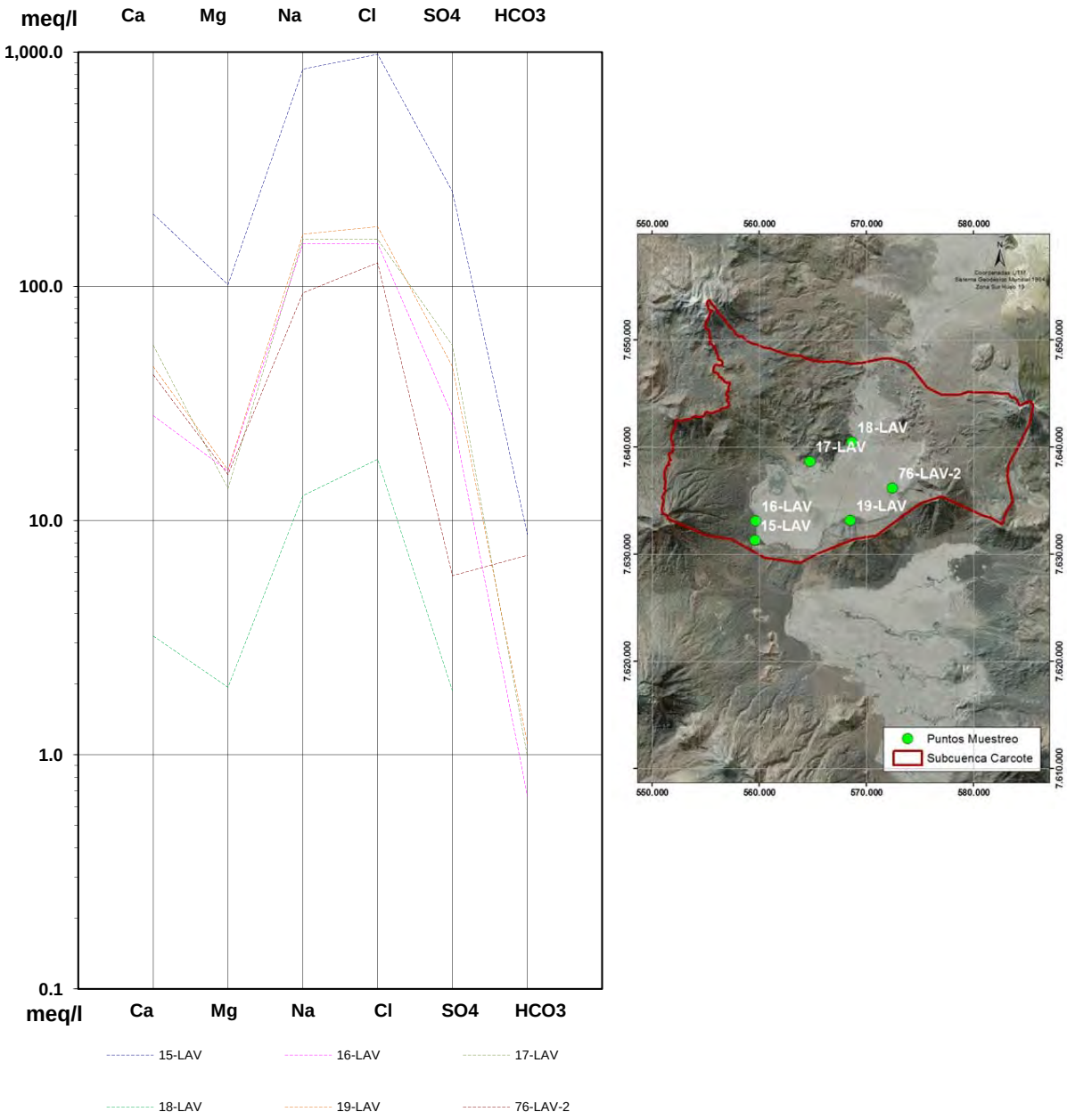


Figura 7-30. Diagrama Schoeller-Berkaloff de la subcuenca del salar de Carcote. Fuente: elaboración propia.

Subcuenca de Ascotán

En la **Figura 7-31** se presenta el diagrama de Schoeller de 10 muestras tomadas en la subcuenca de Ascotán. Como se puede apreciar se denota una marca hidroquímica predominante, la clorurada-sódica, exceptuando la muestra 57-LAS tomada en una quebrada en la parte alta de la cuenca que tiene una composición sulfatada-cálcica además de una concentración en sales disueltas significativamente menor. En el resto de las muestras se observa una tendencia distinta entre las muestras situadas al este y oeste del salar. En las muestras situadas al este del salar la relación SO_4^{-2}/ HCO_3^- tienen ordenes de magnitud inferior a las muestras situadas al oeste de la cuenca.

En la subcuenca del salar de Ascotán hay 7 muestras que se equiparan entre la información recopilada en los antecedentes y la que procede de la campaña de terreno del 2013. Las muestras que coinciden presentan una tendencia química muy similar, siendo todas las muestras tomadas en el entorno del salar de una fuerte composición clorurada sódica. La muestra 57-LAS, que corresponde con la ASV-4, ambas presentan una marca química sulfatada calcico-sódica.

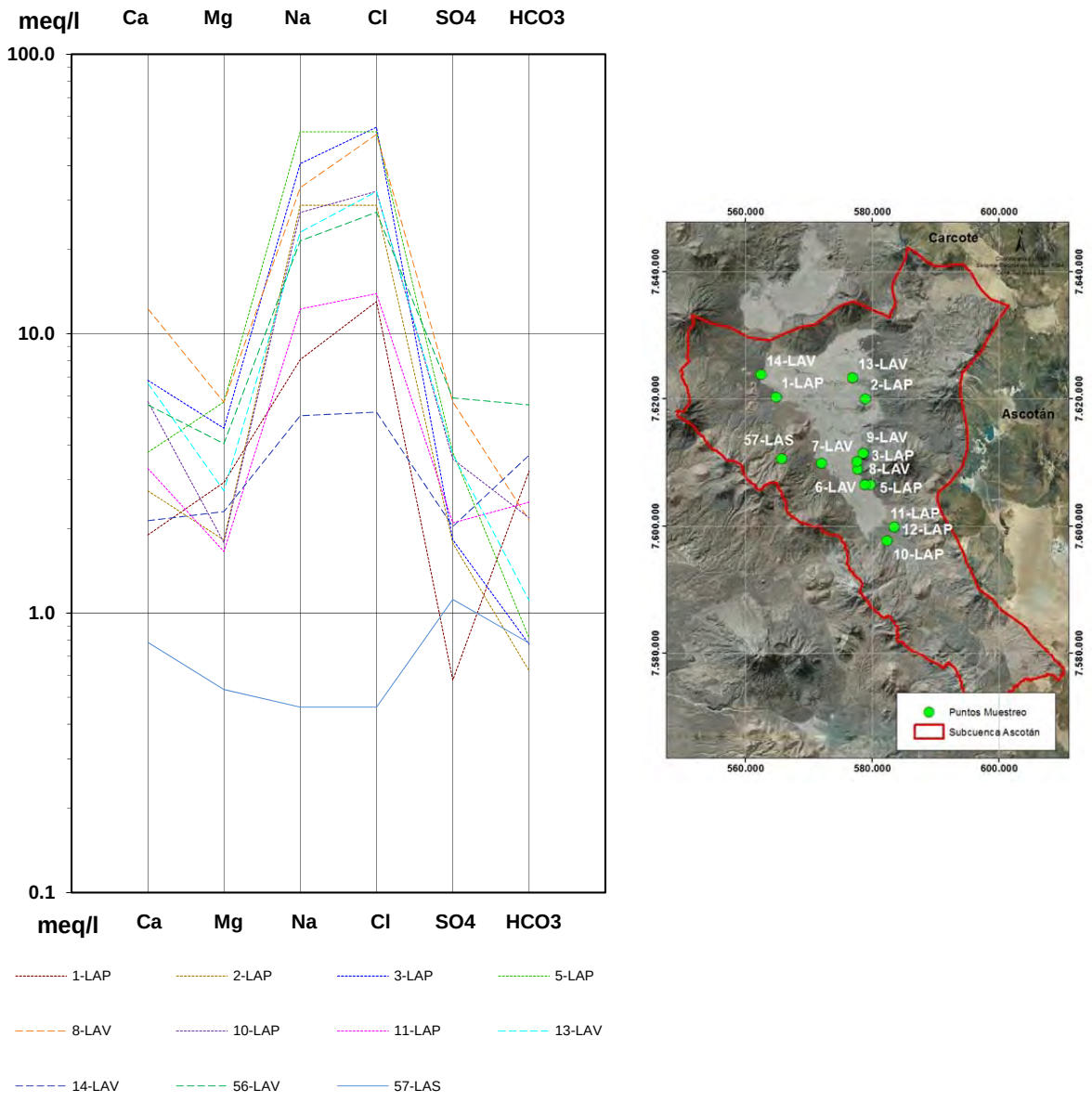


Figura 7-31. Diagrama Schoeller-Berkaloff de la subcuenca del salar de Ascotán. Fuente: elaboración propia.

Subcuenca de San Pedro

En la **Figura 7-32** se presentan 7 muestras tomadas en la subcuenca del río San Pedro. Las muestras 48-LAS y 55-LAS fueron tomadas en el río San Pedro mientras que el resto son manantiales en la parte alta de la cuenca. La característica común de todas las muestras es el alto contenido relativo en bicarbonatos, exceptuando la muestra 53-LAV. Las muestras superficiales (río San Pedro) tienen una composición clorurada-bicarbonatada sódica. Suponiendo que las muestras del río representan las aguas de las vertientes después del recorrido por el acuífero detrítico se puede afirmar que en el tránsito por este medio la interacción agua roca incorpora sodio y cloruro en sus sólidos disueltos principalmente.

En la subcuenca de San Pedro, la muestra 55-LAS coincide con la muestra San Pedro-Aforo de la información recopilada en antecedentes. La composición de la primera muestra es clorurada sódica, mientras que en la de San Pedro-Aforo es bicarbonatada-clorurada sódica.

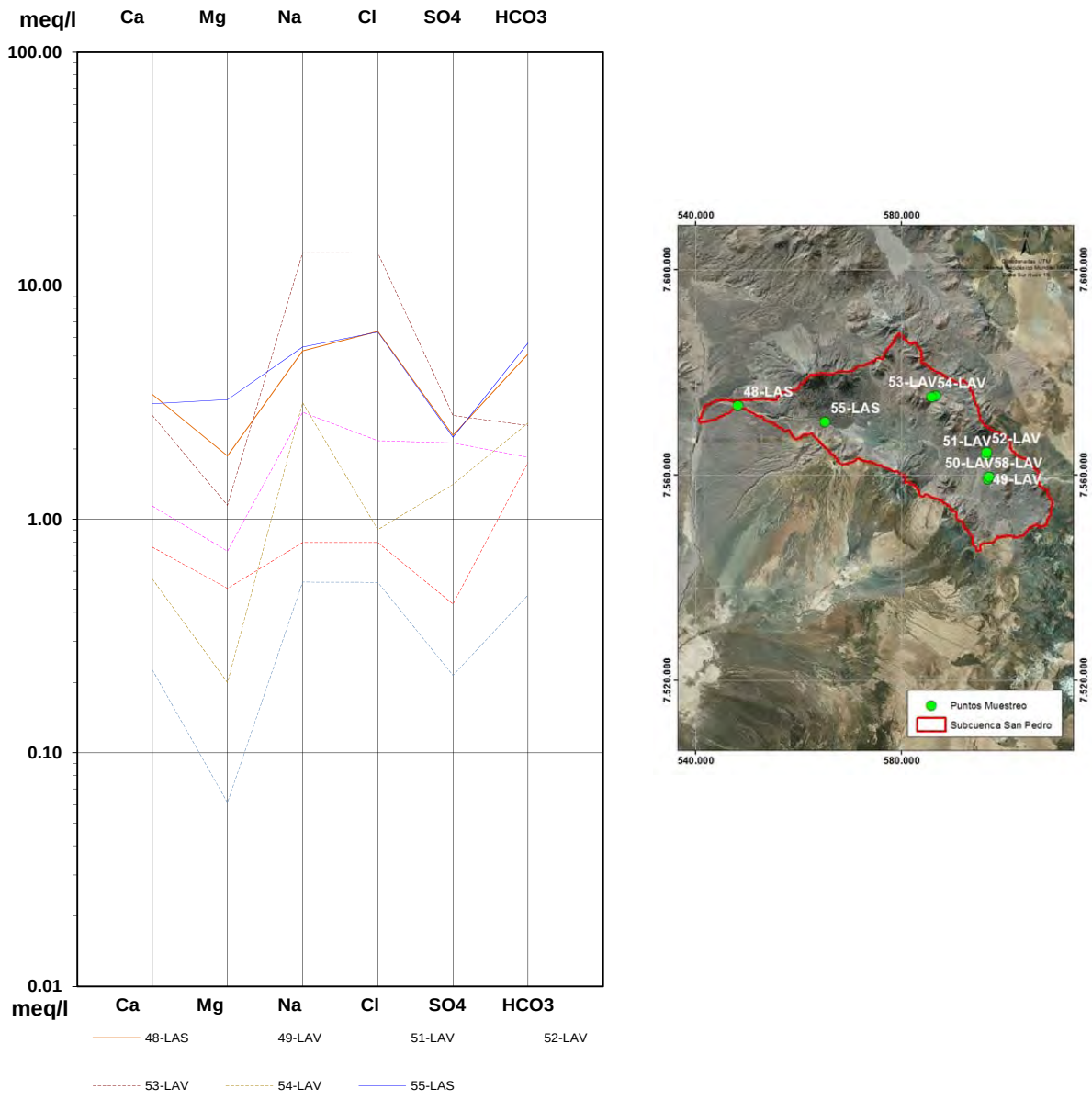


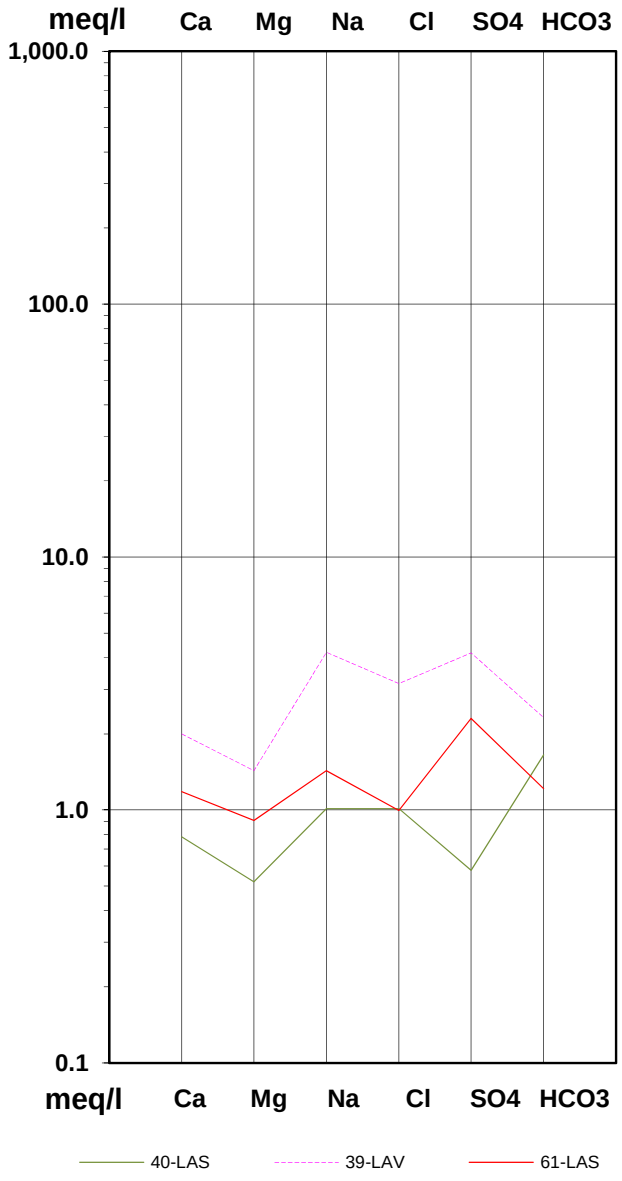
Figura 7-32 Diagrama Schoeller-Berkaloff de la subcuenca de San Pedro. Fuente: elaboración propia.

Subcuenca del río Loa entre el nacimiento y la represa Lequena

En la **Figura 7-33** se presenta el diagrama de Schoeller con las muestras tomadas en el este del curso del río Loa, se representan las muestras 39-LAV, 40-LAS y 61-LAS. La primera muestra corresponde a la quebrada Paco Paco y las dos restantes a dos cursos superficiales provenientes de dos manantiales que al unirse forman el río Chela. En este grupo se pueden diferencia dos marcas hidroquímicas distintas. Las muestras 39-LAV y 61-LAS son del tipo sulfatada-clorurada sódicas, mientras que la muestra 40-LAS es bicarbonatada sódica. Las muestras 61-LAS y 40-LAS tienen un origen distinto a pesar de que su salida a la superficie es próxima.

SCHOELLER-BERKALOFF DIAGRAM

Vertientes Este río Loa (Diciembre 2013)



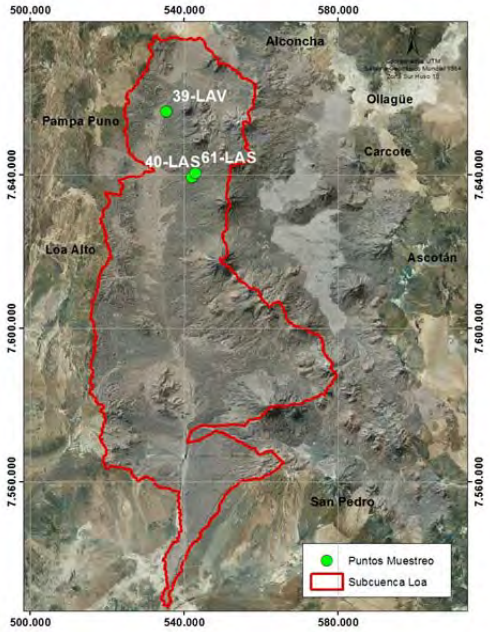


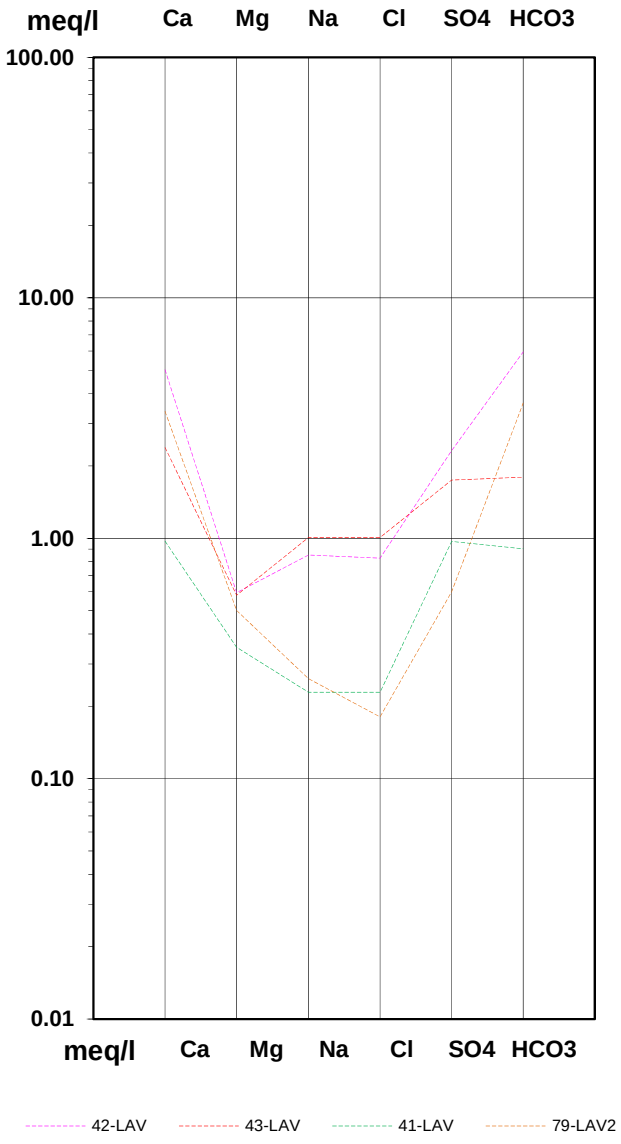
Figura 7-33. Diagrama Schoeller-Berkaloff de las vertienes del este de la subcuenca del Loa. Fuente: elaboración propia.

En la **Figura 7-34** se presentan el diagrama de Schoeller de las muestra tomadas de 4 vertientes en la parte oeste desde el nacimiento del río Loa hasta la represa Lequena. Las muestras 42-LAV y 79-LAV2 pertenecen a la subcuenca de Pampa Puno, mientras que las otras dos pertenecen a la subcuenca del río Loa. Entre ellas se diferencian por tener una marca hidroquímica distinta entre las dos subcuencas. Las muestras 41-LAV y 43-LAV tienen una composición Sulfatada-bicarbonatada cálcica, mientras que las muestras de Pampa Puno tienen una composición bicarbonatada cálcica.

En la subcuenca de Pampa Puno los puntos donde se han tomado muestras en la presente campaña de terreno no coinciden con los disponibles en la información recopilada en los antecedentes bibliográficos.

SCHOELLER-BERKALOFF DIAGRAM

Vertientes Oeste río Loa (Octubre-Diciembre (2013))



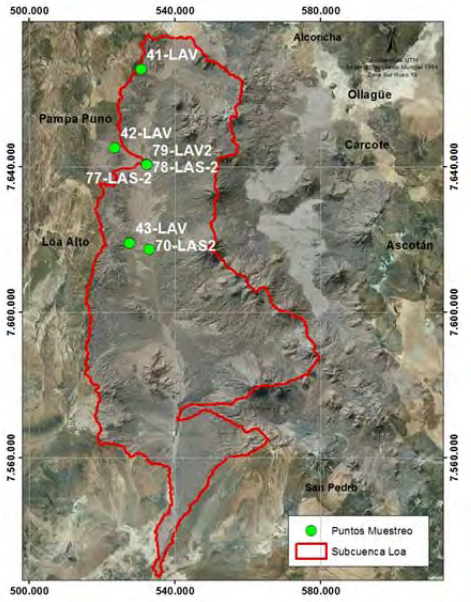
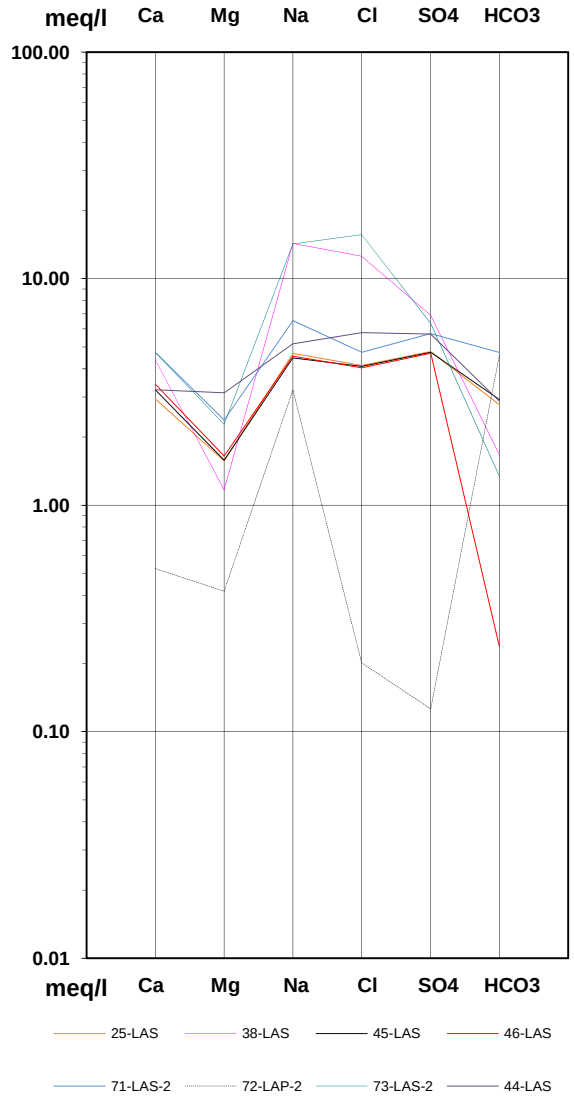


Figura 7-34 Diagrama Schoeller-Berkaloff de las vertientes del sector oeste de la subcuenca del Loa. Fuente: elaboración propia.

En la **Figura 7-35** se representa el diagrama de Schoeller de las muestras de agua superficial del río Loa desde su nacimiento hasta la represa Lequena, un total de 9 muestras de agua superficial y una muestra de agua muestreada en un pozo (72-LAP2). El río Loa en su nacimiento muestra las aguas con más sólidos disueltos en este tramo y con una marca hidroquímica clorurada sódica (muestras 37-LAS y 38-LAS). Las dos siguientes muestras aguas abajo tienen una composición bicarbonatada sódica y más diluidas representadas por las muestras 77-LAS2 y 78-LAS2. Este cambio representa la entrada de agua bicarbonatada sódica en el sector de la en el río Loa, correspondiente a la zona de intersección de la quebrada Sapunta de la cuenca de Pampa Puno. Las siguientes muestras aguas abajo son el conjunto de muestras 71-LAS2, 44-LAS, 45-LAS, 46-LAS y 25-LAS siguiendo un orden de norte a sur teniendo una marca hidroquímica sulfatada-clorurada sódica. Representando la entrada de agua del tipo sulfatada-clorurada sódica. La muestra 72-LAP2 tiene una composición bicarbonatada sódica, distinguiéndose de la naciente del Loa (37-LAS). El pozo muestreado tiene poca columna de agua y aparenta no estar explotado durante mucho tiempo, lo cual podría ser agua no representativa del acuífero.

SCHOELLER-BERKALOFF DIAGRAM

Nacimiento Loa-Represa Lequena (Octubre-Diciembre (2013)



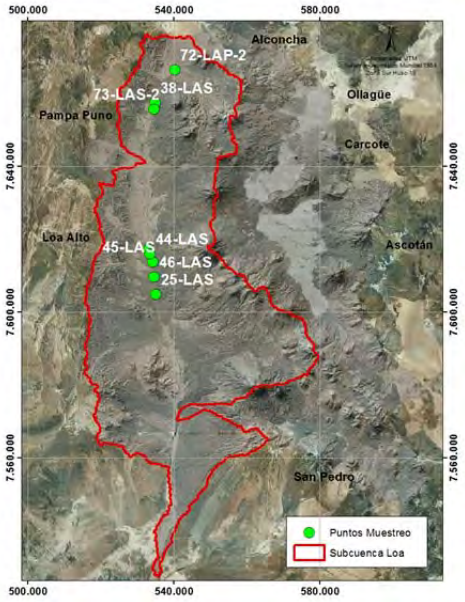


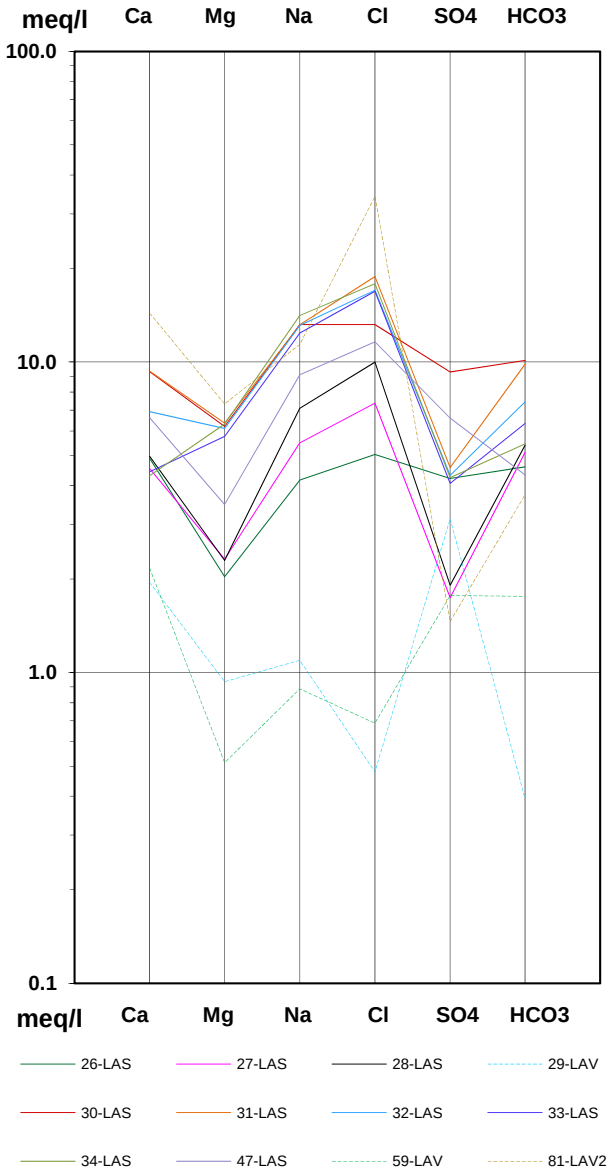
Figura 7-35 Diagrama Schoeller-Berkaloff del tramo del río Loa desde su nacimiento hasta la represa Lequena. Fuente: elaboración propia.

En la **Figura 7-36** se representan las muestras de la cuenca del río Loa a partir de la represa Lequena (muestra 26-LAS) hasta su paso por Chiu Chiu (muestra 34-LAS). En total se representan 10 muestras, 8 tomadas en el curso superficial del río Loa y 2 vertientes (29-LAV y 81-LAV2) que afloran en la superficie en el lateral del cauce del río Loa. Las muestras representadas son a partir de la muestra Lequena, esta aclaración es necesaria porque en este punto se extraen 550 l/s de su cauce dejando aproximadamente 20 l/s de su caudal. Entre las muestras 81-LAV2 y 47-LAS hay otra extracción de agua superficial del río Loa donde se captan 300 l/s, dejando un caudal de 130 l/s aproximadamente.

En la **Figura 7-36** se puede observar que la muestra 26-LAS tiene la marca hidroquímica de la parte superior del río, sulfatada-clorurada sódica con un aumento de los bicarbonatos respecto a la muestra anterior (25-LAS). A partir de este punto (en orden de norte a sur las muestras se disponen en el curso del río Loa 27-LAS, 28-LAS, 47-LAS, 30-LAS y 31-LAS antes de la entrada del río al embalse Conchi), la composición hidroquímica del agua va aumentando su contenido en cloruro y en sodio, conservando sus relaciones relativas entre los iones mayoritarios. Entre las muestras 28-LAS y 47-LAS se observa una disminución del contenido en calcio y bicarbonato conservando la aumentando la concentración de los demás elementos. Esto puede ser debido a la precipitación de carbonato cálcico, la entrada de aguas de la vertiente “Baños de Taira” (muestra 81-LAS2) con alto contenido en calcio, aumentando el producto iónico del carbonato cálcico. Esta disminución provocada por una posible precipitación de calcita se continua observando desde la salida del embalse Conchi (32-LAS), en Lasana (33-LAS) y en su paso del río Loa por Chiu Chiu (34-LAS). La muestra 29-LAV se tomó en la orilla oeste del río Loa (a la altura de la muestra 28-LAS) donde el nivel freático intercepta la superficie sin aportar superficialmente agua al río Loa. La composición de la muestra 29-LAV es sulfatada cálcica y más diluida que el agua del río Loa en el paso por su misma altura. En la composición del agua del río Loa no se aprecia la entrada de agua significativa con la composición química de la muestra 29-LAV, ya que se vería reflejada en un aumento de su contenido en sulfatos y disminución de la concentración de los demás elementos.

SCHOELLER-BERKALOFF DIAGRAM

Represa Lequena-Chiu Chiu (Octubre-Diciembre



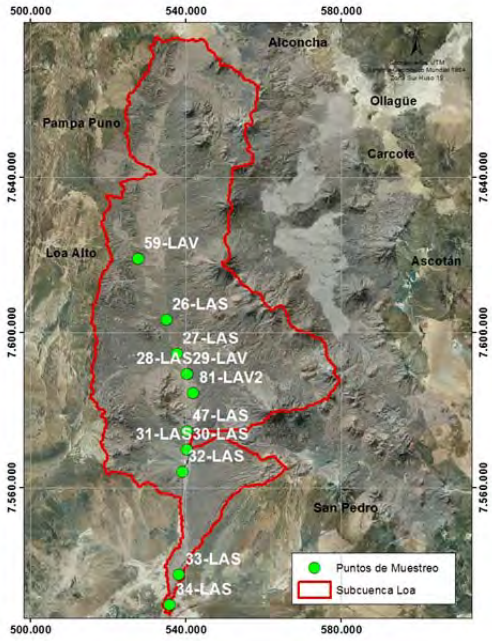


Figura 7-36. Diagrama Schoeller-Berkaloff del tramo del río Loa desde la represa Lequena hasta Chiu Chiu. Fuente: elaboración propia.

La evolución de la marca hidroquímica del curso superficial del río Loa se puede caracterizar a grandes rasgos por un inicio clorurado sódico en las nacientes, un aporte de agua sulfatada-clorurada sódica por parte de la quebrada Paco Paco, una composición bicarbonatada sódica en la zona de la intersección del río Loa con la quebrada Sapunta indicando la entrada de la cuenca de Pampa Puno al río Loa, un retorno a la composición sulfatada-clorurada sódica en las muestras anteriores a la llegada a la represa Lequena de donde se extrae casi la totalidad de caudal. A partir de este punto el río Loa aumenta progresivamente su caudal con una marca clorurada sódica hasta el punto más al sur de la zona de estudio en su paso por Chiu Chiu.

En la subcuenca del río Loa, se dispone de información de antecedentes de la composición hidroquímica en la zona comprendida entre Lequena y Santa Bárbara. En los antecedentes se dispone también de información del sector de Polapi, zona que no ha sido muestreada en las campañas del 2013. La muestra 25-LAS corresponde con la de Loa en Lequena, la 47-LAS con la de Quinchamale y la 31-LAS con la de Loa en Santa Bárbara. La muestra 25-LAS y la de Loa en Lequena presentan similar marca química, siendo ambas sulfatas sódica. La 47-LAS tiene una composición clorurada cálcica y la de Quinchamale es clorurada sódica. Por último, la muestra 31-LAS, es clorurada sódica al igual que la muestra de Loa en Santa Bárbara.

7.5.2 CORRELACIONES EN LA CONCENTRACIÓN

Las especies químicas que se han empleado para analizar su evolución y distribución en la zona de estudio han sido SO_4^{2-}, As y Si de los análisis químicos de la primera campaña y de una selección de puntos de la segunda campaña de terreno. Estas han sido relacionadas con las concentraciones del ion Cl^- cuyo comportamiento se asume conservativo y, por lo tanto, representa en gran medida un elemento trazador de referencia.

Con el grafico de correlación SO_4^{2-}/Cl^-, se pretende observar la variación relativa del sulfato en las aguas de la zona de estudio respecto a la salinidad, de manera que se pueda deducir de que parte de la zona de estudio provienen los sulfatos disueltos en las aguas, si tienen origen en el agua de recarga o se incorporan con aguas de salinidad mayor.

En la relación SO_4^{2-}/Cl^- se observa como la mayoría de muestras presentan mayor proporción de Cl^- que de SO_4^{2-} (**Figura 7-37**). Las muestras de la zona de estudio con mayor proporción sulfatada corresponden a muestras de vertientes localizadas en el salar de Ollagüe (20-LAV y 22-LAV), en el río Loa en su zona de nacimiento (41-LAV) y

en la muestra 29-LAV y, por último, en las vertientes altas de la subcuenca de Alconcha correspondientes a las muestras 35-LAV y 23-LAV, siendo esta última la muestra con la relación SO_4^{2-}/Cl^- más elevada de toda la zona de estudio.

Por otro lado, las muestras que presentan una relación SO_4^{2-}/Cl^- más baja corresponden en el río Loa, principalmente a las muestras de la parte baja, a partir de la muestra 28-LAS. Además, de los salares de Carcote y Ascotán con muestras de vertientes y vertientes y pozos respectivamente. Sin embargo, la vertiente alta correspondiente a la muestra 57-LAV, en la subcuenca de Ascotán, se diferencia del resto de muestras situadas en este salar con una relación SO_4^{2-}/Cl^- significativamente más elevada. Por lo que respecta a las vertientes del salar de Carcorte, en éstas es donde se registran las concentraciones más elevadas de Cl.

Tanto en la subcuenca del Loa como en la de San Pedro la reducción en la relación SO_4^{2-}/Cl^- se produce de forma importante entre las vertientes de sus zonas altas y las aguas superficiales.

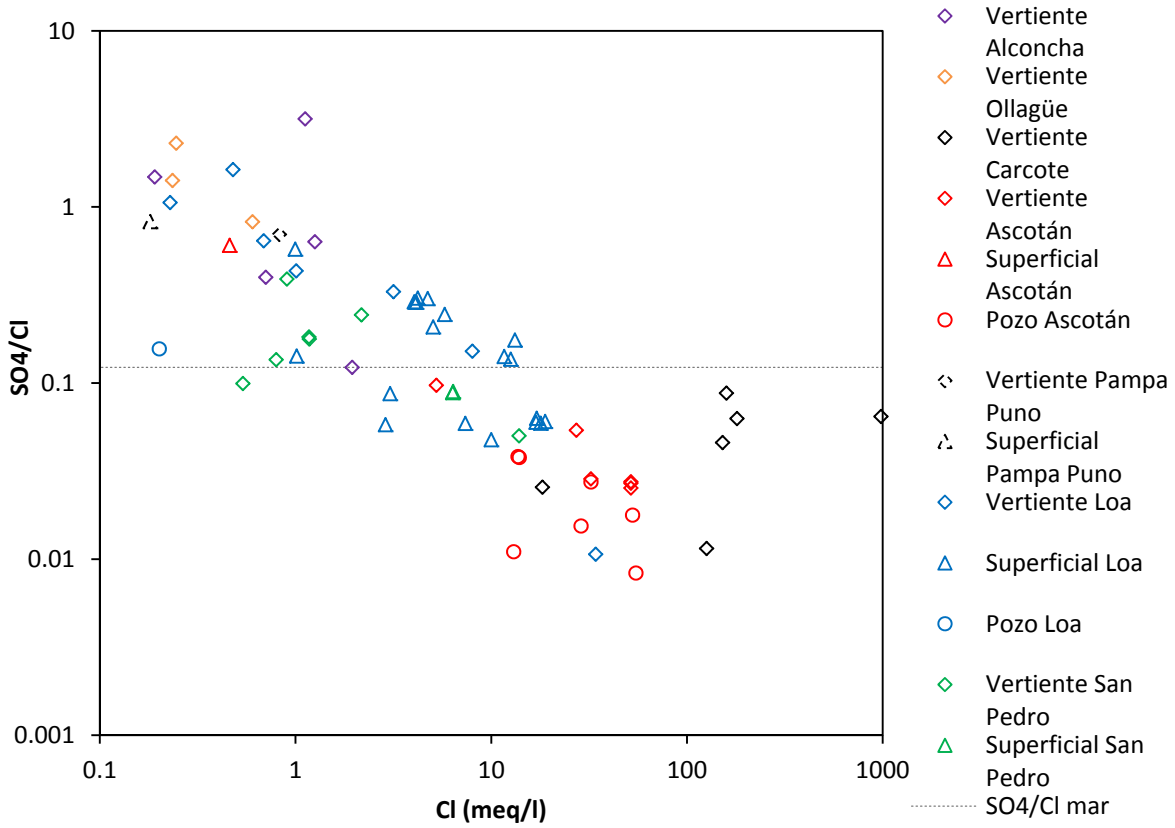


Figura 7-37. Relación SO_4^{2-}/Cl^- de las muestras de la campaña de octubre de 2013. Fuente: elaboración propia.

Las aguas subterráneas tienen normalmente una concentración en Si inferior a 25 mg/l, la concentración de este elemento tiene una solubilidad relativamente baja a los pH neutros y moderadamente alcalinos de las aguas subterráneas (Custodio y Llamas, 2010). La concentración en Si se relaciona con la actividad geotermal, a mayor influencia geotermal mayor concentración de Si. A continuación se presenta la **Figura 7-38** para ver que muestras tienen mayor concentración de Si en función de la temperatura, de esta forma poder ver la influencia geotermal de la reciente actividad volcánica de la zona.

En la **Figura 7-38** se representa la concentración de Si en función de la temperatura medida en terreno, se incluye en la figura el límite superior del rango habitual de concentración en aguas subterráneas (línea segmentada con valor de 25 mg/l). Al observar la distribución de los puntos en el siguiente diagrama se aprecian tres grupos. Uno principal con la mayoría de puntos con amplio rango de temperatura (10 y 30ºC) y de contenido en Si (0-50 mg/l). El segundo grupo lo forman las muestras con una concentración en Si superior a 70 mg/l, correspondientes al curso superficial del río Loa en su nacimiento, a la muestra 81 LAV2 que corresponde a Baños Taira y la muestra 53-LAV correspondiente a una vertiente en la subcuenca del río San Pedro. El tercer grupo se caracteriza por tener temperaturas mayores a 34 ºC y corresponden a mestras tomadas en pozos del sector sur de la subcuenca de Ascotán. No se aprecia ninguna tendencia de la Si con la salinidad, ni tampoco una separación geográfica por el contenido en Si. La influencia geotermal se ve reflejada en que 38 de las 70 muestras representadas tiene un contenido en Si mayor a 25 mg/l, además de tener una temperatura significativamente mayor a la temperatura media anual del aire en superficie.

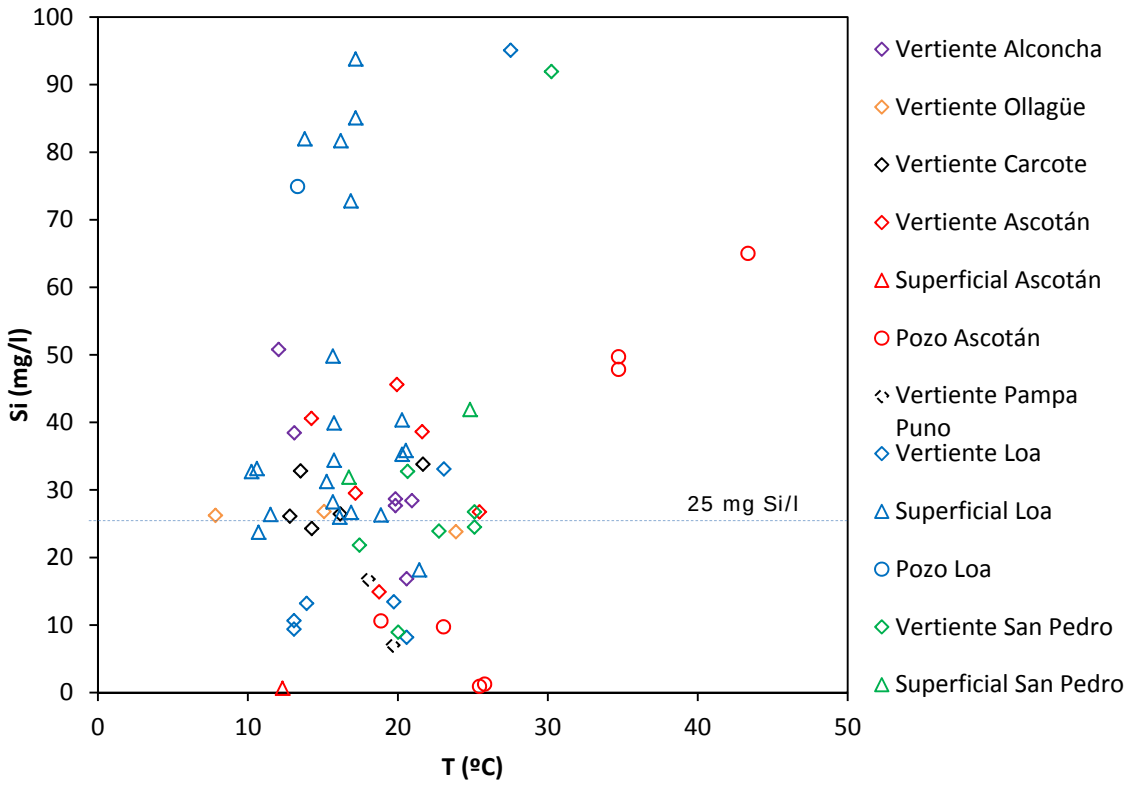


Figura 7-38. Concentración de Si en función de la temperatura de las muestras de la campaña de diciembre-octubre de 2013. Fuente: elaboración propia.

7.5.3 COMPOSICIÓN ISOTÓPICA DE LA MOLÉCULA DE AGUA

Las propiedades químicas de la molécula de agua con distintos isótopos en su composición no varía mucho, sin embargo, las pequeñas diferencias en tensión de vapor, y difusividad, hacen que las moléculas de agua varíen su composición isotópica natural en los procesos del agua dentro del ciclo hídrico. Existe un fraccionamiento isotópico del agua (variación en el contenido relativo de isotopos pesados respecto a los ligeros) al pasar de un estado a otro, lo cual resulta útil para estudiar procesos ocurridos en el ciclo hidrológico. Esto hace que se pueda estimar el origen del agua, posibles mezclas de aguas, condiciones de humedad y temperatura en el momento de precipitación e infiltración, y la interacción entre agua y roca entre otros.

En la **Figura 7-39** se presenta el diagrama de los valores de δ^2H ‰ VSMOW en función de los valores de δ^{18}O ‰ VSMOW de las muestras tomadas en la **primera campaña de terreno de Octubre de 2013**. A modo de referencia se ha representado la Recta Meteórica Mundial Media (RMMM), la recta de pendiente 5 que representa la pendiente de evaporación desde lámina libre de agua y la recta de pendiente 4 representativa de la pendiente de fraccionamiento por evaporación de agua desde el suelo.

La RMMM se obtuvo al ver la composición isotópica de 400 muestras de agua de precipitación continentales, ríos y lagos de varias zonas del mundo. La relación entre el δ^{18}O y δ^2H en la composición del agua de la RMMM se ajusta a la siguiente ecuación empírica (*Craig, H., 1961*):

$$\delta^2 H = 8 \cdot \delta^{18} O + 10$$

El término independiente de la ecuación (10) es conocido como el exceso de deuterio y abreviado como "*d*". El exceso de deuterio varía en función de la humedad y temperatura del ambiente. Según APPELO y POSTMA (Appelo y Postma, 2009) valores de $d>10$ indican contribución de aguas evaporadas en un ambiente árido y/o contribución de aguas de precipitación evaporadas en el continente.

Las precipitaciones originarias de la evaporación de agua marina tienen una composición en δ^{18}O y δ^2H próximas a la RMMM y a medida que los frentes descargan la precipitación hacia el continente la composición isotópica de las nubes es más ligera al igual que la lluvia comparada con las primeras precipitaciones. Este efecto es del tipo Rayleigh, que se caracteriza por ser una reacción que no llega al equilibrio porque el producto de esta sale del sistema. En la **Figura 7-39** se presenta la esquematización de este proceso.

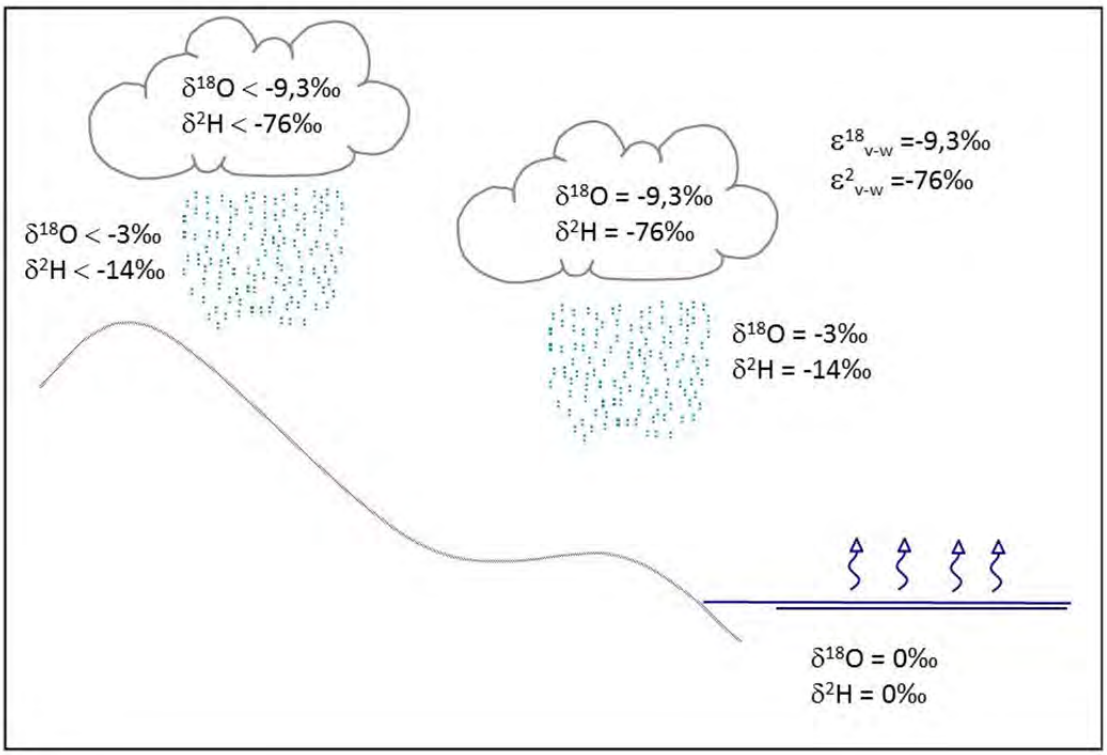


Figura 7-39. Esquema de evolución de composición isotópica de un frente de precipitación. Fuente: elaboración propia.

La pendiente de las rectas de evaporación desde lámina libre y evaporación desde el suelo al igual que los demás procesos en que ocurre fraccionamiento isotópico dependen de la humedad y temperatura del ambiente en que estos procesos tienen lugar. Las pendientes de las rectas de evaporación desde lámina libre de agua son mayores a las producidas por la evaporación desde el suelo por el fraccionamiento por la diferencia en la tasa de difusión entre el ^{18}O y ^{2}H. La alineación de los datos con pendiente mayor a 4 se atribuye a fraccionamiento por evaporación desde lámina libre, en caso contrario se atribuye a fraccionamiento por evaporación desde el suelo.

En el diagrama se han diferenciado los marcadores de las diferentes subcuencas del área de estudio por color y la naturaleza del puntos de agua muestreado por la forma del marcador, rombo para vertientes, triangulo para superficiales y circulo para los pozos. Observando la composición isotópica de la molécula del agua de todas las muestras representadas en la **Figura 7-40** y **Figura 7-41** se puede ver que la mayoría se sitúan próximas a la RMMM, y a partir de estas los valores isotópicos se alinean a las rectas con pendiente de evaporación (pendiente 4 y 5). Se puede observar que las muestras pertenecientes a una misma subcuenca se agrupan dentro

de un rango de variación característico que se describe a continuación, empezando por las muestras más fraccionadas que corresponden a la subcuenca de Ollagüe.

En la subcuenca de Ollagüe se tomaron 3 muestras de vertientes. La marca isotópica de estas se caracteriza en primer lugar por situarse sobre la RMMM, siendo las muestras más ligeras del conjunto de la zona de estudio. Su rango de variación es de -14,63 a -15,58‰ para el $\delta^{18}O$ y de -106,98 a -116,02 ‰ para el $\delta^{2}H$.

En la subcuenca de Alconcha se muestrearon 4 vertientes y en una de ellas se tomó una muestra doble. Las 4 muestras tomadas en vertientes puntuales se sitúan en la RMMM y tienen un estrecho rango de variación, de -14,43 a -15,04 ‰ para el $\delta^{18}O$ y de -107,27 a -108,97 ‰ de $\delta^{2}H$. La muestra que se sitúa fuera de este rango es la muestra 36-LAV, que representa a una vertiente difusa situada en el límite del núcleo del salar de Alconcha. Esta muestra se puede relacionar al resto de muestras de la misma subcuenca a partir de una recta con pendiente 4, característica del fraccionamiento por evaporación desde el suelo.

En la subcuenca de Carcote se tomaron 5 muestras de vertientes, todas ellas en el límite del núcleo del salar. Una muestra fue tomada en el sureste, dos en el suroeste y dos en el noreste. El rango de valores de $\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$ es muy amplio ya que tenemos una muestra con una clara marca de evaporación (la muestra 15-LAV), situada en el suroeste del salar. Esta muestra se puede considerar representativa de la laguna superficial del salar a partir del alto valor de la CE (124.700 µS/cm) y de la marca evaporativa respecto a las demás muestras del salar. La relación entre la muestra 15-LAV y el resto de las muestras de la subcuenca de Carcote se puede explicar a partir de la recta de evaporación desde lámina libre. El resto de muestras de la misma subcuenca presenta un rango de variación de -14,01 a -11,83 ‰ para $\delta^{18}O$ y de -105,35 a -91,57 ‰ para $\delta^{2}H$. La posición relativa de estas cuatro muestras podría explicarse por efectos de evaporación durante la infiltración desde el suelo.

Los marcadores de color rojo representan a muestras tomadas en la subcuenca de Ascotán, que fueron tomadas en 7 pozos, 7 vertientes (6 vertientes puntuales y una difusa) y una muestra de agua superficial. El rango de valores isotópicos de esta subcuenca es de -13,15 a -10,87 ‰ para $\delta^{18}O$ y -98,33 a -80,59 ‰ para $\delta^{2}H$. Al observar la composición isotópica de las muestras de Ascotán se diferencian dos grupos, uno formado por 11 muestras que se disponen siguiendo la recta de pendiente 4 marcando el efecto de evaporación desde el suelo en el momento de infiltración. El segundo grupo está formado por 4 muestras más enriquecidas en $\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$, 3 de

ellas situadas en la RMMM y una de ellas más cercana al primer grupo descrito. Estos dos grupos se pueden separar geográficamente ya que el segundo está formado por las muestras 1-LAP, 14-LAV, 56-LAV y 57-LAS, todas situadas en la zona oeste de la cuenca, el resto de las muestras lo forman las muestras situadas en la parte este y sureste del salar. Por esta distribución geográfica de la composición isotópica de las muestras se podría afirmar que la composición isotópica del agua de precipitación y el proceso de infiltración en la cuenca del salar es distinto en la parte oriente que en la parte poniente.

En la **Figura 7-40** se representan las composiciones isotópicas de $\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$ de las muestras tomadas en la subcuenca del río Loa con marcadores de color azul, en total 21 muestras entre agua superficial y vertientes. El rango de variación de la composición isotópica de la molécula del agua es muy amplio, debido a la gran extensión de la zona además del elevado rango de cotas que hay comprendido entre la zonas altas como el Volcán Aucalquincha (mayor a 6.000 msnm) y la cota del río en su paso por la población de Chiu Chiu (≈2500 msnm). El rango de variación de los valores isotópicos es de -12,86 a -4,06 ‰ en $\delta^{18}O$ y de -96,85 a -58,68 ‰ para $\delta^{2}H$. Las muestras situadas más al norte de la subcuenca son las que presentan valores de $\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$ más empobrecidos, y a medida que las aguas se sitúan al sur en la misma dirección que el río Loa los valores van aumentando. La muestra 29-LAV representa a agua muestreada en las grietas de ignimbrita donde el nivel freático interceptaba la superficie, y por esta razón aparece como la más fraccionada dentro de la subcuenca del río Loa. El grupo de muestras 32-LAS, 33-LAS y 34-LAS tomadas en el río Loa forman un grupo distinto al de las muestras del río aguas arriba, esta separación refleja el fraccionamiento por evaporación de agua desde lámina libre en el embalse Conchi.

La muestra tomada en la vega Sapunta dentro de la subcuenca de Pampa Puno se sitúa alejada de la RMMM con valores de -5.80 ‰ para $\delta^{18}O$ y -61,41 ‰ para $\delta^{2}H$. La vega Sapunta presenta pozas de agua con muy poca circulación desde donde se evapora el agua. Si se traza una recta de pendiente 5 desde este punto hacia la RMMM se podría estimar que la composición isotópica del agua de lluvia que origina la recarga en la subcuenca de Pampa Puno es similar a las muestras de vertientes situadas en la parte norte de la subcuenca del río Loa.

En la **Figura 7-40** se representan los resultados de los análisis de $\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$ de las muestras tomadas en la subcuenca de San Pedro (marcadores de color verde). En total se representan 9 muestras, dos de aguas superficiales y 7 de vertientes. El rango de

variación de los valores isotópicos de la molécula del agua se comprenden entre -12,24 a -9,32 ‰ para $\delta^{18}O$ y de -91,54 a -73,96 ‰ para $\delta^{2}H$. El conjunto de las muestras se sitúan próximas a la RMMM, alejándose de ella siguiendo una recta de pendiente 4 (excepto la muestra 48-LAS), recta típica del fraccionamiento producido por la evaporación desde el suelo.

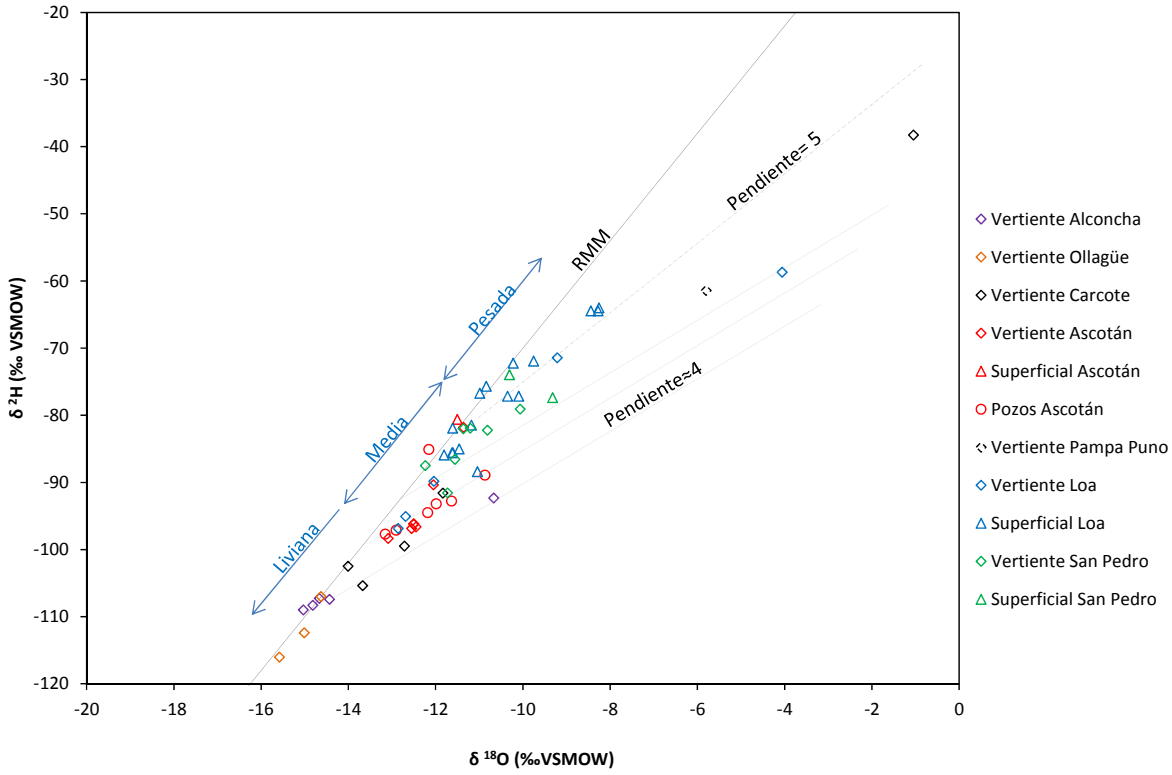


Figura 7-40. Composición isotópica de la molécula del agua de las 60 muestras tomadas en la primera campaña de terreno de Octubre de 2013. Fuente: elaboración propia.

En la **Figura 7-41** se presenta el diagrama de los valores de $\delta^{2}H$ ‰ VSMOW en función de los valores de $\delta^{18}O$ ‰ VSMOW de las muestras tomadas en la **segunda campaña de terreno de Diciembre de 2013** de la misma forma que en la **Figura 7-40.**

En la **Figura 7-41** se puede observar la representación de las muestras tomadas en 3 vertientes de la subcuenca de Ollagüe (marcador de color naranja), repitiendo los puntos de la primera campaña de terreno. Las muestras se sitúan en la RMMM y presentan un rango de variación de -15,62 a -13.78 ‰ para $\delta^{18}O$ y de -116,34 a -105,53 ‰ para $\delta^{2}H$.

En la subcuenca de Alconcha se grafican 5 muestras tomadas todas en vertientes (marcador morado). El punto de toma de las muestras varió respecto a la primera campaña en un punto, sustituyen el punto 36-LAV (vertiente difusa tomada en el límite del salar) por el 75-LAV2 (vertiente puntual situada al oeste del núcleo del salar). Todas las muestras se sitúan en la RMMM en un rango de la composición isotópica de la molécula del agua de -14,96 a -14,35 ‰ para $\delta^{18}O$ y de -110,04 a -107,04 ‰ para $\delta^{2}H$.

Las composiciones isotópicas de las muestras tomadas en subcuenca de Carcote (marcador de color negro) representan a 5 vertientes puntuales situadas en el límite del salar repartidas por el perímetro de este. A diferencia de la primera campaña se sustituyeron dos muestras. Las muestras 80-LAV2 y 76-LAV2 reemplazaron a las muestras 17-LAV y 15-LAV respectivamente. El rango de variación de la composición isotópica es de -14,37 a -11,38 ‰ para $\delta^{18}O$ y de -107,53 a -90,59 ‰ para $\delta^{2}H$. La muestra 16-LAV2 es la muestra que se aleja isotópicamente de las demás al resto de muestras de la misma subcuenca. Esto indicaría que esta muestra sufrió fraccionamiento por evaporación desde lámina libre, ya que la recta que uniría esta muestra con el resto es superior a 5. Se puede observar como hay una diferencia geográfica en la composición isotópica, las muestras 76-LAV2 y 19-LAV2 se sitúan en una recta de evaporación más fraccionada que las muestras 18-LAV2 y 17-LAV2.

En el diagrama de composición isotópica de $\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$ de la segunda campaña de terreno (**Figura 7-41**) se representan 10 muestras tomadas en la subcuenca de Ascotán (marcador de color rojo). Del total de las muestras 4 fueron tomadas en vertientes, 5 en pozos y 1 de un curso de agua superficial. A diferencia de la primera campaña no se tomaron muestras de los puntos 4-LAP, 6-LAV, 7-LAV, 9-LAV y 10-LAP. La composición isotópica de las muestras de esta subcuenca tiene un rango de variación de -12,70 a -10,57 ‰ para $\delta^{18}O$ y de -97,41 a -79,74 ‰ para $\delta^{2}H$. Se puede distinguir un grupo formado por las muestras 1-LAP2, 14-LAV2, 56-LAV2 y 57-LAS2 por su disposición amorfa, mientras que el resto de muestras de la subcuenca se dispone siguiendo una recta de pendiente 4 característica del fraccionamiento desde el suelo. Al ser estas muestras de vertientes y pozos se asigna su fraccionamiento en el momento de infiltración. Estos dos grupos se pueden separar geográficamente, siendo el grupo de muestras que se sitúa siguiendo la recta de pendiente 4 a las muestras situadas al este y sureste del salar, mientras que el resto son del oeste y noroeste del salar.

Las muestras de la subcuenca del río Loa se representan en el diagrama de $\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$ con marcadores de color azul. Exceptuando dos muestras tomadas en el mismo punto (29-LAV2 y su repetición) los valores isotópicos de la molécula del agua se sitúan en la RMMM o dispuestos paralelamente a RMMM con valores próximos a ella. El rango de valores de $\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$, excluyendo las muestras 29-LAV2 por su gran fraccionamiento es de -13,28 a -8,29 ‰ y de -97,32 a -63,49 ‰ respectivamente. El rango de variación es el más grande de las subcuencas debido a su gran extensión y variado relieve. Las muestras 28-LAS fueron tomadas en unas charcas producidas por la interceptación de la superficie topográfica (ignimbrita fracturada) con el nivel freático. La evaporación de estas charcas y la poca renovación de estas hace que sus valores isotópicos tengan un fraccionamiento por evaporación muy marcado, con valores próximos a cero para $\delta^{18}O$ y de -44 para $\delta^{2}H$. Estimando el valor isotópico a partir de ellos mediante las rectas de evaporación con pendiente entre 4 y 5 sus valores de $\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$ podrían ser similares a los valores situados entre el conjunto de muestras de la subcuenca de Alconcha (marcador de color morado). Las muestras situadas aguas abajo de la salida del embalse Conchi presentan mayor enriquecimiento isotópico, separándose del grupo, mostrando un fraccionamiento en la evaporación sufrida desde la superficie del embalse. Las muestras más ligeras corresponden al pozo y las vertientes situadas en la cabecera del río Loa.

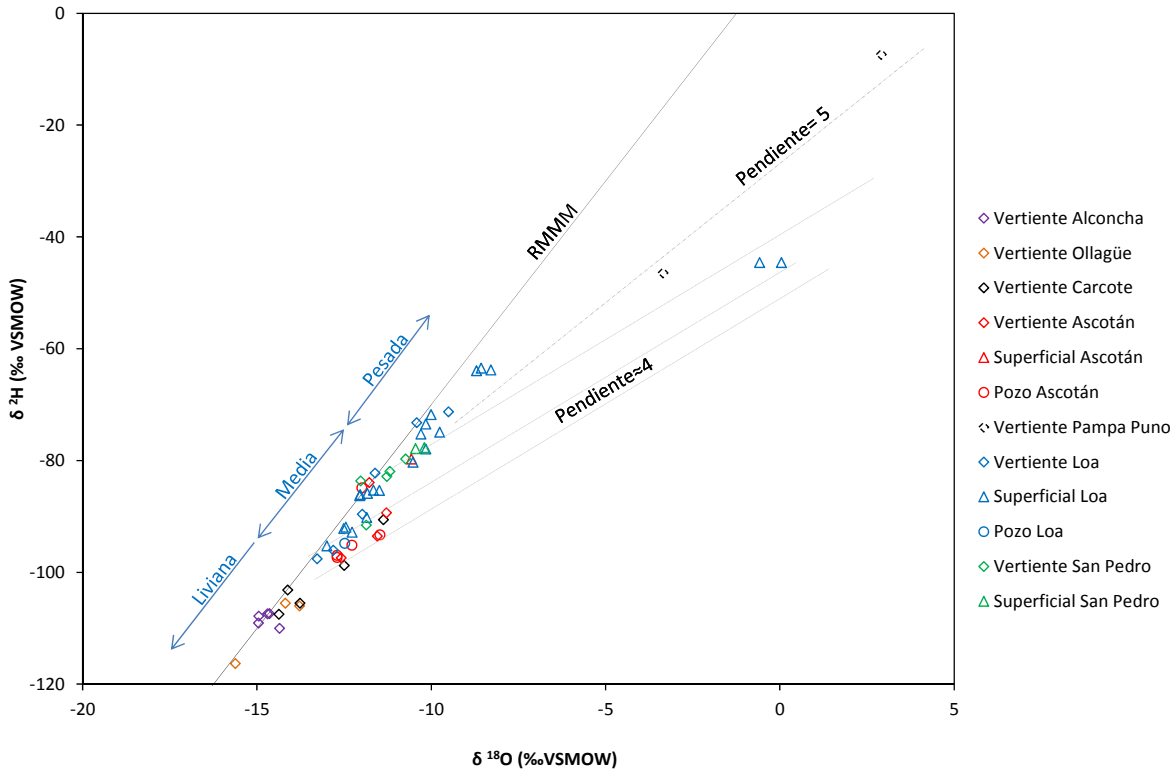


Figura 7-41. Composición isotópica de la molécula del agua de las 60 muestras tomadas en la primera campaña de terreno de Diciembre de 2013. Fuente: elaboración propia.

La distribución espacial de la composición isotópica de las muestras de la segunda campaña en la zona de estudio se presenta en la **Figura 7-42**.

Observando las composiciones de $\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$ de las dos campañas (Octubre y Diciembre de 2013) se apreció una división clara en los valores de la subcuenca del río Loa. Al grupo de valores más enriquecidos en $\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$ se les atribuyó la categoría de composición "Pesada" y al resto de los valores "Media". Las muestras de las demás cuencas se les aplicó el mismo criterio, añadiendo el grupo de "Liviana" a las muestras más empobrecidas isotópicamente a las muestras y a las muestras que se sitúan alejadas de la RMMM fueron denominadas "Evaporadas". Esta clasificación tiene como objetivo simplificar la variación geográfica de la composición isotópica de la molécula del agua.

En la **Figura 7-42** se puede observar la distribución geográfica de los tres grupos de composiciones: Liviana, Media y Pesada. Las cuencas con composición isotópica del agua más ligera se sitúan al noreste de la zona de estudio y las más pesadas al

suroeste. En las zonas noroeste y central predomina la categoría intermedia.

La división de la subcuenca de Carcote entre este y oeste al igual que se observó en los diagramas de $\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$ para la subcuenca de Ascotán, no es apreciable en la **Figura 7-42** por la amplitud de los rangos aplicados en la división.

La división del río Loa entre aguas de composición isotópica "Media" y "Pesada" queda delimitada por la extracción de agua en Represa Lequena (entre las muestras 25-LAS y 26-LAS). Se puede observar como vertientes al oeste y este aguas arriba de Represa Lequena tienen composiciones más pesadas que el curso superficial del Loa en esa altura. Esto hecho se explicaría por una mayor contribución del caudal que llega hasta Lequena De agua proveniente de la parte de la cabecera del río. Siendo los aportes de la Sierra del Medio y de los volcanes de la cadena central (en esa altura), como los representados por las muestras 43-LAV o 40-LAV, de menor importancia en cuanto a caudal.

En la subcuenca de Ascotán se observa como la muestra situada más al oeste y más alejada del salar es la muestra que pertenece al grupo de composición pesada a diferencia del resto. Esta diferencia en realidad es cuantitativamente reducida, y en el muestreo de la primera campaña se encuentra en el mismo grupo que el resto de muestras de la subcuenca de Ascotán, posiblemente la variación entre las dos campañas se deba a evaporación en el curso de agua superficial y/o en el momento de muestreo.

Las muestras de la subcuenca del río San Pedro se sitúan repartidas entre los dos grupos, es significativo que las muestras de agua superficiales del río San Pedro pertenezcan a la marca isotópica pesada, indicando un mayor aporte de la zona más oeste de la cuenca.

En la subcuenca del río Loa se puede observar la diferencia entre las dos nacientes del río Chela, ambas se localizan a 2 km de distancia y tienen una composición isotópica distinta. Las dos nacientes parecen tener origen distinto, la muestra 61-LAS parece drenar agua proveniente del volcán Aucalquincha y la muestra 40-LAS drenar agua del cerro Chela.

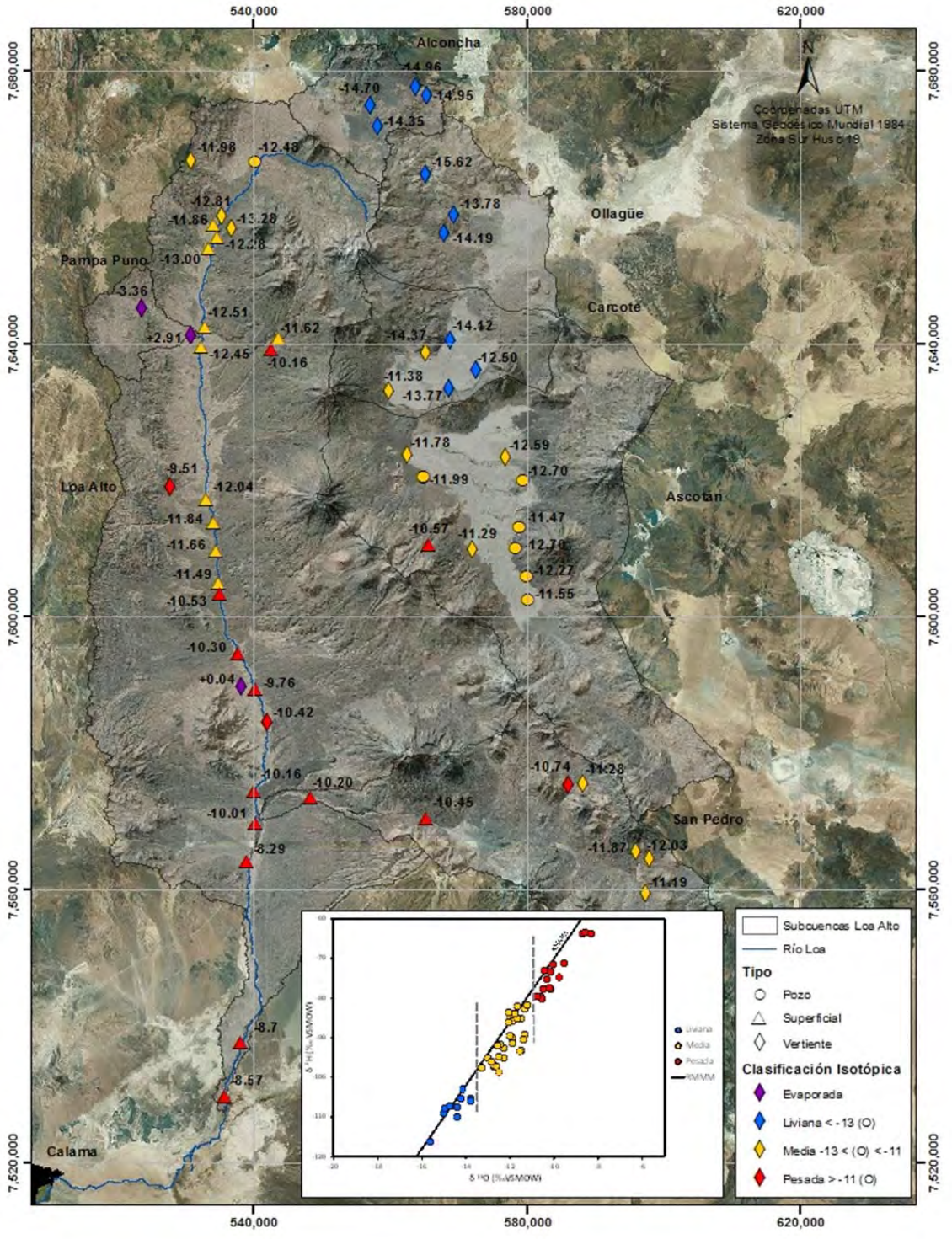


Figura 7-42. Distribución de las composiciones isotópicas de las muestras de octubre de 2013. Fuente: elaboración propia.

La altitud afecta a la composición isotópica de $\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$ de la precipitación por dos motivos: las lluvias que se producen en grandes altitudes proceden de masas de vapor empobrecidas isotópicamente por la pérdida de isótopos pesados en las lluvias anteriores; y porque las temperaturas son menores en altitud, lo que provoca un fraccionamiento mayor en la condensación del vapor. Estos dos factores combinados provocan que la precipitación de agua más pesada se produzca a baja altitud y a medida que asciende la masa de vapor en altitud se va convirtiendo en precipitación más ligera. Las ecuaciones que se ajustan al gradiente topográfico general son (FCIHS 2009*)*:

$$\delta^{2}H = \frac{-1{,}5\ a - 4‰}{100\ m\ de\ elevación}$$

$$\delta^{18}O = \frac{-0{,}15\ a - 0{,}5‰}{100\ m\ de\ elevación}$$

Sin embargo, en el informe de VILLABLANCA (Villablanca, 2009) se ha definido la Recta Altitudinal (RA) del gradiente topográfico particular del área de estudio. Esta RA se ha desarrollado a partir del análisis isotópico de las aguas muestreadas en vertientes del volcán Miño y Aucalquincha. En este informe se caracteriza el gradiente topográfico del área de estudio según las siguientes ecuaciones:

$$\delta^{2}H = \frac{-2{,}44‰}{100\ m\ de\ elevación}$$

$$\delta^{18}O = \frac{-0{,}26‰}{100\ m\ de\ elevación}$$

Mediante el método de los mínimos cuadrados, VILLABLANCA (Villablanca, 2009) estima la altitud media de recarga (h) correspondiente a un agua de composición isotópica dada por las ecuaciones:

$$h\ (m) = -388{,}55 \cdot \delta^{18}O - 623{,}3$$

$$h\ (m) = -40{,}92 \cdot \delta^{2}H - 916{,}29$$

En la **Figura 7-43** se presentan los valores de la composición isotópica $\delta^{18}O$ de las muestras tomadas en la primera campaña de terreno realizada en octubre 2013 según la altitud en la que se toman. De este modo según FCIHS (FCIHS, 2009), la relación entre las muestras y la RA indica lo siguiente:

Las muestras que se encuentran por encima de la RA indican que son aguas probablemente afectadas por algún proceso de evaporación antes o durante su infiltración y/o a un enriquecimiento por reacciones con el terreno que contiene evaporitas. Este es el caso de las muestras 15-LAV (en el salar de Carcote), 29-LAV, 43-LAV y 41-LAV (en la subcuenca del río Loa), la muestra 57-LAS tomada en la quebrada del Ermitaño en la subcuenca del salar de Ascotán, y la muestra 55-LAS y las vertientes de la subcuenca de San Pedro, menos las ubicadas en la quebrada de Colana, están por encima de la RA.

Las muestras que coinciden con la RA indican que su cota topográfica coincide con la cota de recarga. Esto sucede en las muestras 51-LAS (en la subcuenca de San Pedro), en 33-LAS (en el río Loa en Lasana), 34-LAS (en el cauce del Loa en Chiu Chiu), 10 – LAP y 14-LAV (en la subcuenca del salar de Ascotán).

Las muestras que están por debajo de la RA indican que son muestras tomadas en una cota topográfica menor a su cota de recarga. Es decir, la cota de recarga aproximada de las muestras tomadas en la subcuenca del salar de Alconcha corresponden a una altitud comprendida entre 4.900 y 5.200 msnm, las muestras de la subcuenca del salar de Ollagüe entre 5.000 y 5.500 msnm, las muestras del salar de Carcote (exceptuando la 15-LAV) entre 3.900 y 4.800 msnm de altitud, las aguas muestreadas en las vertientes y pozos ubicados en la subcuenca de Ascotán en un rango aproximado de 3.600 a 4.800 msnm, y las muestras superficiales y vertientes de la subcuenca del Loa se encuentran en general por debajo de la RA mostrando una acota de recarga de 3.900 a 3.000 msnm. A partir de la tendencia descrita por las muestras en su contenido en $\delta^{18}O$ y su elevación topográfica se puede representar una “RA sugerida” que podría caracterizar mejor la relación del contenido en $\delta^{18}O$ en función de la altitud topográfica.

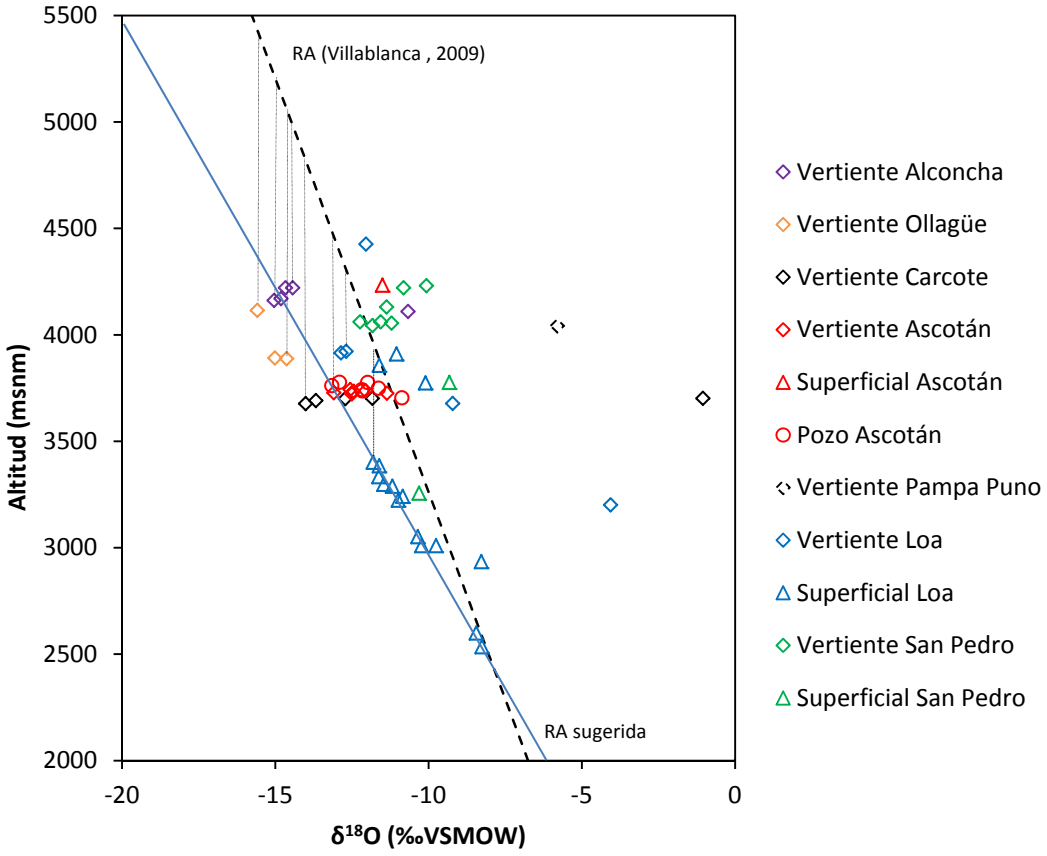


Figura 7-43. Relación entre la $\delta^{18}O$ de las muestras tomadas en la primera campaña de terreno y la altitud. Fuente: elaboración propia.

En la **Figura 7-44** se muestra la relación entre la $\delta^{2}H$ de las muestras tomadas en la primera campaña de terreno y la altitud. En este gráfico también se ha representado la RA definida por VILLABLANCA (Villablanca, 2009), sin embargo todas las muestras tomadas se encuentran por encima de la Línea Meteórica Local presentada por este autor.

La diferencia entre el ajuste a las rectas altitudinales presentadas por VILLABLANCA (Villablanca, 2009) y las muestras tomadas en las campañas realizadas para el presente estudio puede mostrar que la recta altitudinal para el $\delta^{2}H$ sea no representativa de las precipitaciones, en especial al parámetro "d" (exceso de deuterio), que marca la relación entre el contenido de $\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$. A partir de la tendencia lineal de las muestras se presenta una "RA sugerida".

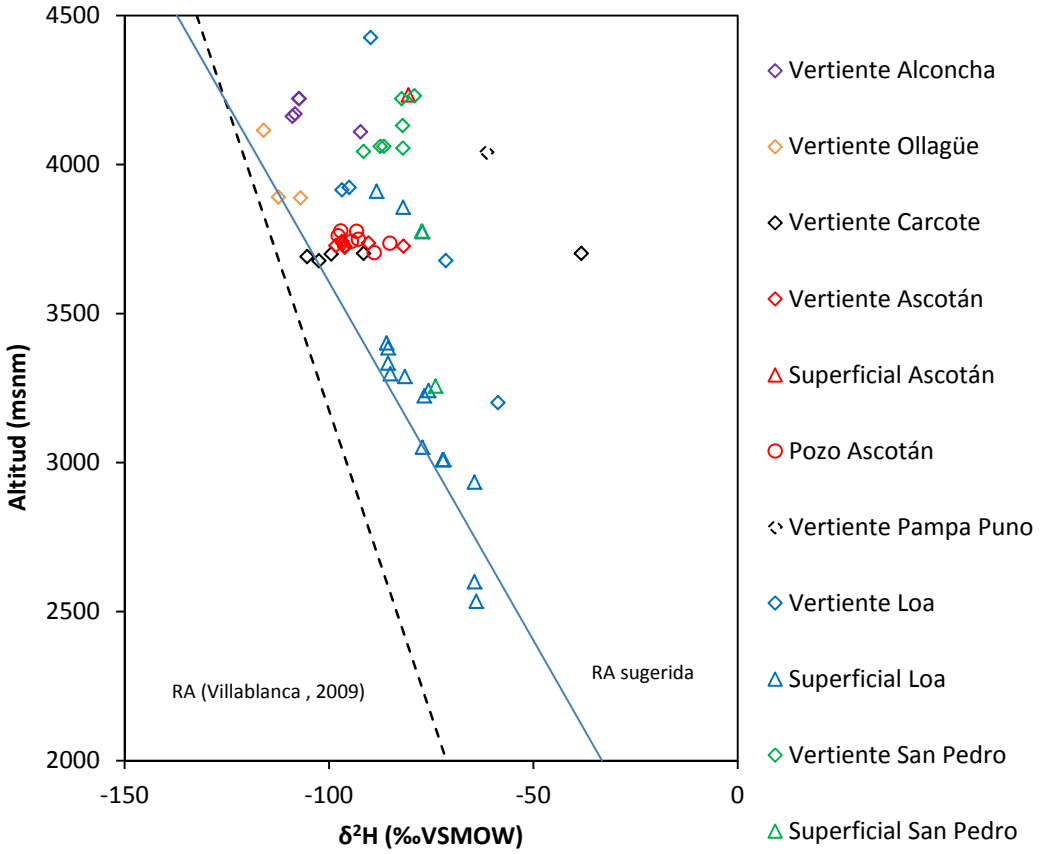


Figura 7-44. Relación entre la δ^2H de las muestras tomadas en la primera campaña de terreno y la altitud. Fuente: elaboración propia.

7.5.4 COMPOSICIÓN ISOTÓPICA DE CARBONO 13

El análisis isotópico del $\delta^{13}C$ se ha realizado en 60 muestras tomadas en el área de estudio durante la primera campaña de terreno, octubre de 2013. El rango de $\delta^{13}C$ que presenta el agua superficial y subterránea varía según el medio en el que se encuentre (**Figura 7-45**). El valor $\delta^{13}C$ es igual a 0 en las calizas marinas ya que se considera como el valor estándar. El CO_2 atmosférico tiene un $\delta^{13}C$ similar a -8 ‰ VPDB. Las plantas que se cultivan en el sector sur del área de estudio son del tipo C3 y C4 que varía de -30 a -8 ‰ , mientras que el $\delta^{13}C$ del carbono disuelto en el agua subterránea varía -18 a +8 ‰ generalmente, pudiendo tener valores más extremos.

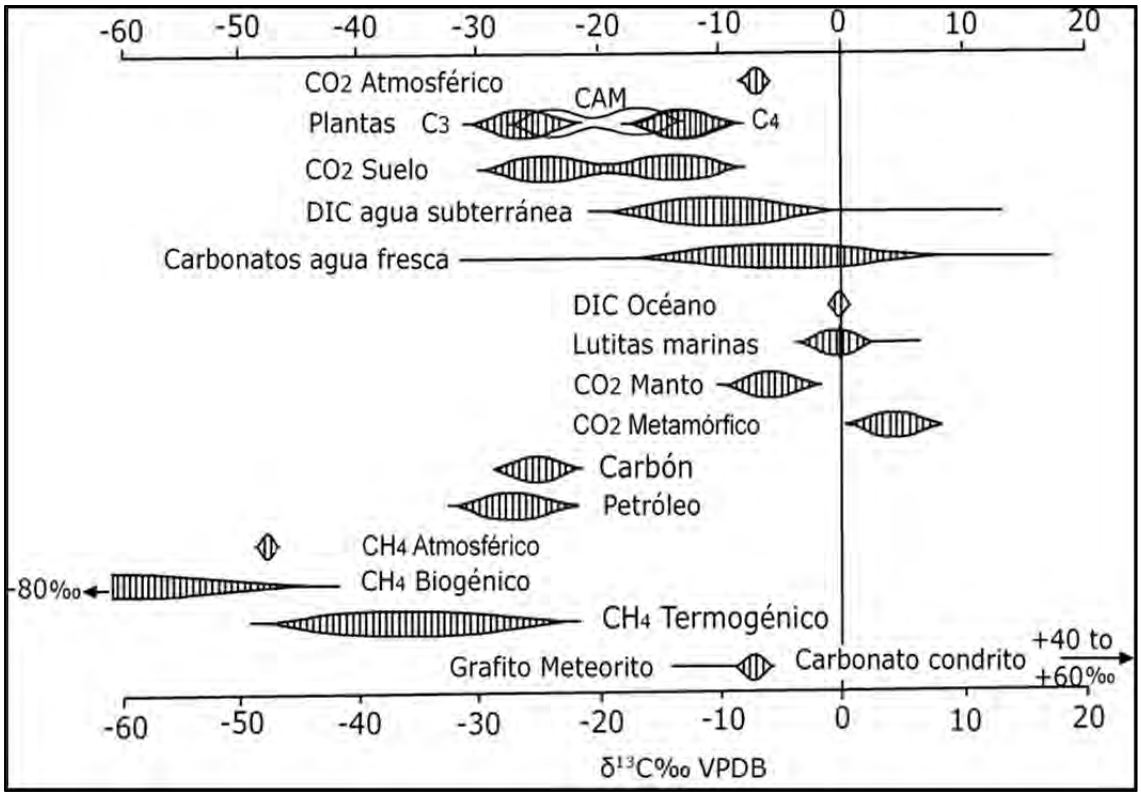


Figura 7-45. Valores y rangos de $\delta^{13}C$ en diferentes componentes. Fuente: modificado de Clark, I. y Fritz, P., 1997.

En la **Figura 7-46** se presenta el diagrama donde se representan los valores de $\delta^{13}C$ en función del contenido en cloruros de las muestras tomadas durante la primera campaña de Octubre de 2013.

Los valores de $\delta^{13}C$ están dentro del rango de +5 a -15 ‰ y entre 0,1 a 100 meq/l en los valores de cloruros, exceptuando las muestras de la subcuenca del salar de Carcote que tienen más de 100 meq/l de Cl. Mirando el conjunto de muestras representadas se observa que las muestras con valores más negativos de $\delta^{13}C$ son las muestras con menor cantidad de sales disueltas.

Entrando más a detalle se pueden diferenciar 4 grupos a partir de la relación $\delta^{13}C$-Cl representados en el gráfico con 4 círculos enumerados de G1 al G4.

- El grupo G1 ($\delta^{13}C$ entre -5 y -15 ‰ y entre 0,1 y 1 meq/l de Cl): está formado por las tres muestras de la subcuenca de Ollagüe, tres muestras de las vertientes que aportan agua desde el flanco occidental del río Loa, la muestra

52-LAV de la cuenca de San Pedro, la muestra de 42-LAV de Pampa Puno y la muestra 57-LAS de Ascotán (oeste del salar).

- El grupo G2 ($\delta^{13}C$ entre -7,3 y -2,3 ‰ y entre 0,7 y 3 meq/l de Cl): está constituido por 4 muestras tomadas en las vertientes de la subcuenca del salar de Alconcha (excepto la muestra 35-LAV) y 5 vertientes de la cuenca de San Pedro.
- El grupo G3, (4 a 17 meq/l de Cl): está formado principalmente por las muestras tomadas en los cursos superficiales de los ríos San Pedro y Loa teniendo valores de $\delta^{13}C$ positivos o muy próximos a 0 ‰.
- En el grupo G4 ($\delta^{13}C$ entre -2 y -6 ‰ y entre 13 y 55 meq/l de Cl). Son las muestras de los pozos y vertientes de los salares de Ascotán y Carcote.

Los grupos G3 y G4 no tienen una separación clara a partir de sus valores de $\delta^{13}C$ y Cl, pero se pueden diferenciar las aguas superficiales de la cuenca del río Loa y del río San Pedro de las muestras de las vertientes y pozos de los salares de Ascotán y Carcote.

En el gráfico se puede observar como dos muestras quedan fuera de los 4 grupos mencionados, estas muestras pertenecen al pozo 2-LAP de la cuenca de Ascotán y la muestra 15-LAV del salar de Carcote.

Entre los grupos de muestras representados (G1, G2, G3 y G4) se pueden ver similitudes y diferencias significativas.

- Los grupos G1 y G2 están formados por muestras de agua tomadas en vertientes y por tres muestras de agua superficial (40-LAS, 61-LAS y 57-LAS) todas a poca distancia de la vertiente que las origina. Pudiendo extraer de este grupo que el agua de recarga tiene valores de $\delta^{13}C$ entre -15 y -5 ‰.
- El grupo G3 está formado en su práctica totalidad por aguas superficiales, y se caracteriza por tener los valores más alto en $\delta^{13}C$, las aguas superficiales como las de los río Loa y San Pedro tienen largos recorridos en superficie teniendo tiempo para el equilibrio entre el $\delta^{13}C$ de los carbonatos y bicarbonatos con el $\delta^{13}C$ del CO_2 de la atmósfera.
- En el grupo G4 podemos ver como está integrado prácticamente por muestras de los salares de Ascotán y Carcote, diferenciados por tener una mayor solinidad. Las muestras de Ascotán tienen valores de $\delta^{13}C$ más pesados, situándose entre la tendencia general de vertientes y aguas superficiales. Las muestras de Carcote tienen valores de $\delta^{13}C$ similares al resto de vertientes.

Hay dos muestras que se encuentran fuera de los 4 grupos: la muestra LAP-4 y la muestra 15-LAV. La muestra LAP-4 tiene un valor muy negativo a pesar de encontrarse rodeado geográficamente de valores significativamente mayores a el. La muestra 15-LAV de Carcote tiene un valor de $\delta^{13}C$ parecido a las muestras superficiales, por su alto valor en cloruros y su alto valor en $\delta^{13}C$. Se puede decir que es agua con un gran tiempo de evaporación y contacto con la atmósfera.

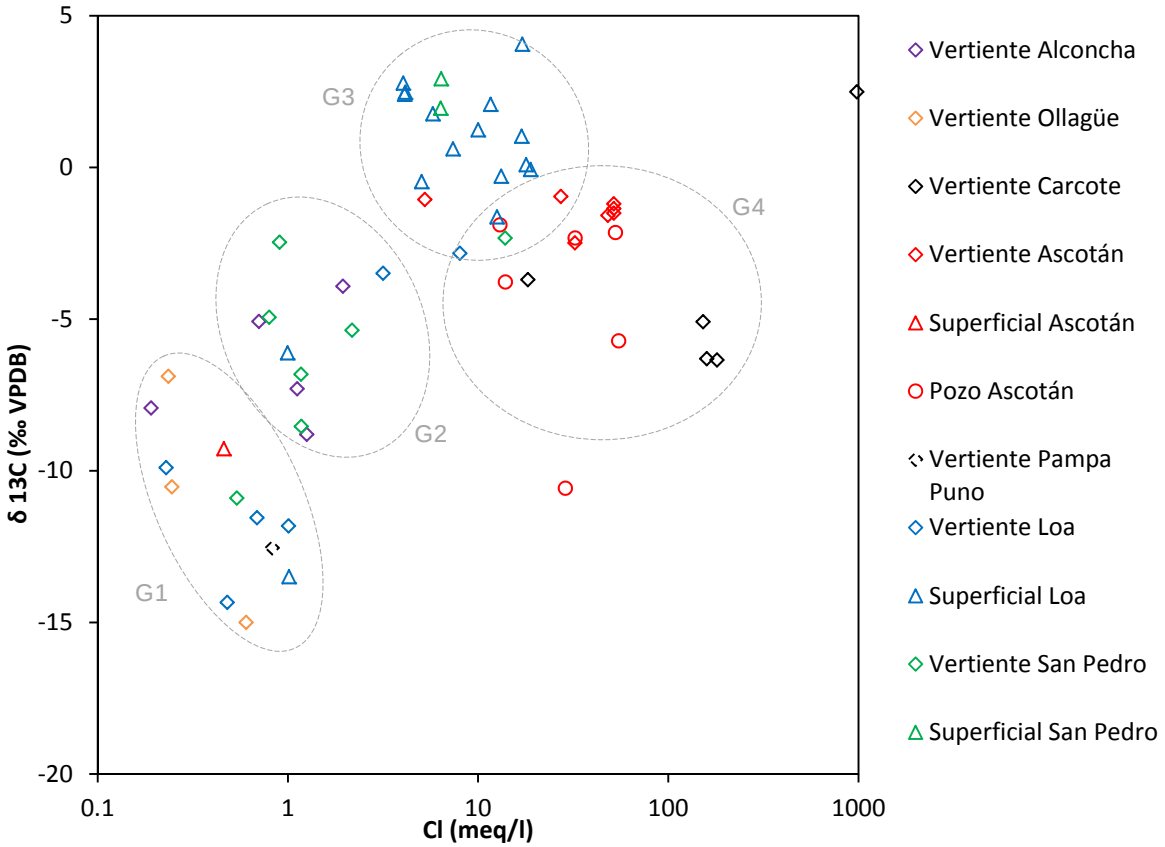


Figura 7-46. Relación $\delta^{13}C$-Cl de las muestras tomadas en la primera campaña de terreno, octubre 2013. Fuente: elaboración propia.

En la **Figura 7-47** se presenta el diagrama de los valores de $\delta^{13}C$ en función de la alcalinidad, las 60 muestras están dentro del rango comprendido entre +5 y -15 ‰ y de 0 a 10 meq $CaCO_3$/L.

Existe una tendencia general que comienza con los valores más pobres de $\delta^{13}C$ (-15 ‰ hasta 0 ‰) y más bajos de TAC (de 0 a 2 meq $CaCO_3$/L), entre los que se encuentran las muestras tomadas en la subcuenca de Ollagüe y Alconcha. Seguidas de las vertientes de la subcuenca de San Pedro menos las dos vertientes de Colana (53-LAV y

54-LAV). Estas dos vertientes de Colana junto a los pozos de la subcuenca de Ascotán aumentan la concentración del TAC hasta 4 meq $CaCO_3$/L pero el valor de $\delta^{13}C$ se mantiene entre -5 y 0 ‰. Existe un grupo con valores de $\delta^{13}C$ comprendidos entre 0 y +4 ‰ y de TAC entre 0 y 10 meq $CaCO_3$/L, formado por las muestras tomadas en el cauce del río Loa y del río San Pedro.

A partir de la **Figura 7-47** se observa como el aumento de alcalinidad en las muestras incrementa el valor de $\delta^{13}C$ hacia valores positivos. La única excepción es la muestra 42-LAV correspondiente a la Vega Sapunta. Esto se puede explicar por que en la Vega Sapunta las pozas de agua tienen mucha vegetación y el agua está casi estancada. Por este motivo el $\delta^{13}C$ del carbono inorgánico se equilibra con el CO_2 biogénico con origen en plantas del tipo C-3 con valores de $\delta^{13}C$ entorno a -25 ‰. El valor de fraccionamiento en equilibrio depende del pH al que se efectue.

La excepción a la tendencia general es la muestra 46-LAS, con una valor de $\delta^{13}C$ similar a las muestras aguas arriba y aguas abajo del río Loa, pero con una alcalinidad muy inferior. Las variaciones de cloruros no muestran una variación de igual magnitud en ese tramo, lo que induce a pensar que la medición de la alcalinidad en esa muestra no es representativa del agua del río Loa.

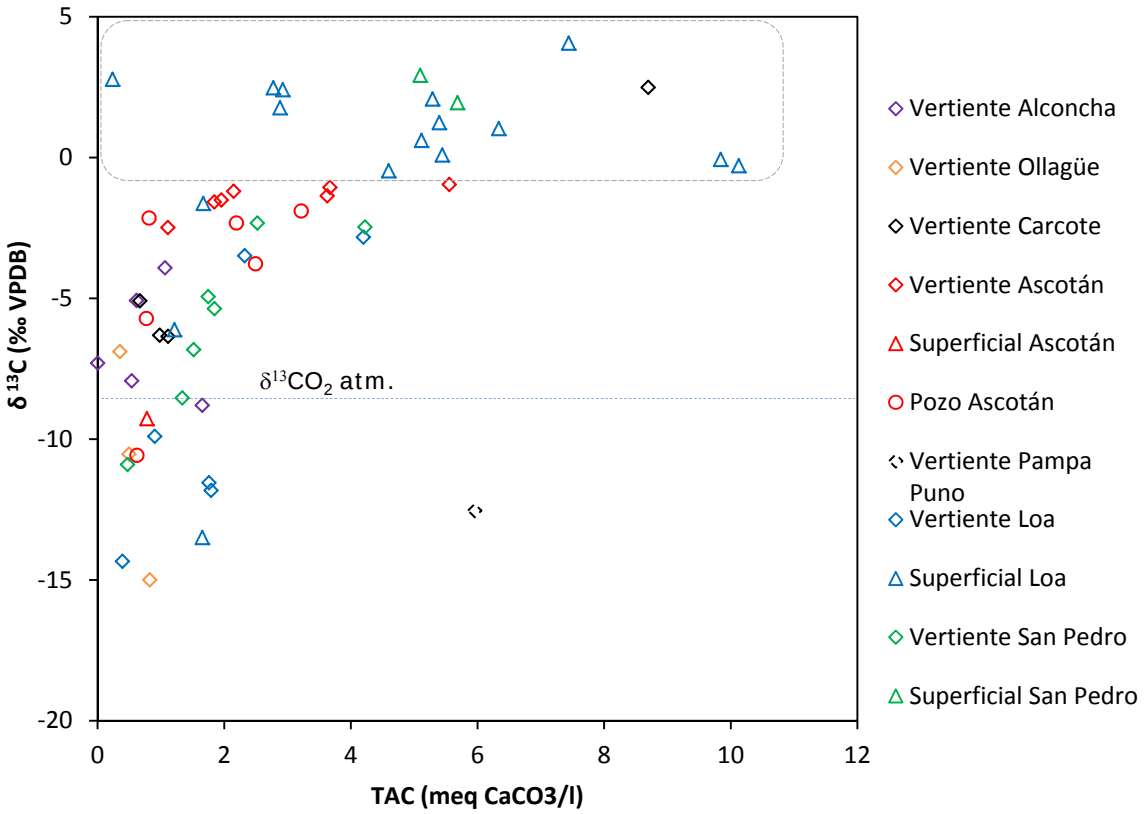


Figura 7-47. Relación δ^{13}C-TAC de las muestras tomadas en la primera campaña de terreno, octubre 2013. Fuente: elaboración propia.

A continuación se describen los valores representados en la **Figura 7-48** de valores de δ^{13}C, en la figura se han clasificado los valores de δ^{13}C en cuatro rangos de 5 ‰ cada uno (de -15 a +5 ‰) y se han diferenciado los tipos de puntos de agua según la forma de los marcadores.

En la subcuenca del salar de Alconcha la muestra 35-LAV tiene un valor de δ^{13}C de -7.93 ‰ VPDB pasando a -8,8 ‰ VPDB en la muestra 36-LAV. Entre las muestras 24-LAV y 23-LAV existe una gran variación del valor del δ^{13}C siendo -3,92 y -7,3 ‰ , esta diferencia entre estas dos muestras separadas por decenas de metros se presenta tanto en la temperatura, pH como composición hidroquímica, Indicando dos flujos de agua distintos.

Las 3 muestras tomadas en la subcuenca de Ollagüe en la unidad hidrogeológica volcánica andesítica fracturada presentan un rango de -15 a -6,89 ‰ .

El rango de $\delta^{13}C$ es menor en la subcuenca de Carcote, siendo -6,35 a -3,7 ‰, exceptuando la muestra 15-LAV cuyo valor es 2,49 ‰. Muestra representativa de la laguna del salar de Carcote y no de vertiente.

El sector poniente del salar de Ascotán se caracteriza por tener un rango menor, entre -1,9 a -0,96 ‰, mientras que el límite oriental es -15,55 a -1,2 ‰. La vertiente del Ermitaño, 57-LAS, presenta una $\delta^{13}C$ -9,27 ‰, similar al resto de vertientes de la unidad acuífera andesítica fracturada.

En la subcuenca del río San Pedro las vertientes del extremo sureste, 51-LAV, 52-LAV, 58-LAV, 49-LAV presentan un rango de $\delta^{13}C$ comprendido entre -5 y -11 ‰, mientras que las muestras de las 2 vertientes de Colana están menos empobrecidas siendo -2 ‰. En cambio, las muestras de aguas superficial del río San Pedro es +2 y +3 ‰.

En el nacimiento del río Loa el agua superficial presenta valores de $\delta^{13}C$ de -2,83 y -3,5 ‰, sin embargo aguas abajo el curso superficial se enriquece progresivamente, alcanzando +2.78 ‰ pero en la muestra tomada después de la captación de 550 L/s en Lequena el $\delta^{13}C$ del agua vuelve a ser negativa, 26-LAV tiene -0,47 ‰. Después de este punto el valor de $\delta^{13}C$ vuelve a aumentar progresivamente hasta la muestra 47-LAS tomada en el río Loa al sur del cerro Las Papas. A continuación de la confluencia del río San Pedro, en el vado de Santa Bárbara es agua prácticamente con valor neutro, -0,07 ‰. En el embalse Conchi es agua muy enriquecida, presentando +4,06 ‰, pero este valor disminuye hasta alcanzar 0,09 ‰ en Chiu Chiu. Los diferentes incrementos de $\delta^{13}C$ en el curso superficial del río Loa no se pueden explicar a partir de los afloramientos de agua que se presentan en la misma cuenca a ambos lados del río, ya que su composición es inferior a -6,11 ‰.

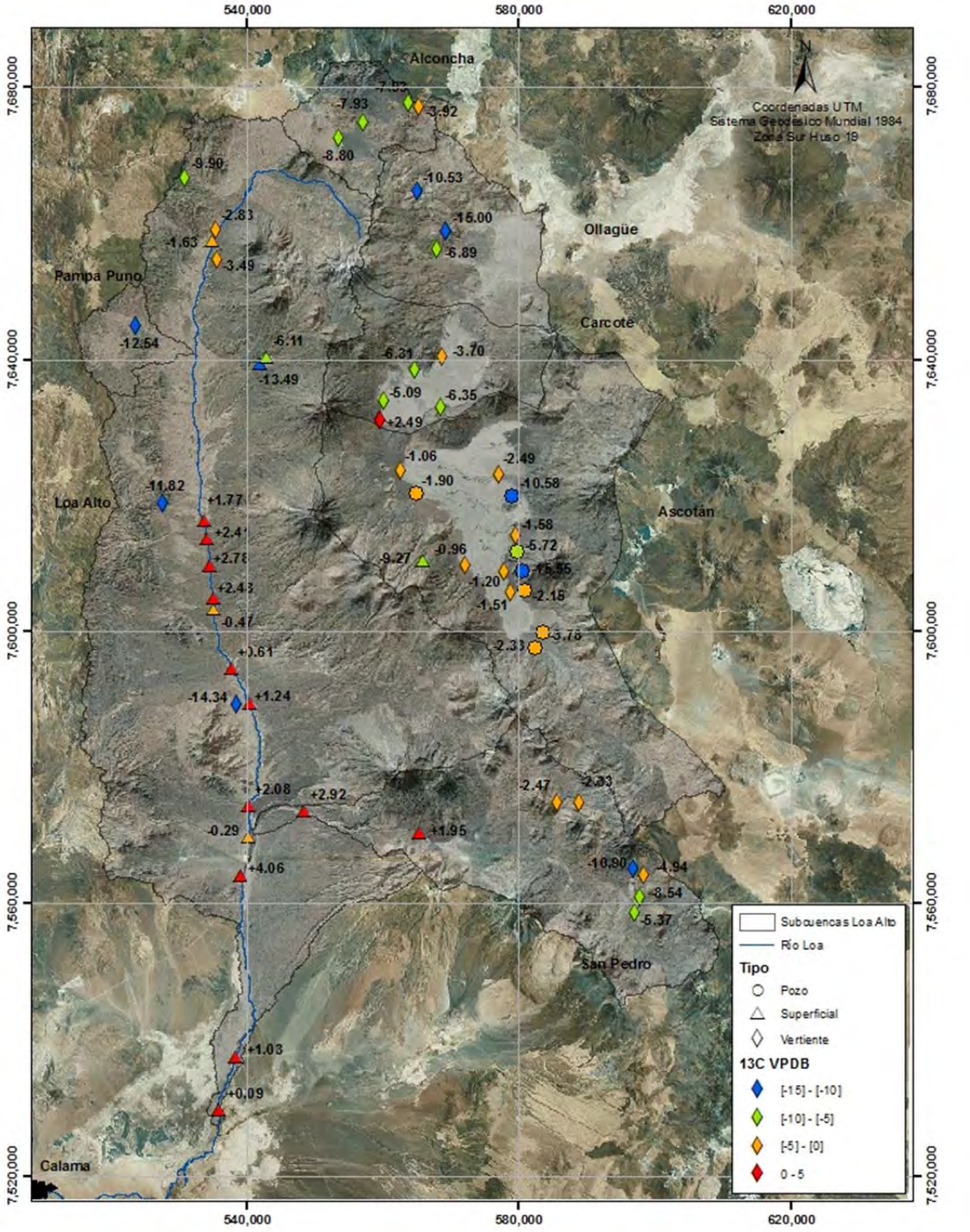


Figura 7-48. Mapa distribución de los valores de $\delta^{13}C$ (VPDB) de las muestras tomadas en la primera campaña de octubre de 2013. Fuente: elaboración propia.

En la **Figura 7-49** se muestra la variación de $\delta^{13}C$ en ‰, cloruros en mg/L, el TAC en mg/L $CaCO^3$ y el calcio en mg/L a lo largo del río Loa. A partir del nacimiento del río (en el km 2) hasta el km 40 no hay datos.

Se puede observar como el perfil de contenido en $\delta^{13}C$ del río Loa tiene 4 tramos marcados.

- Entre el km 0 y 50 aproximadamente el valor de $\delta^{13}C$ crece de -2,83 hasta 2,48 ‰.
- En el siguiente punto (26-LAV), después de la extracción de 550 L/s (quedando en el río 20 L/s aproximadamente), se observa que el valor de $\delta^{13}C$ decrece hasta -0,47 ‰. Hasta pasado el km 80 hay un aumento del contenido en $\delta^{13}C$ hasta alcanzar un valor de 2,08 ‰ en el punto 47-LAS, unos 3 km antes de este puntos se han extraído 300 L/s, quedando aproximadamente unos 150 L/s en el curso del río.
- El siguiente punto de muestreo 31-LAS tiene un valor de $\delta^{13}C$ de -0,29 ‰. El siguiente puntos de muestreo es a la salida del embalse Conchi (32-LAS), y hay un valor de $\delta^{13}C$ de 4,06 ‰.
- A partir de este punto el valor de $\delta^{13}C$ decrece hasta 0,09 ‰.

Los perfiles de Cl^-, TAC y Ca^+ muestran 4 tramos de comportamiento distinto con cambios en puntos próximos al perfil de $\delta^{13}C$.

El perfil de cloruros, al ser conservativo, muestra como varía la salinidad del agua en sus diferentes puntos de muestreo. La concentración de cloruros tienen un comportamiento inverso al $\delta^{13}C$ en el primer tramo disminuyendo su concentración, en los dos siguientes tramos se produce un aumento de concentración hasta la salida del embalse Conchi (32-LAS), a partir de este punto la concentración de cloruros se mantiene prácticamente estable. A partir de la muestra 38-LAS la concentración de cloruros desciende de 445 hasta los 143 mg/L de cloruros. A partir de la extracción de los 550 L/s en la represa Lequena el valor de concentración en cloruros aumenta gradualmente hasta 600 mg/L en la muestra 32-LAS (salida embalse Conchi). A partir de este momento y hasta la muestra 34-LAS (paso del río Loa por Chiu Chiu) se mantiene constante.

El perfil TAC muestra un aumento entre el nacimiento y el punto 44-LAS. Entre este punto y el siguiente se aprecia un descenso de 146 a 12 mg/L de $CaCO_3$. Este

descenso no se refleja en ningún otro perfil representado, ya que si se debiese a una entrada de agua con menor concentración de sales el perfil de cloruros también lo debería mostrar. A partir de la muestra 45-LAS hasta la muestra 26-LAS se produce un aumento de la alcalinidad coincidiendo con la extracción de la práctica totalidad del caudal (550 L/s). Este aumento de alcalinidad puede ser producido por la disolución de CO_2(g) de la descomposición de algas y vegetación de la represa, además de la entrada de agua con mayor concentración en CID. A partir de este punto la alcalinidad se estabiliza hasta la muestra 47-LAS, con valores próximos a 260 mg/L de $CaCO_3$. El mayor valor de alcalinidad se observa en el punto 30-LAS, llegando a 506 meq/L, donde el siguiente punto (salida del embalse Conchi, 94 km) los valores de alcalinidad muestran una bajada progresiva de 372 a 272 mg/L.

El perfil de concentración de calcio se mantiene entre los 87 mg/L en su inicio hasta los 59 mg/L en el km 53. Después de la extracción de los 550 L/s se observa un aumento, progresivo donde se hace más notorio es en la muestra 30-LAS con 186 mg/L de Ca. A partir de este punto la concentración de calcio disminuye hasta los 86 mg/L en la muestra 34-LAS (Chiu Chiu).

En el primer tramo que se sitúa hasta el km 48 y la muestra 25-LAS. Se produce una entrada de agua al río más fresca que el agua del nacimiento del río Loa. En este tramo se ve como el valor de $\delta^{13}C$ aumenta de -1,63 ‰ hasta 2,48 ‰, este aumento es debido al fraccionamiento por equilibrio con el CO_2 de la atmósfera.

En el segundo tramo, después de la extracción de los 550 l/s, quedan aproximadamente 20 L/s en el cauce del río. El valor de $\delta^{13}C$ decrece fuertemente indicando el valor de $\delta^{13}C$ del agua subterránea. Al tener el río un caudal muy pequeño el contenido en $\delta^{13}C$ es más sensible a la variación a la entrada en el cauce agua subterránea con valores negativos, tal y como se observa en los valores de las nacientes del Loa.

A partir de este punto el valor de $\delta^{13}C$ aumenta de igual forma que la concentración en cloruros y en menor forma la concentración en calcio, mientras que la alcalinidad se muestra estable. Esto indica el aumento del valor de $\delta^{13}C$ por el equilibrio del CID con el CO_2 de la atmósfera.

El siguiente descenso de $\delta^{13}C$ se produce coincidiendo con un aumento de alcalinidad y de concentración de calcio notables, mientras que la concentración de cloruros está en

aumento. Este descenso de $\delta^{13}C$ podría ser debido a que la entrada de agua subterránea con mayor alcalinidad provoque la emisión de CO_2, en consecuencia un aumento de pH y que el $\delta^{13}C$ del CID se equilibre entre el $CO_3^{=}$ disuelto con el CO_2 atmosférico.

En la salida del embalse Conchi se observa el valor más alto de $\delta^{13}C$ (4,06 ‰), este podría ser debido al equilibrio del agua del embalse con la formación de calizas de la geología. La formación de carbonatos del embalse tiene un $\delta^{13}C$ de 5,3 ‰ (Aravena y Suzuki, 1990).

El valor de $\delta^{13}C$ desde la salida del embalse hasta Chiu Chiu tiene una disminución progresiva. Esta diminución se explicaría al paso del río Loa por una zona de cultivos agrícolas en los márgenes del río. En esta zona se riegan los cultivos con agua del río y esta vuelve a él por infiltración. El equilibrio del $\delta^{13}C$ del carbono del agua con el $CO_2(g)$ del suelo (con origen vegetal y composición de $\delta^{13}C$ entre -30 y -10 ‰) supondría la disminución del valor de $\delta^{13}C$ hasta 0,09 ‰.

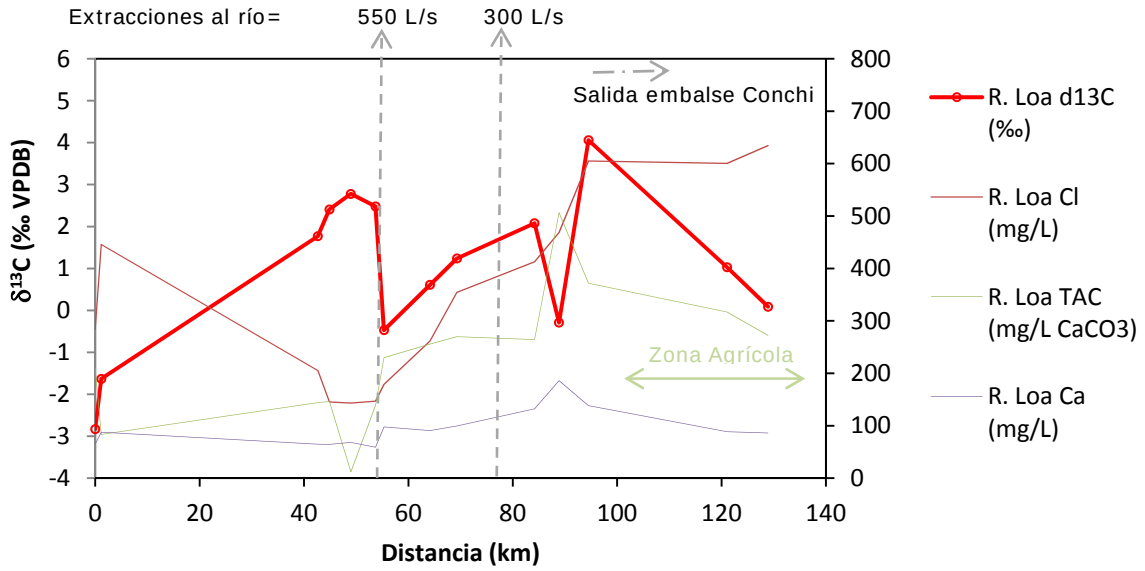


Figura 7-49. Variación de $\delta^{13}C$ (eje principal), cloruros, el TAC y el calcio a lo largo del río Loa. Fuente: elaboración propia.

El agua al infiltrarse en el suelo en un evento de lluvia equilibra su valor de $\delta^{13}C$ de los bicarbonatos con el valor de $\delta^{13}C$ del CO_2 atmosférico. Al tener el agua de infiltración valores de pH entre 5 y 7 se utiliza el coeficiente de fraccionamiento de entre el $CO_{2(g)}$ y el $HCO_{3(aq)}$ de ε=9,0 ‰ a 15ºC. Obteniendo valores de $\delta^{13}C$ de -16,0 ‰ en las aguas de recarga, explicando así los valores de $\delta^{13}C$ de las aguas más frescas. El otro proceso representado en la **Figura 7-49** y mencionado en este capítulo es el del equilibrio con calcita, donde se le aplica un coeficiente de fraccionamiento de ε=2,8 ‰ correspondientes a 15ºC.

7.6 CALIDAD AMBIENTAL DE LAS AGUAS

7.6.1 METALES PESADOS Y BORO

A partir del muestreo químico realizado en la zona de estudio, se han observado concentraciones de Fe, As, B y Al que superan los límites establecidos en normas de calidad de aguas potables. El objetivo de este apartado es verificar las muestras de agua situadas dentro del área de estudio que contengan valores considerados perjudiciales para los usos principales. Además de identificar las áreas donde se presentan esta problemática.

La forma en la que se ha representado cada uno de ellos es mediante un mapa en el que se ha distinguido por colores en base a diferentes rangos de concentración. Se han comparado los calores de Fe y el As en relación con la Norma Chilena de agua potable *NCh 409/1 of. (2005)*; mientras que el Al y el B, se comparan con la Norma de calidad del agua potable de la *OMS (2008).* Los colores verdes indican concentraciones de estos metales que no sobrepasan la normativa comparada. La forma del símbolo es función de si la muestra de agua se ha tomado en una vertiente, en un pozo o si se trata de muestra de agua superficial.

Se han muestreado un total de 60 puntos de agua, de los cuales 34 corresponden a vertientes, 7 a pozos y 19 a aguas superficiales. Estos puntos se encuentran distribuidos homogéneamente a lo largo de la zona de estudio, que comprende las cuencas de Alconcha, Ollagüe, Carcote, Ascotán, Pampa Puno, río San Pedro y río Loa.

Primera Campaña

En los siguientes subsecciones se analiza la distribución de las concentraciones de los 4 elementos (Fe, As, Al, B) durante la primera campaña de terreno (octubre 2013).

Concentración de Fe en la primera campaña de muestreo.

En la **Figura 7-50** se muestra el mapa de la zona de estudio con los valores de las concentraciones de Fe. El color verde indica que el valor es inferior a 0,3 mg/L que es el límite establecido por la *NCh 409/1 of. (2005)*, mientras que los colores naranja y rojo indican que se supera dicho valor.

En la subcuenca de Alconcha se tomaron 5 muestras que corresponden a vertientes, de las cuales la 36-LAV tiene una concentración de 0,58 mg/L, por lo que supera el límite establecido en la *NCh 409/1 of. (2005).*

En la subcuenca de Ollagüe las 3 vertientes muestreadas presentan concentraciones de Fe inferiores a 0,3 mg/L.

En la subcuenca de Carcote la muestra 17-LAV tiene una concentración en Fe de 0,34 mg/L, las restantes 4 muestras tomadas en dicha cuenca están representadas de color verde, por lo que su concentración en Fe es compatible con el uso para agua potable. Todas las muestras son de vertientes.

En la subcuenca de Ascotán, se tomaron 7 muestras en vertientes, 7 en pozos y una muestra de agua superficial. Los pozos 1-LAP, 10-LAP, 11-LAP y 12 LAP tienen una concentración de 4,21 mg/L, 11,4 mg/L, 6,49 mg/L y 4,82 mg/L respectivamente, estos valores están por encima del valor que marca la *NCh 409/1 of. (2005).* El resto de muestras tomadas en esta cuenca no superan los 0,3 mg/L.

En la subcuenca de San Pedro, se tomaron 7 muestras de vertientes y 2 de aguas superficiales. Los puntos 52-LAV y 54-LAV (vertientes), presentan valores de 0,32 mg/L y 5,79 mg/L. El resto de muestras presentan valores inferiores a lo establecido en la norma.

La muestra 42-LAV es la única muestra tomada en la cuenca de Pampa Puno y presenta una concentración de 0,42 mg/L, se representa de color naranja y está por encima del valor de la Norma Chilena de agua potable.

En la cuenca del Loa hay 15 muestras de aguas superficiales, de las cuales la 47-LAS, 32-LAS y 33-LAS, superan el límite de concentración de Fe, alcanzando los 0,83 mg/L en la muestra 47-LAS. En relación con las muestras de vertientes, la 37-LAV y 59-LAV, superan los 0,3 mg/L.

Estas muestras se ubican a lo largo de toda la cuenca del río Loa, desde la cabecera, hasta la zona de cierre de la cuenca.

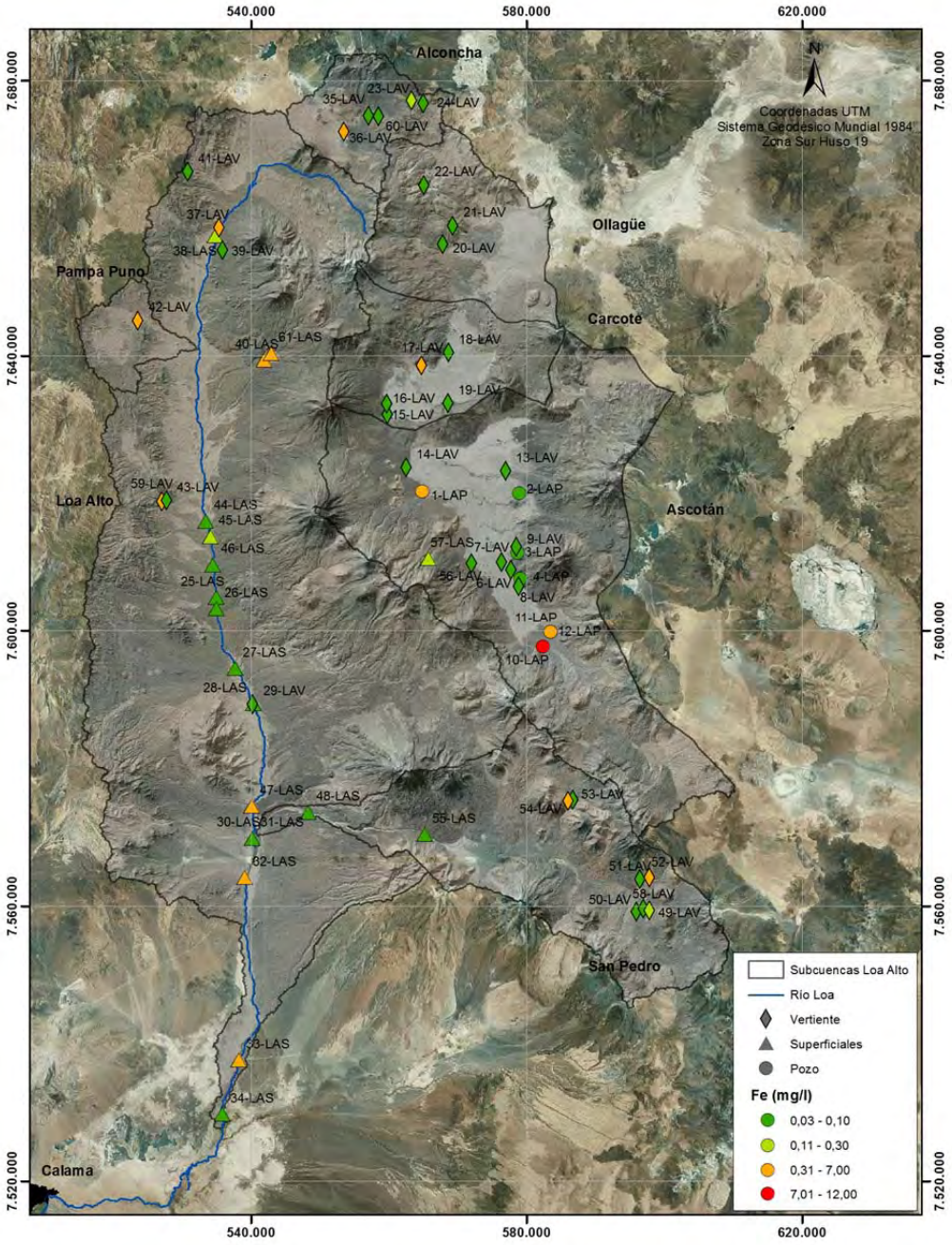


Figura 7-50. Mapa que muestra la concentración de Fe en los puntos de muestreo de la primera campaña de terreno (octubre, 2013). Los puntos están diferenciados en función si son vertientes, aguas superficiales y pozos. Los colores en verde indican que la concentración de Fe cumple el límite establecido en la *NCh 409/1 of.2005,* los colores naranja y rojo superan dicho valor. Fuente: elaboración propia.

Concentración de As en la primera campaña de muestreo.

En la **Figura7-51**, se muestra el mapa con las concentraciones de As de las aguas en los puntos muestreados durante la primera campaña de terreno, realizada en octubre de 2013. Los puntos que están representados de color verde son los que tienen un valor de concentración de As inferior al límite establecido en la *NCh 409/1 of.2005*, el cual corresponde a 0,01 mg/L. Los puntos de color naranja y rojo sobrepasan el valor recomendado en dicha norma.

En la subcuenca de Alconcha se tomaron 5 muestras que corresponden a vertientes, de las cuales la 35-LAV, 60-LAV y 24-LAV tienen una concentración de 0,017 mg/L, 0,0151 mg/L y 0,0216 mg/L respectivamente, por lo que superan el límite establecido en la *NCh 409/1 of. (2005).*

En la subcuenca de Ollagüe las 3 vertientes muestreadas presentan concentraciones de As inferiores a 0,01 mg/L.

En la subcuenca de Carcote se tomaron 5 muestras de vertientes, las cuales superan el límite de concentración de As en las aguas, establecido en la *NCh 409/1 of. (2005)*, y se sitúan dentro del rango comprendido entre 0,011-0,5 mg/L.

En la subcuenca de Ascotán, se tomaron 7 muestras en pozos, 7 en vertientes y una muestra de agua superficial. Los pozos 1-LAP, 3-LAP y 10-LAP tienen una concentración que supera el límite que marca la *NCh 409/1 of. 2005,* destacando el pozo 10-LAP con una concentración de 0,646 mg/L de As, que es la concentración más elevada de As de todos los puntos muestreados en la zona de estudio. En relación con las vertientes, los puntos 14-LAV, 9-LAV, 56-LAV y 8 LAV presentan valores comprendidos entre 0,011-0,5 mg/L, por lo que están por encima del límite del As. El resto de muestras tomadas en esta cuenca de Ascotán no superan los 0,01 mg/L.

En la subcuenca de San Pedro, se tomaron 7 muestras de vertientes y 2 de aguas superficiales. Los puntos 52-LAV, 53-LAV y 58-LAV (vertientes), presentan valores comprendidos entre 0,011-0,5 mg/L. En cuanto a las muestras de aguas superficiales, los puntos 56-LAS y 48-LAS, se encuentran en el rango anterior, por lo que se sitúan por encima del límite del As.

La muestra 42-LAV es la única muestra tomada en la subcuenca de Pampa Puno y presenta una concentración de 0,0123 mg/L, se representa de color naranja y está por encima del valor de la Norma Chilena de agua potable.

En la subcuenca del Loa hay 15 muestras de aguas superficiales, de las que la 38-LAS, 44-LAS, 45-LAS, 26-LAS, 28-LAS, 47-LAS, 31-LAS y 34-LAS, superan el límite de concentración de As, alcanzando valores comprendidos entre 0,011-0,5 mg/L. En cuanto a las 5 muestras tomadas en vertientes, la 37-LAV, 39-LAV y 43-LAV, se sitúan en el rango definido anteriormente, por lo que superan los 0,01 mg/L de As permitido por la normativa.

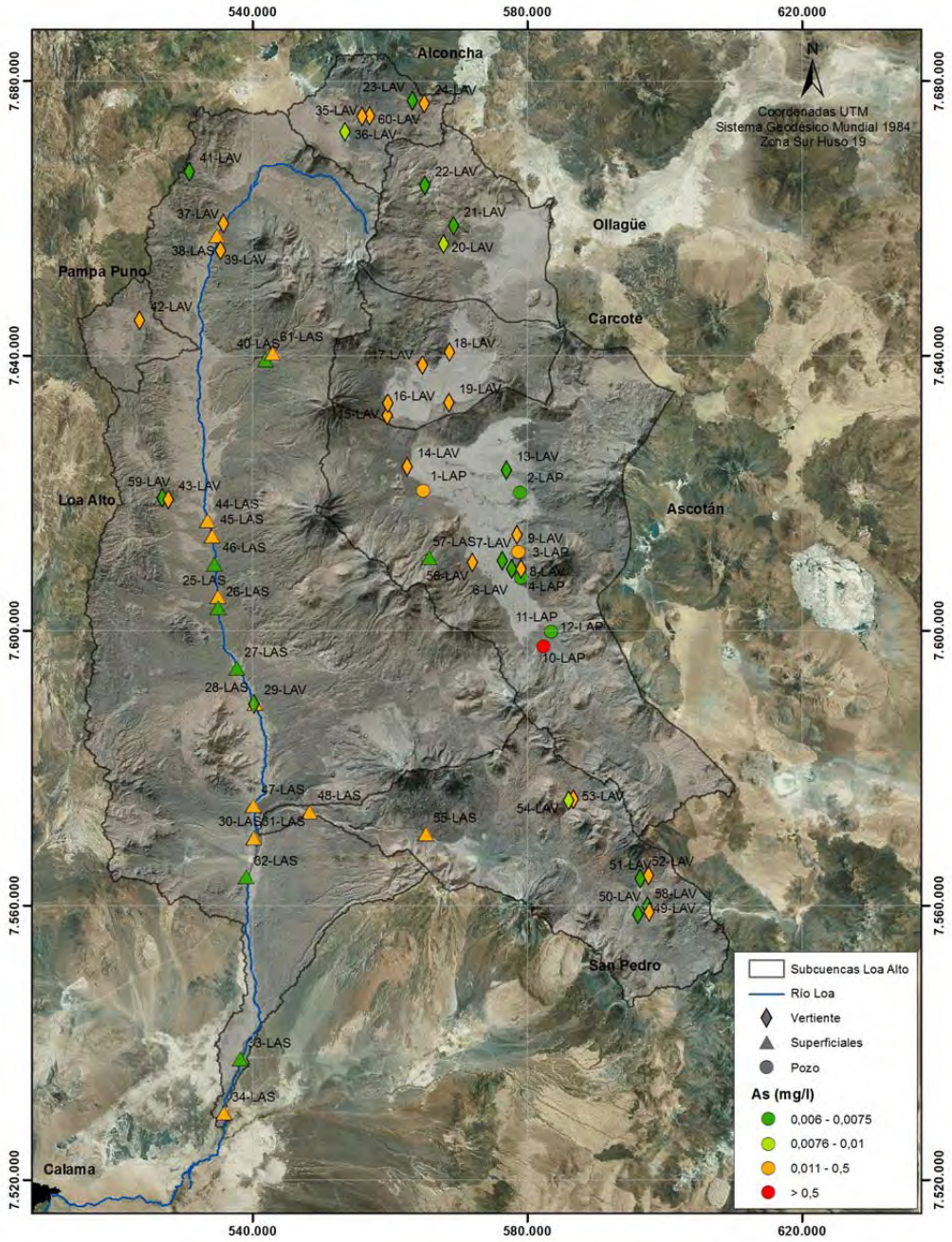


Figura 7-51. Mapa que muestra la concentración de As en los puntos de muestreo de la primera campaña de terreno (octubre 2013). Los puntos están diferenciados en función si son vertientes, aguas superficiales y pozos. Los colores en verde indican que la concentración de As cumple el límite establecido en la *NCh 409/1 of.2005,* los colores naranja y rojo superan dicho valor. Fuente: elaboración propia.

Concentración de Al en la primera campaña de muestreo.

En la **Figura7-52**, se muestran las concentraciones de Al en la zona de estudio. Los puntos de muestreo representados de color verde, indican que su concentración en Al no supera el límite de 0,2 mg/L, establecido por la *OMS (2008)* en su guía para la calidad del agua potable. Los colores naranja y rojo indican que superan el valor establecido por la *OMS (2008).*

En la subcuenca de Alconcha se tomaron 5 muestras que corresponden a vertientes, de las cuales la 23-LAV tiene una concentración de 43,34 mg/L, y corresponde con el valor más elevado de Al de todos los puntos muestreados en la zona de estudio. Las muestras 35-LAV y 36-LAV superan el límite establecido en la Guía para la calidad del agua potable de *OMS (2008)* para el Al.

En la subcuenca de Ollagüe las 3 vertientes muestreadas presentan concentraciones de Al inferiores a 0,2 mg/L.

En la subcuenca de Carcote se tomaron 5 muestras de vertientes, las cuales superan el límite de concentración de Al en las aguas establecido en la *OMS (2008)*, y se sitúan dentro del rango comprendido entre 0,2-1 mg/L.

En la subcuenca de Ascotán, se tomaron 7 muestras en pozos, 7 en vertientes y una muestra de agua superficial. De todas ellas, sólo las muestras 11-LAP y 12-LAP, tomadas en pozos, muestras valores de 0,72 y 0,25 mg/L respectivamente, los cuales superan el límite de 0,2 mg/L de Al. El resto de muestras presentan concentraciones inferiores a los 0,2 mg/L.

En la subcuenca de San Pedro, tanto las muestras de vertientes como las muestras de aguas superficiales presentan una concentración de Al inferior al límite establecido por la *OMS (2008).*

La muestra 42-LAV, tomada en la subcuenca de Pampa Puno, presenta una concentración de 0,38 mg/L, y se representa de color naranja.

En la subcuenca del río Loa, 2 muestras de vertientes (41-LAV y 39-LAV) presentan valores de concentración de Al comprendidos entre 0,211-1 mg/L. En cuanto a las aguas superficiales, las muestras 38-LAS, 40-LAS, 61-LAS, 28-LAS, 62-LAS, 33-LAS y 32-LAS, también se ubican en ese rango de valores, por lo que se sitúan por encima del valor permitido para su uso como aguas potables.

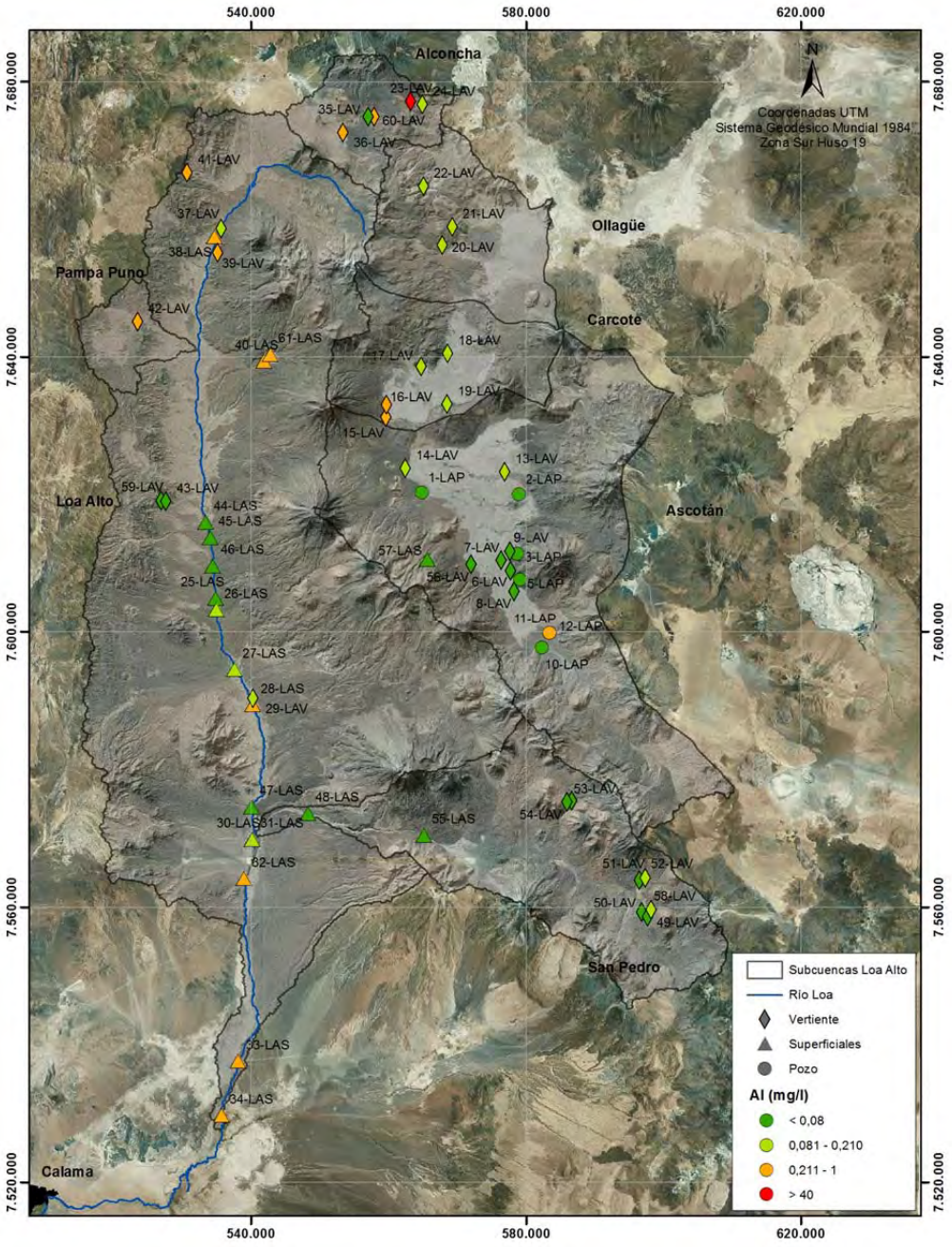


Figura 7-52. Mapa que muestra la concentración de Al en los puntos de muestreo de la primera campaña de terreno (octubre 2013). Los puntos están diferenciados en función si son vertientes, aguas superficiales y pozos. Los colores en verde indican que la concentración de Al cumple el límite establecido en la *OMS (2008),* los colores naranja y rojo superan dicho valor. Fuente: elaboración propia.

Concentración de B en la primera campaña de muestreo.

En relación con el B, prácticamente la totalidad de las muestras de agua analizadas presentan valores superiores a 0,05 mg/L, que corresponde con el límite establecido por la *OMS (2008)* para aguas potables (**Figura 7-53**).

En la subcuenca de Alconcha y Ollagüe se tomaron 5 y 3 muestras de vertiente respectivamente. Todas ellas presentan valores comprendidos entre 0,05-25 mg/L, por lo que superan el límite establecido en la Guía para agua potable de la *OMS (2008).*

En la subcuenca de Carcote, las muestras de vertiente 19-LAV, 17-LAV y 16-LAV, presentan valores de B de 43,5 mg/L, 53 mg/L y 63,8 mg/L respectivamente. Las otras dos muestras, tienen valores comprendidos entre 0,05-25 mg/L. Este sector de la zona de estudio, es el que presenta valores más altos en relación con el B.

En la subcuenca de Ascotán las aguas del pozo 10–LAP tiene una concentración de B de 48,8 mg/L. En los pozos 11-LAP y 12-LAP, y en las muestras tomadas en las vertientes, las aguas tienen valores de B comprendidos entre 0,05-25 mg/L, por lo que están representados de color naranja.

En la subcuenca del río San Pedro, Pampa Puno y río Loa, tanto las muestras de vertientes como las de aguas superficiales, presentan valores de B que superan los 0,05 mg/L. Están representados de color naranja, ya que sus valores se sitúan en el rango de 0,05-25 mg/L.

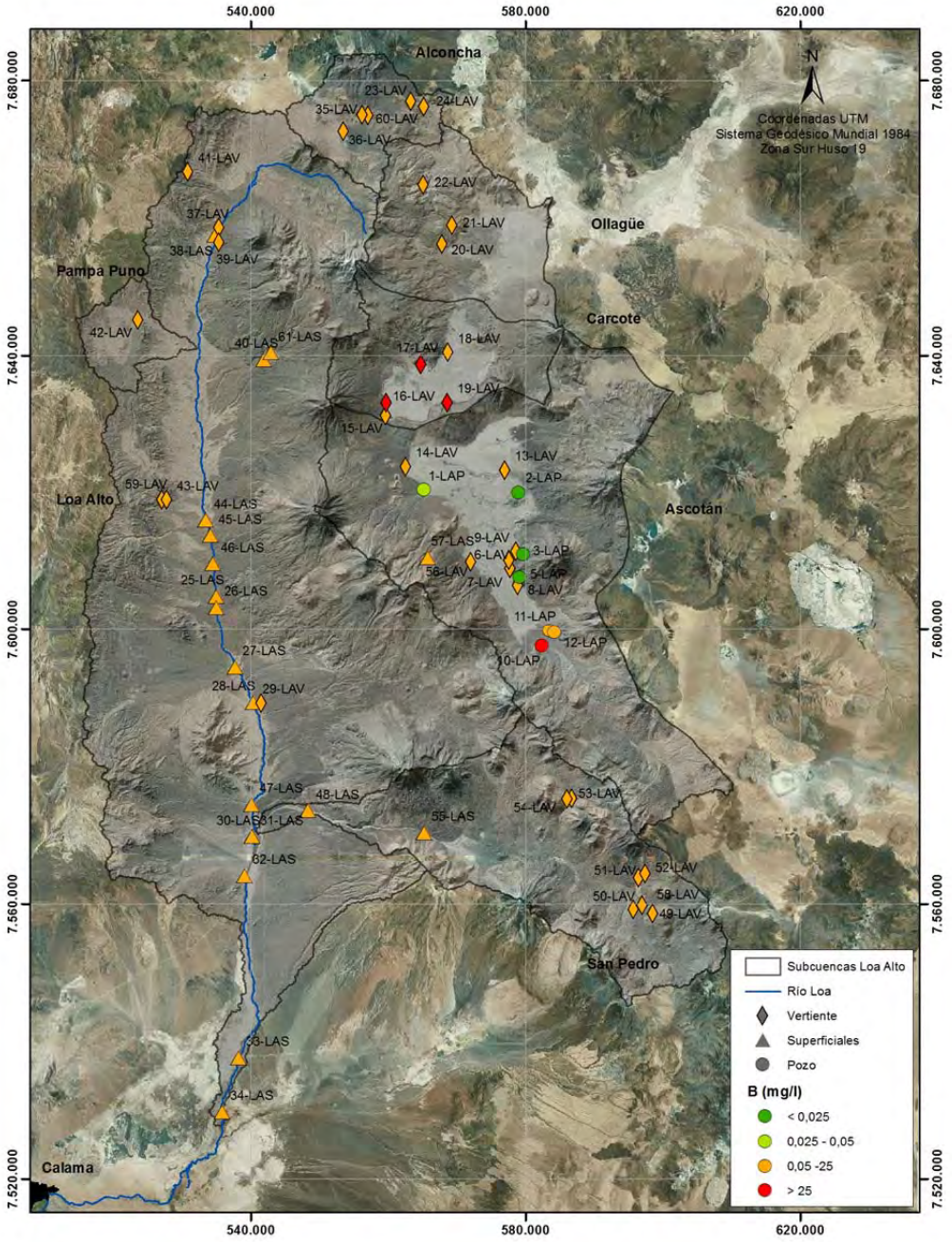


Figura 7-53. Mapa que muestra la concentración de B en los puntos de muestreo de la primera campaña de terreno (octubre, 2013). Los puntos están diferenciados en función si son vertientes, aguas superficiales y pozos. Los colores en verde indican que la concentración de B cumple el límite establecido en la *OMS, 2008,* los colores naranja y rojo superan dicho valor. Fuente: elaboración propia.

Segunda campaña

En los siguientes subapartados se analiza la distribución de las concentraciones de los 4 elementos (Fe, As, Al, B) durante la segunda campaña de terreno (diciembre 2013).

Concentración de Fe en la segunda campaña de muestreo.

En la **Figura 7-54**, se muestra el mapa de la zona de estudio con los valores de las concentraciones de Fe. El color verde indica que el valor es inferior a 0,3 mg/L que es el límite establecido por la *NCh 409/1 of. (2005)*, mientras que los colores naranja y rojo indican que se supera dicho valor.

En la subcuenca de Alconcha se tomaron 5 muestras que corresponden a vertientes, de las cuales la 23-LAV2 tiene una concentración de 0,54 mg/L, por lo que supera el límite establecido en la *NCh 409/1 of. (2005).*

En la subcuenca de Ollagüe las 3 vertientes muestreadas presentan concentraciones de Fe inferiores a 0,3 mg/L.

En la subcuenca de Carcote las 5 muestras tienen una concentración en Fe inferior a lo establecido por la norma. Por tanto, todas ellas quedan representadas en color verde. Todas las muestras en esta cuenca fueron tomadas en vertientes.

En la subcuenca de Ascotán, se tomaron 4 muestras en vertientes, 5 en pozos y una muestra de agua superficial. En este caso todas las muestras tomadas se encuentran por debajo de los 0,3 mg/L.

En la subcuenca de San Pedro, se tomaron 5 muestras de vertientes y 2 de aguas superficiales. Todas las muestras presentan valores inferiores a lo establecido en la norma.

La muestra 42-LAV es la única muestra tomada en la subcuenca de Pampa Puno y presenta una concentración menor a la de la primera campaña, se representa de color verde y está por debajo del valor de la Norma Chilena de agua potable.

En la subcuenca del Loa hay 21 muestras de aguas superficiales, de las cuales ninguna supera el límite de concentración de Fe. Se tomaron también muestras en 7 vertientes, de las cuales solo la muestra 39-LAV2 supera el límite de la norma con un valor de 16 mg/L. El único pozo muestreado en la cuenca del Loa(72-LAP2), también supera la normativa con un valor de 2,04 mg/L.

Estas muestras se ubican a lo largo de toda la cuenca del río Loa, desde la cabecera, hasta la zona de cierre de la cuenca.

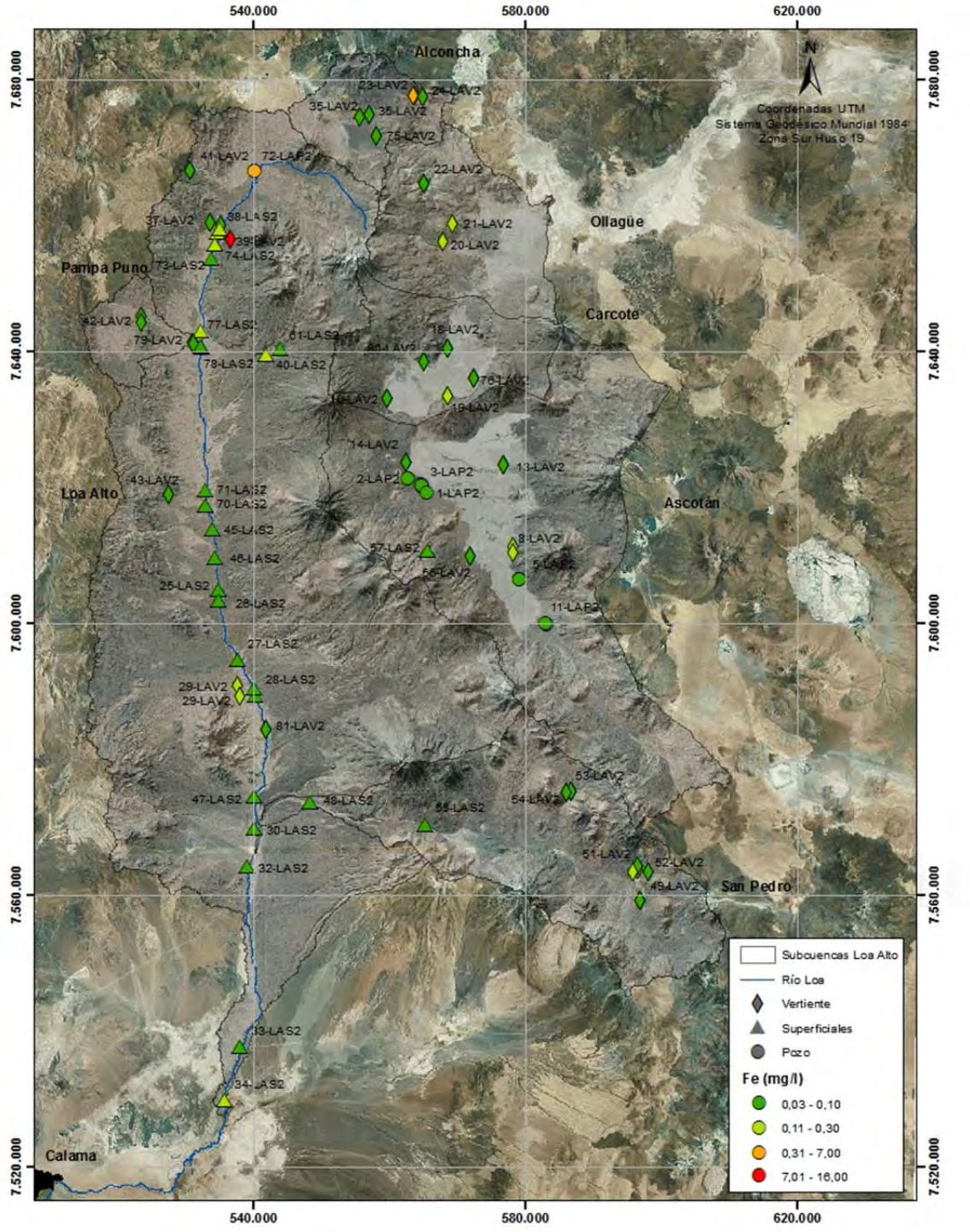


Figura 7-54. Mapa que muestra la concentración de Fe en los puntos de muestreo de la segunda campaña de terreno (diciembre, 2013). Los puntos están diferenciados en función si son vertientes, aguas superficiales y pozos. Los colores en verde indican que la concentración de Fe cumple el límite establecido en la *NCh 409/1 of.2005,* los colores naranja y rojo superan dicho valor. Fuente: elaboración propia.

Concentración de As en la segunda campaña de muestreo.

En la **Figura 7-55**, se muestra el mapa con las concentraciones de As de las aguas en los puntos muestreados durante la segunda campaña de terreno, realizada en diciembre de 2013. Los puntos que están representados de color verde son los que tienen un valor de concentración de As inferior al límite establecido en la *NCh 409/1 of.2005*, el cual corresponde a 0,01 mg/L. Los puntos de color naranja y rojo sobrepasan el valor recomendado en dicha norma.

En la subcuenca de Alconcha se tomaron 5 muestras que corresponden a vertientes, las cuales no superan el límite establecido en la *NCh 409/1 of. (2005).*

En la subcuenca de Ollagüe las 3 vertientes muestreadas presentan concentraciones de As inferiores a 0,01 mg/L.

En la subcuenca de Carcote se tomaron 5 muestras de vertientes, las cuales superan el límite de concentración de As en las aguas, establecido en la *NCh 409/1 of. (2005)*, y se sitúan dentro del rango comprendido entre 0,0159-0,02845 mg/L.

En la subcuenca de Ascotán, se tomaron 5 muestras en pozos, 4 en vertientes y una muestra de agua superficial. Los pozos 5-LAP2 y 8-LAP2 tienen una concentración que supera el límite que marca la *NCh 409/1 of. 2005,* destacando el pozo 8-LAP2 con una concentración de 0,1037 mg/L,. En relación con las vertientes, los puntos 13-LAV2 y 56-LAV2,presentan valores cercanos a 0,14 mg/L, por lo que están por encima del límite del As. La muestra tomada de manera superficial también supera los valores permitidos con 0,0143 mg/L. El resto de muestras tomadas en esta subcuenca de Ascotán no superan los 0,01 mg/L.

En la subcuenca de San Pedro, se tomaron 5 muestras de vertientes y 2 de aguas superficiales. Los puntos 53-LAV2 Y 49-LAV2 (vertientes), presentan valores de 0,0101 mg/L y 0,0726 mg/L correspondientemente. En cuanto a las muestras de aguas superficiales, los puntos 55-LAS2 y 48-LAS2, presentan valores de 0,0162 y 0,0266, ambas por encima del límite permitido.

La muestra 42-LAV2 es la única muestra tomada en la subcuenca de Pampa Puno y presenta una concentración menor a 0,006 mg/L de As, se representa de color verde y está por debajo del valor de la Norma Chilena de agua potable.

En la cuenca del Loa hay 21 muestras de aguas superficiales, de las que la 45-LAS2, 46-LAS2, 25-LAS2, 26-LAS, 27 LAS2, 28-LAS2, 47-LAS2, 30-LAS2 , 32-LAS2, 33-LAS2 34-LAS2, 38-LAS2, 74-LAS2, 73-LAS2, 78-LAS2, 71-LAS2 y 70-LAS2 superan el límite

de concentración de As, alcanzando valores comprendidos entre 0,0123-0,027 mg/L. En cuanto a las 5 muestras tomadas en vertientes, tan solo dos de ellas superan el límite, 77-LAV2 y 39-LAV2 con valores de 0,0249 y 0,0209 mg/L.

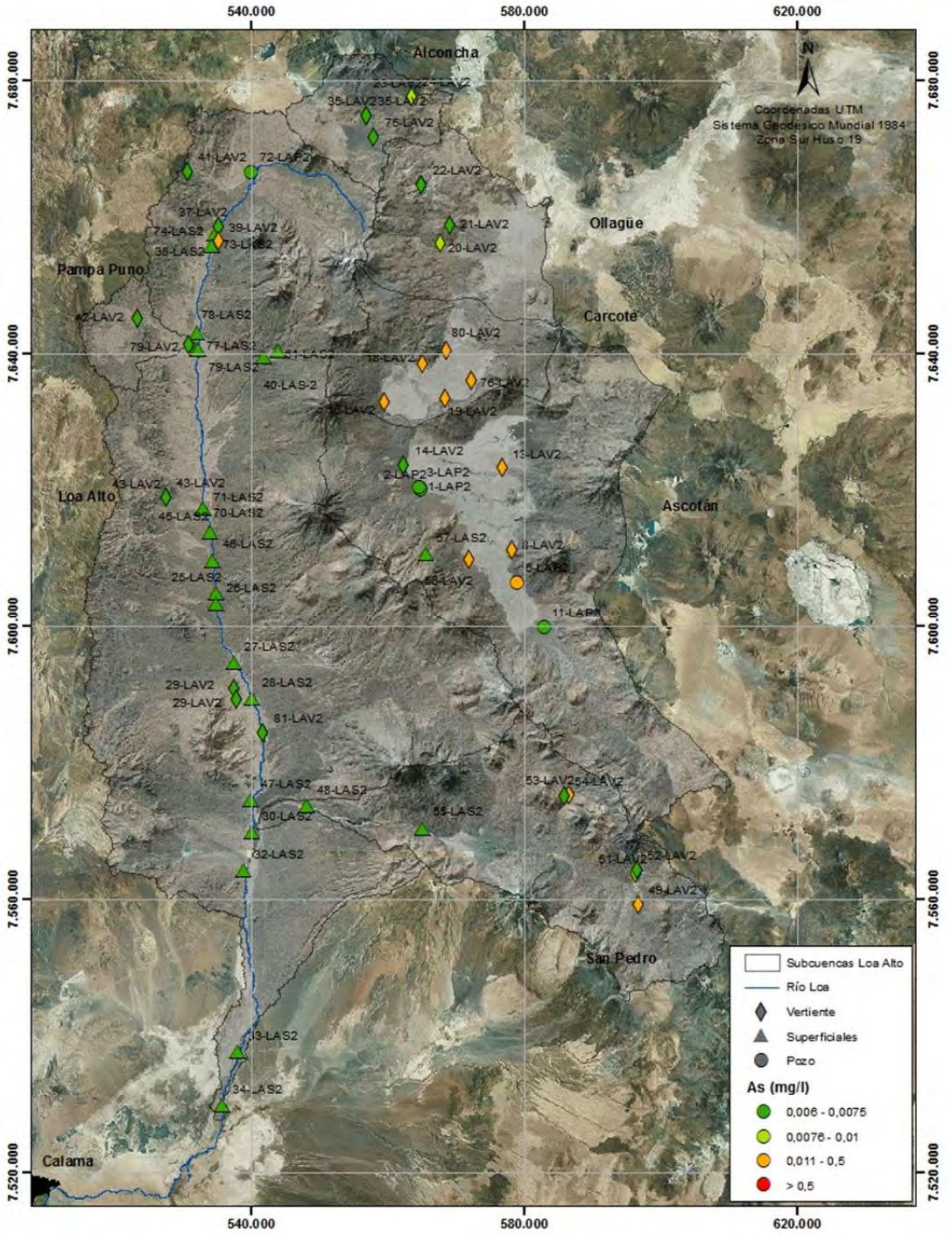


Figura 7-55. Mapa que muestra la concentración de As en los puntos de muestreo de la segunda campaña de terreno (diciembre, 2013). Los puntos están diferenciados en función si son vertientes, aguas superficiales y pozos. Los colores en verde indican que la concentración de As cumple el límite establecido en la *NCh 409/1 of.2005,* los colores naranja y rojo superan dicho valor. Fuente: elaboración propia.

Concentración de Al en la segunda campaña de muestreo.

En la **Figura 7-56**, se muestran las concentraciones de Al en la zona de estudio. Los puntos de muestreo representados de color verde, indican que su concentración en Al no supera el límite de 0,2 mg/L, establecido por la *OMS (2008)* en su guía para la calidad del agua potable. Los colores naranja y rojo indican que superan el valor establecido por la *OMS (2008).*

En la subcuenca de Alconcha se tomaron 5 muestras que corresponden a vertientes, de las cuales la 23-LAV2 tiene una concentración de 27,9 mg/L, y corresponde con el valor más elevado de Al de todos los puntos muestreados en la zona de estudio. El resto de las muestras no superan el límite establecido en la Guía para la calidad del agua potable de *OMS (2008)* para el Al.

En la subcuenca de Ollagüe las 3 vertientes muestreadas presentan concentraciones de Al inferiores a 0,2 mg/L.

En la subcuenca de Carcote se tomaron 5 muestras de vertientes, las cuales tampoco superan el límite de concentración de Al en las aguas establecido en la *OMS (2008)*.

En la subcuenca de Ascotán, se tomaron 5 muestras en pozos, 4 en vertientes y una muestra de agua superficial. En esta campaña ninguna de ellas superan los 0,2 mg/L establecidos para aguas potables.

En la subcuenca de San Pedro, tanto las muestras de vertientes como las muestras de aguas superficiales presentan una concentración de Al inferior al límite establecido por la *OMS (2008).*

La muestra 42-LAV2, tomada en la ubcuenca de Pampa Puno, no muestra concentraciones altas de Al en esta campaña.

En la subcuenca del río Loa, se muestrearon 7 vertientes las cuales mostraron valores bajos para el Al. Además se muestrearon 21 aguas superficiales a lo largo de toda la cuenca donde la muestra 71-LAS2 mostró valores superiores al 0,2 establecido (0,24 mg/L). El único pozo muestreado en contiene 5,28mg/L de Al, lo que está muy por encima de lo establecido por la *OMS (2008)*

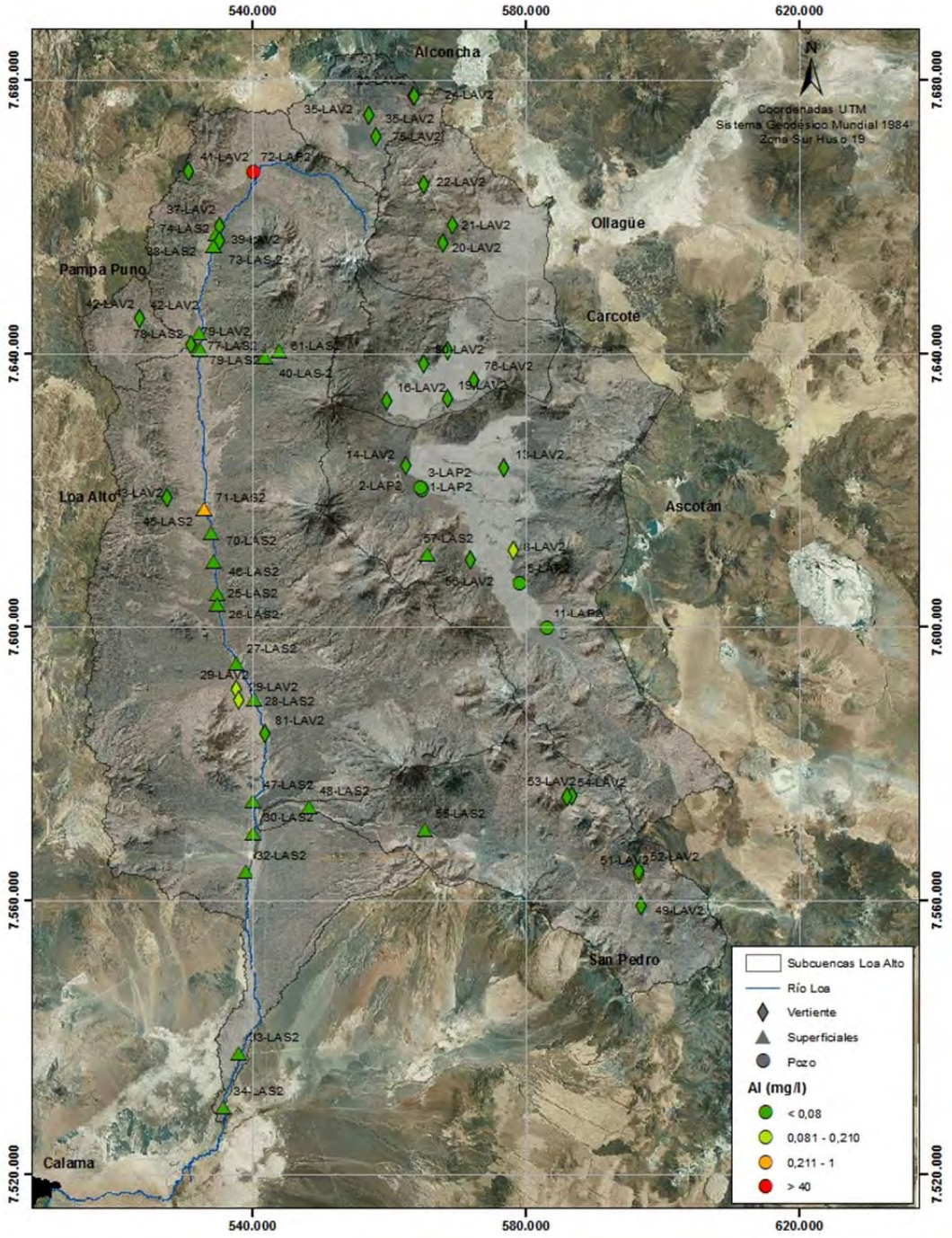


Figura 7-56. Mapa que muestra la concentración de Al en los puntos de muestreo de la segunda campaña de terreno (diciembre, 2013). Los puntos están diferenciados en función si son vertientes, aguas superficiales y pozos. Los colores en verde indican que la concentración de Al cumple el límite establecido en la *OMS, 2008,* los colores naranja y rojo superan dicho valor. Fuente: elaboración propia.

Concentración de B en la segunda campaña de muestreo.

En relación con el B, prácticamente la totalidad de las muestras de agua analizadas presentan valores superiores a 0,05 mg/L, que corresponde con el límite establecido por la *OMS, 2008,* para aguas potables (**Figura 7-57**).

En la subcuenca de Alconcha y Ollagüe se tomaron 5 y 3 muestras de vertiente respectivamente. Todas ellas presentan valores comprendidos entre 0,05-25 mg/L, por lo que superan el límite establecido en la Guía para agua potable de la *OMS (2008).*

En la subcuenca de Carcote, las muestras de vertiente 80-LAV2 y 16-LAV2, presentan valores de B de 47,5 mg/L y 38,1 mg/L respectivamente. Las otras tres muestras, tienen valores comprendidos entre 0,05-25 mg/L. Este sector de la zona de estudio, es el que presenta valores más altos en relación con el B.

En la subcuenca de Ascotán salvo la muestra 56-LAV2, todas muestran valores comprendidos entre 0,05 y 25 mg/L y por tanto quedan representadas en color naranja. La muestra 56-LAV2 es de color verde, y por tanto esta dentro de los límites establecidos.

En la subcuenca de San Pedro, salvo la muestra 52-LAV2 que sí tiene niveles aceptables de B, todas las demás son de color naranja no son aptas para aguas potables.

En las subcuencas Pampa Puno y río Loa, tanto las muestras de vertientes como las de aguas superficiales, presentan valores de B que superan los 0,05 mg/L. Están representados de color naranja, ya que sus valores se sitúan en el rango de 0,05-25 mg/L.

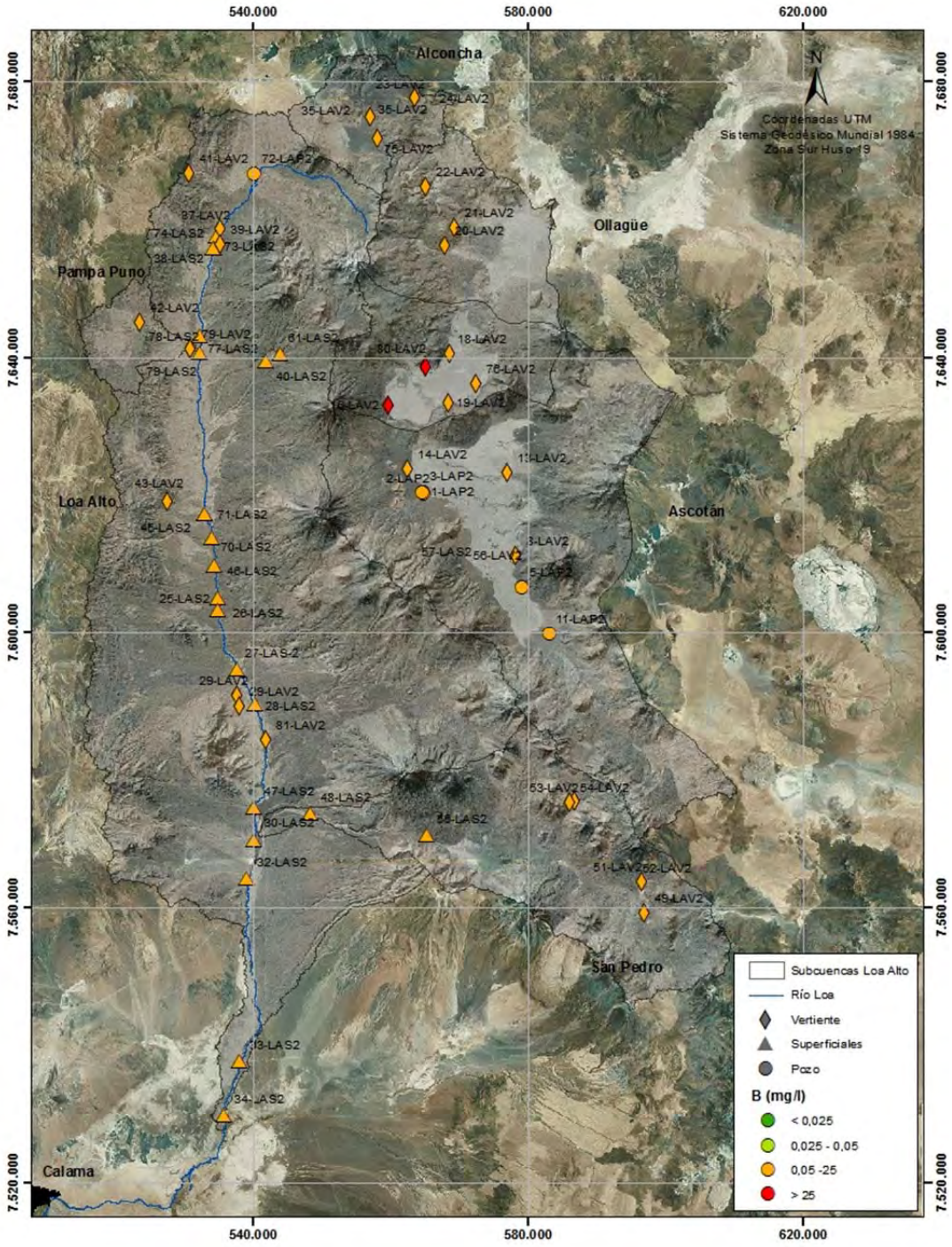


Figura 7-57. Mapa que muestra la concentración de B en los puntos de muestreo de la segunda campaña de terreno (diciembre, 2013). Los puntos están diferenciados en función si son vertientes, aguas superficiales y pozos. Los colores en verde indican que la concentración de B cumple el límite establecido en la *OMS, 2008,* los colores naranja y rojo superan dicho valor. Fuente: elaboración propia.

7.6.2 CLASIFICACIÓN CALIDAD AGUAS CONAMA

Se clasifican las aguas del territorio con el objetivo de poder averiguar los distintos usos que se podrían dar a las aguas de la zona de estudio.

Para la clasificación de las aguas según su calidad se ha utilizado la "Guía CONAMA" (CONAMA, 2004) para el establecimiento de las normas secundarias de calidad ambiental para aguas continentales superficiales" (diciembre 2004).

En este caso se ha utilizado la clasificación para la protección de las aguas continentales superficiales, aunque los análisis disponibles son tanto de aguas superficiales como de pozos y vertientes.

Los parámetros obligatorios para esta clasificación son 9: conductividad eléctrica, Demanda Biológico de Oxígeno (DBO), color aparente, oxígeno disuelto, pH, Relación de Absorción del Sodio (RAS), sólidos disueltos, sólidos suspendidos y temperatura.

Al no disponer de todos los resultados analíticos utilizados en la guía CONAMA (CONAMA, 2004) y dado que no se encuentra dentro de los objetivos principales de este estudio la contaminación por compuestos orgánicos, se utilizaron como parámetros obligatorios conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, pH y sólidos disueltos. La temperatura no se consideró porque en la clasificación se utiliza la diferencia de temperaturas entre la zona analizada y la temperatura natural del agua. Todas las muestras recogidas en la campaña son de origen natural por lo que la diferencia de temperatura seria en todas ellas igual a cero y por tanto todas ellas entrarían en la Clase de excepción. Por ello, no se consideró relevante para la clasificación.

Los elementos principales fueron seleccionados según el método utilizado en el informe de CADE-IDEPE (CADE-IDEPE, 2004). Se compara el valor que aparece en el instructivo como límite de la clase 0 (o clase de excepción), con el valor máximo que alcanza el parámetro incluyendo todos los registros de la base de datos. Todos los parámetros que tienen valores sobre el límite de la Clase 0 son seleccionados como parámetros principales.

Como resultado del análisis anteriormente nombrado los parámetros utilizados fueron los nombrados en la **Tabla 7-29**. Es importante mencionar que los análisis disponibles no se hallaban ningún dato orgánico, y solamente se encontraban algunos de los metales. En este caso son todos los parámetros que aparecen en el instructivo y en los análisis.

A continuación se presentan los parámetros y sus límites para la clasificación.

	GRUPO DE ELEMENTOS O COMPUESTOS	UNIDAD	CLASE DE EXCEPCIÓN	CLASE 1	CLASE 2	CLASE 3
INDICADORES FÍSICOS Y QUÍMICOS						
1	Conductividad Eléctrica	µS/cm	<600	750	1.500	2.250
2	Oxígeno Disuelto	mg/L	>7,5	7,5	5,5	5
3	pH	Rango	6,5-8,5	6,5-8,5	6,5-8,5	6,5-8,5
4	Sólidos disueltos	mg/L	<400	500	1.00	1.500
INORGÁNICOS						
5	Cloruro	mg/L	<80	100	150	200
6	Sulfato	mg/L	<120	150	500	1.00
METALES ESENCIALES DISUELTOS						
7	Boro	mg/L	<0,4	0,5	0,75	0,75
8	Hierro	mg/L	<0,8	1	5	5
METALES ESENCIALES NO DISUELTOS						
9	Aluminio	mg/L	<0,07	0,09	0,1	5
10	Arsénico	mg/L	<0,04	0,05	0,1	0,1

Tabla 7-29. Los valores máximos y mínimos aquí representados están referidos a concentraciones, rangos o unidades totales respecto a los elementos o compuestos que corresponda. Todos los que excedan la clase 3 permanecerán a la Clase 4. Fuente: Guía CONAMA.

Descripción de cada clase según CONAMA:

Clase de Excepción: indica un agua de mejor calidad que la Clase 1, que por su extraordinaria pureza y escasez, forma parte única del patrimonio ambiental de la República.

Clase 1: agua de muy buena calidad. Indica un agua adecuada para la protección y conservación de las comunidades acuáticas, para riego irrestricto y para los usos comprendidos en las Clases 2 y 3.

Clase 2: buena calidad. Indica un agua adecuada para el desarrollo de la acuicultura, de la pesca deportiva y recreativa y para los usos comprendidos en la clase 3, los cuales son el riego restringido y bebida de los animales.

Clase 3: regular calidad. Indica un agua adecuada para bebida de animales y riego restringido.

Las clases de calidad comprendidas entre clase de excepción y clase 3 pueden ser captadas para potabilizar.

Clase 4: Las aguas que excedan los límites establecidos para la clase 3, indicarán un agua de mala calidad, en general, no adecuada para la conservación de las comunidades acuáticas o su aprovechamiento para los usos prioritarios sin el tratamiento adecuado.

En la **Tabla 7-30** se muestra la clasificación de las aguas para la zona del Loa alto.

Basado en la clasificación de la CONAMA (CONAMA, 2005), existe un Índice de Calidad de Aguas Superficiales (ICAS) Chileno que da distinto peso cada uno de los elementos analizados y multiplica por un valor según la clase en la que esté este elemento, dando como resultado un único número del 1 al 100 para cada muestra de agua.

Este análisis no se realizó ya que se consideraban como imprescindibles algunos de los parámetros orgánicos de los cuales no se tienen resultados como parte importante para la clasificación.

MUESTRA	CLASE				
	0	1	2	3	4
1-LAP	pH, SO_4^{2-}, B, Al, As		SD, Fe	CE	Cl
2-LAP	pH, SO_4^{2-}, B, Fe, Al, As				CE,OD, SD, Cl
3-LAP	pH, SO_4^{2-}, B, Fe, Al, As				CE, OD, SD,Cl
5-LAP	pH, Fe, Al		SO_4^{2-}		CE, OD,SD, Cl, B, As
6-LAV	pH, Fe, Al, As		SO_4^{2-}		CE, OD,SD, Cl, B
7-LAV	pH, Fe, Al, As		SO_4^{2-}		CE, OD,SD, Cl, B
8-LAV	pH, Fe, Al		SO_4^{2-}		CE, OD,SD, Cl, B, As
9-LAV	pH, Fe, Al		SO_4^{2-}		CE, OD,SD, Cl, B, As
10-LAP	pH, Al		SO_4^{2-}		CE, OD, SD, Cl, B, Fe, As
11-LAP	pH, SO_4^{2-}, As			SD, Al	CE, OD, Cl, B, Fe
12-LAP	pH, SO_4^{2-}, As		Fe	SD, Al	CE, OD, Cl, B
13-LAV	OD, pH, Fe, As		SO_4^{2-}	CE, Al	SD, Cl, B
14-LAV	pH, SO_4^{2-}, Fe, As		CE, SD	OD, Cl, Al	B
15-LAV	pH, Fe			Al	CE, OD,SD, Cl, SO_4^{2-}, As
16-LAV	pH, Fe			Al	CE, OD,SD, Cl, SO_4^{2-}, B, As
17-LAV	OD, pH, Fe			Al	CE, SD, Cl, SO_4^{2-}, B, As
18-LAV	pH, SO_4^{2-}, Fe			CE, SD, Al	OD, Cl, B, As
19-LAV	pH, Fe			Al	CE, OD, SD, Cl, SO_4^{2-}, B, As
20-LAV	CE, pH, SD, Cl, SO_4^{2-}, Fe, As		OD	Al	B
21-LAV	CE, pH, SD, Cl, SO_4^{2-}, Fe, As		OD	Al	B
22-LAV	CE, pH, SD, Cl, SO_4^{2-}, B, Fe, As		OD	Al	
23-LAV	Cl, Fe, As,		CE, OD, SD	SO42-	pH, B, Al,
24-LAV	CE, pH, SD, Cl, SO_4^{2-}, Fe, As			Al	OD, B
25-LAS	OD, pH, Fe, Al,	SD	CE, Cl, SO_4^{2-}		B, As
26-LAS	OD, pH, Fe, As		CE, SD, SO_4^{2-}	Cl	B
27-LAS	pH, SO_4^{2-}, Fe, As		CE, OD, SD, Al		Cl, B
28-LAS	pH, SD, SO_4^{2-}, Fe		OD	CE, Al	Cl, B, As
29-LAV	CE, pH, Cl, Fe, As		OD,SD, SO_4^{2-}	Al	B
30-LAS	pH, Fe, As		SO_4^{2-}	Al	CE, OD, SD, Cl, B
31-LAS	pH, Fe		SO_4^{2-}	Al	CE, OD, SD, Cl, B, As
32-LAS	OD, pH, Fe, As		SO_4^{2-}	Al	CE, SD, Cl, B
33-LAS	OD, pH, Fe, As		SO_4^{2-}	SD, Al	CE, Cl, B
34-LAS	OD, pH, Fe		SO_4^{2-}	SD, Al	CE, Cl, B, As
35-LAV	CE, pH, SD, Cl, SO_4^{2-}, Fe, As			Al	OD, B

36-LAV	CE, pH, SD, Cl, Fe, As		SO_4^{2-}	Al	OD, B
37-LAV	pH, Fe		OD,SD, SO_4^{2-}	CE, Al	Cl, B, As
38-LAS	pH, Fe		SO_4^{2-}	OD, SD, Al	CE, Cl, B, As
39-LAV	pH, Fe	SD	CE, Cl, SO_4^{2-}	Al	OD, B, As
40-LAS	CE, pH, SD, Cl, SO_4^{2-}, Fe, As			Al	OD, B
41-LAV	CE, pH, SD, Cl, SO_4^{2-}, Fe, As	B		Al	OD
42-LAV	pH, Cl, SO_4^{2-}, Fe, As		CE, SD	Al	OD, B
43-LAV	CE, pH, SD, Cl, SO_4^{2-}, Fe, Al, As				OD, B
44-LAS	pH, Fe, Al		CE,OD, SD, SO_4^{2-}		Cl, B, As
45-LAS	pH, Fe, Al		CE,OD, SD, Cl, SO_4^{2-}		B, As
46-LAS	pH, Fe, As	Al	CE,OD, SD, Cl, SO_4^{2-}		B
47-LAS	pH, Al	Fe	OD, SO_4^{2-}	CE, SD	Cl, B, As
48-LAS	pH, SO_4^{2-}, Fe, Al		OD, SD	CE	Cl, B, As
49-LAV	pH, SD, Cl, SO_4^{2-}, Fe, Al, As	CE			OD, B
50-LAV	CE, pH, SD, Cl, SO_4^{2-}, Fe, al		B		OD
51-LAV	CE, pH, SD, Cl, SO_4^{2-}, B, Fe	Al			OD
52-LAV	CE, pH, SD, Cl, SO_4^{2-}, B, As			Al	OD
53-LAV	pH, Fe, Al, As	SO_4^{2-}	CE, SD		OD, Cl, B
54-LAV	CE, pH, SD, Cl, SO_4^{2-}, Al				OD, B, Fe
55-LAS	pH, SO_4^{2-}, Fe, Al		CE,SD		OD, Cl, B, As
56-LAV	pH, Fe	Al	SO_4^{2-}		CE, OD, SD, Cl, B, As
57-LAS	CE, pH, SD, Cl, Fe, Al, As		B		OD
58-LAV	CE, pH, SD, Cl, SO_4^{2-}, Fe			Al	OD, B, As
59-LAV	CE, pH, SD, Cl, SO_4^{2-}, Fe, Al, As				OD, B
60-LAV	CE, pH, SD, Cl, SO_4^{2-}, Fe, Al, As				OD, B
61-LAS	CE, pH, SD, Cl, SO_4^{2-}		Fe	Al	OD, B, As

Tabla 7-30. Clasificación de la calidad de aguas según CONAMA (CONAMA, 2004) de las muestras tomadas en la campaña octubre 2013. Fuente: elaboración propia.

7.7 MODELO HIDROQUÍMICO CONCEPTUAL

Las muestras tomadas en vertientes asociadas a las unidades hidrogeológicas constituidas por roca fracturada tienen una composición generalmente dominada por sulfatos. Estas muestras son las más representativas de la composición del agua de recarga por tener la mayoría de ellas una baja salinidad, una composición principalmente sulfatada, una composición isotópica en ^{18}O y ^{2}H con los valores más negativos y una composición de $\delta^{13}C$ con valores entre -15 y -5 ‰. El origen de las sales de estas vertientes es la composición hidroquímica del agua de lluvia mediante la evapoconcentración y la disolución de rocas con efecto, en varios casos, de geotermalismo.

Las muestras tomadas en los límites de los núcleos de los salares de Carcote y Ascotán presentan una composición marcada clorurada sódica. Al tener además valores de $\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$ sin efectos notorios de fraccionamiento por evaporación, se estima el origen de su marca hidroquímica por disolución de halita y la interacción agua-roca favorecida por el geotermalismo presente en la zona.

Las composiciones de $\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$ en función de la altura junto con la relación precipitación altura, muestran que la recarga de agua en el sistema hídrico de la zona de estudio se produce en las zonas más altas de la cuenca.

La concentración de B, As y Si tiene como origen la interacción agua-roca con respecto a la salinidad y contenido isotópico en $\delta^{18}O$, $\delta^{2}H$ y $\delta^{13}C$ en las unidades hidrogeológicas fracturadas de andesita (en la zona oriente y centro) y en la riolita (en la zona poniente). La interacción agua-roca en las unidades hidrogeológicas de ignimbrita y en los sedimentos detríticos aporta al agua una concentración significativa de cloruros.

En la parte alta del río Loa, del nacimiento hasta la represa de Lequena, el río tiene tres tipos de aporte de agua. Un aporte sulfatado-clorurado sódico principalmente por la entrada de agua de la quebrada Paco Paco. Un aporte bicarbonatado sódico en la zona límite entre la cuenca con Pampa Puno. Y por último un aporte sulfatado clorurado sódico entre el río Chela y la represa Lequena. En el tramo del río Loa entre Lequena y Chiu Chiu el aporte con mayor importancia en términos de caudal se produce entre la represa Lequena y la quebrada Taira con una marca clorurada sódica, con agua precipitada a menor altura que en la parte alta de la zona de estudio. Otro aporte significativo pero de menor magnitud tiene lugar entre la quebrada Taira y la intersección de la cuenca de San Pedro con el cauce del río Loa, a la altura del río Loa.

Este aporte se manifiesta por el incremento de la concentración de bicarbonatos, calcio y el aumento del valor de $\delta^{13}C$. Este último especialmente por el posible aporte de aguas subterráneas desde la cuenca del río San Pedro.

8 MODELO CONCEPTUAL

El modelo conceptual compila el conocimiento integrado de todos los elementos de la cuenca de estudio y, por este motivo, es la base sobre la que se cimenta la modelación numérica posterior para gestión de los recursos. De esta forma, la calidad y representatividad de todo modelo numérico reside en la solidez del modelo conceptual.

La modelación conceptual se obtiene completando una serie de fases interdependientes que incluyen la recolección de datos en el terreno, su análisis, la presentación de los resultados y su posterior visualización. A su vez, la modelación conceptual integra la caracterización hidrológica, geológica, hidrogeológica, hidroquímica e isotópica bajo el esquema de la **Figura 8-1**.

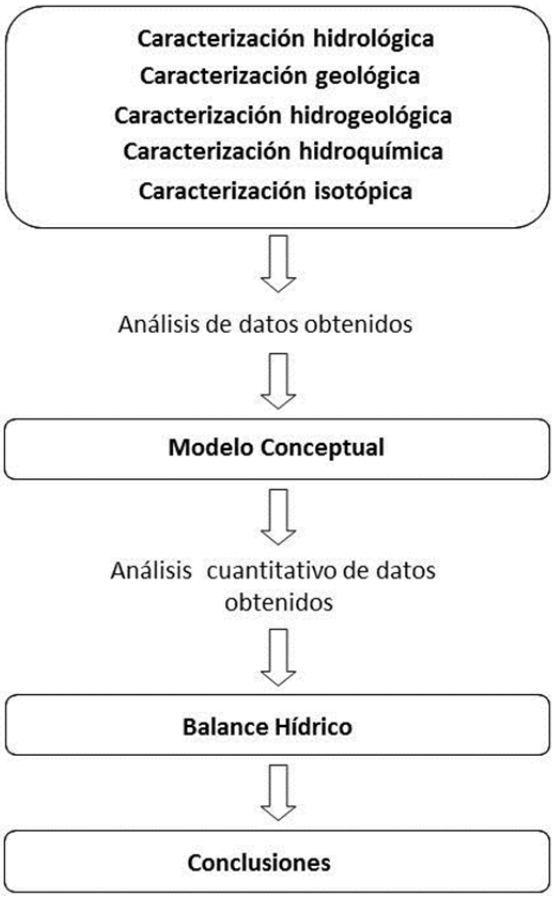


Figura 8-1. Fases para la obtención del modelo conceptual y conclusiones. Fuente: elaboración

propia.

La zona de estudio definida como la cuenca del Loa Alto ha sido subdividida en base a subcuencas diferenciadas a partir de la topografía. Para este proyecto, se ha subdividido el área total (8.893 Km^2) en un subconjunto de 7 subcuencas, de las cuales la principal corresponde al cauce principal del río Loa. De acuerdo a esta subdivisión, la cuenca del Loa Alto se ha clasificado en:

- Subcuencas hidrológicamente desconectadas: correspondientes a las subcuencas endorreicas de los salares de Alconcha, Ollagüe, Carcote y Ascotán.
- Subcuenca tributaria eventual: perteneciente a la subcuenca de Pampa Puno, donde se encuentra la Vega Sapunta.
- Subcuenca tributaria permanente (en régimen natural): subcuenca del río San Pedro.
- Subcuenca principal: corresponde al resto de la superficie de la cuenca del Loa Alto, desde el nacimiento del río hasta antes de la incorporación del río Salado.

A su vez, se han agrupado estas 7 subcuencas en dos dominios hidrogeológicos para explicar el balance hidrológico de la zona de estudio, **Figura 8-2**:

- **Subcuencas endorreicas**: constituidas por las subcuencas de los salares de Alconcha, Ollagüe, Carcote y Ascotán. Este dominio está limitado por dos cadenas volcánicas con orientación norte-sur y separadas por las depresiones de los salares.
- **Subcuencas exorreicas**: corresponden a las subcuencas de Pampa Puno, San Pedro y subcuenca principal del Loa.

La geología de la región se caracteriza por tener dos cadenas de volcanes de formación recientes (cadena de los Andes de edad terciaria), y una cadena montañosa de mayor edad que forma el basamento palezóico (Sierra del Medio). Las cuencas endorreicas se disponen de norte a sur divididas por las dos cadenas de volcanes también con dirección norte-sur.

Las unidades geológicas más representativas son de mayor a menor edad ignimbritas, andesitas y las formaciones de edad cuaternaria detríticas y evaporíticas (salares). El sistema está formado por un sistema de grandes fallas con dirección principal norte-sur y un sistema asociado de fallas de menor importancia con dirección este-oeste, **Figura 8-2**.

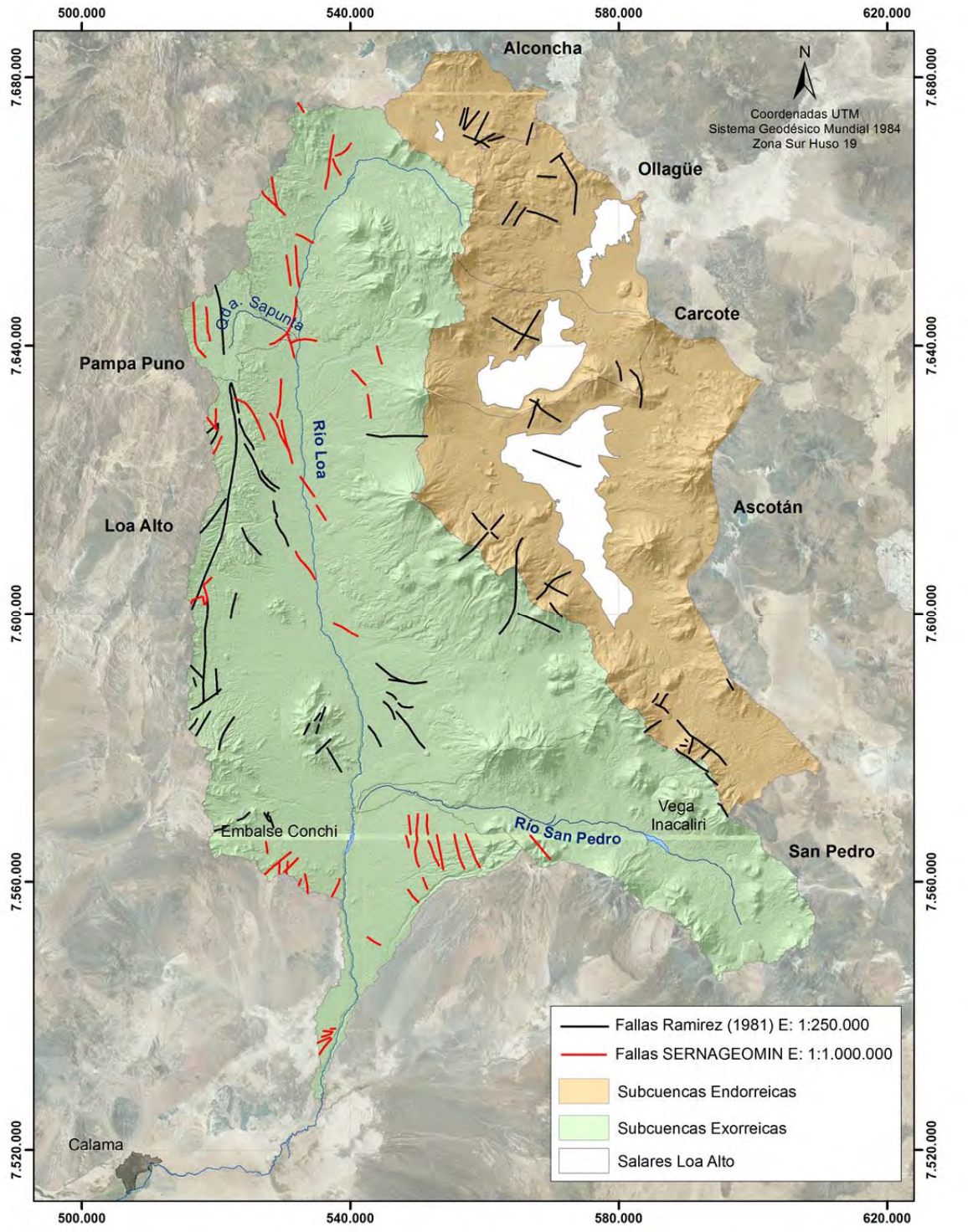


Figura 8-2. Dominios hidrogeológicos y sistemas de fallas principales. Fuente: elaboración propia.

A nivel hidrogeológico, las subcuencas de Pampa Puno y San Pedro se distinguen del resto por tener un acuífero sedimentario principal constituido por formaciones recientes de sedimentos cuaternarios de origen volcánico con intercalaciones de cenizas y piroclastos.

La principal entrada de agua al sistema es la precipitación directa sobre la cuenca. Se ha observado una estacionalidad en el patrón de precipitaciones; concentrándose los meses húmedos entre diciembre y marzo los cuales coinciden con el invierno altiplánico. Estas precipitaciones altiplánicas son de origen atlántico que recorren el Amazonas y descargan su agua en las cadenas volcánicas que rodean los salares.

Las salidas del sistema difieren en cuanto a magnitud en las subcuencas endorreicas de las exorreicas. En las subcuencas endorreicas se considera como salida principal la evaporación hacia la atmósfera que se produce en los salares mientras que, en las cuencas exorreicas, a la evaporación se le suma la salida del sistema a través del río Loa, además de las extracciones superficiales y subterráneas para agua potable, uso agrícola y/o minero.

Se estima que las cuencas endorreicas que contienen a los salares forman un sistema que se equilibra gracias a la variación del nivel freático y la profundidad de extinción de la evaporación, que actúa como un regulador de las entradas y salidas. Según MARDONES (Mardones, 1998), toda el agua que precipita en los salares es evaporada a la atmósfera. De este modo, la salida por evaporación correspondería a toda la precipitación que cae en las superficies de los salares de Alconcha, Ollagüe, Carcote y Ascotán. En las zonas altas de la cuenca, donde la evaporación no compromete el total de la precipitación, queda un remanente que infiltra o escurre, dando lugar al flujo superficial y/o subterráneo que se manifiesta y se observa aguas más abajo en la cuenca. Este balance natural se ve afectado por las extracciones antrópicas, en donde la variable bombeo actúa como parte de las salidas de la ecuación del balance hídrico.

En términos de los flujos subsuperficiales y la presencia de distintos tipos de acuíferos, en la región se determinan dos tipos de sistema de flujo de agua a través de los medios rocosos y detríticos. Un primer sistema actúa sobre las rocas fracturadas donde el agua circula y sale a la superficie por heterogeneidades (afloramiento inducido), este sistema se observa en los materiales andesíticos e ignimbríticos. El segundo tipo de flujo se caracteriza por ser en un medio poroso, con mayores tiempos de residencia y en el caso de las cuencas endorreicas por aflorar en la interfaz agua dulce-agua salada.

Esta dinámica de flujos se puede esquematizar al interior del modelo conceptual. Por simplicidad en este trabajo se les ha llamado Modelo A y Modelo B, ya que se relacionan y repiten en varias de las subcuencas estudiadas. Con el fin de explicar de un modo gráfico el modelo conceptual, se han definido dos "modelos conceptuales de flujo", es decir, dos formas en las que circula el agua subterránea y aflora en la superficie.

El Modelo A se desarrolla en un medio volcánico fracturado, donde el agua subterránea circula a través de familias de fracturas conectadas. Aguas debajo de la zona de recarga el nivel del agua se encuentra con una barrera hidráulica o intersección con un bajo topográfico que provoca el afloramiento inducido del agua en forma de vertiente. Una barrera hidráulica puede ser una falla, un cambio en la litología, un cambio de transmisividad, una caída del fondo del basamento o cualquier otro elemento que fuerce el afloramiento del agua subterránea. Posteriormente, el agua de la vertiente se vuelve a infiltrar desde la superficie en el medio acuífero, pero a una cota altimétrica menor que la original. En la **Figura 8-3** se muestra un esquema del funcionamiento del modelo A.

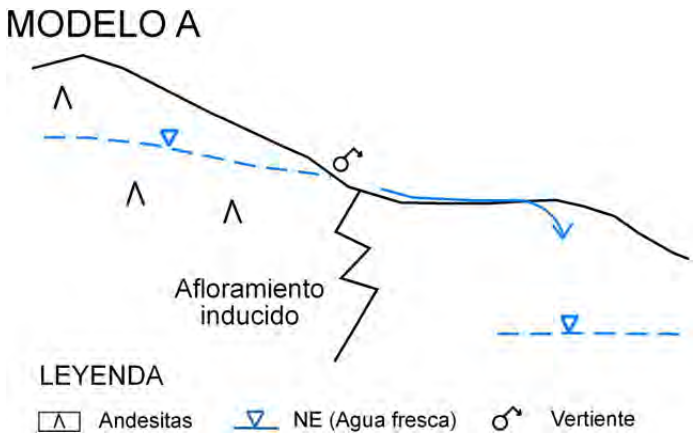


Figura 8-3. Esquema explicativo del modelo del flujo A que se producen en la zona de estudio. Fuente: elaboración propia.

El Modelo B se desarrolla en un medio poroso. El mecanismo que rige este modelo es la diferencia de densidad entre el agua fresca y el agua salina, y la evaporación que se produce en la superficie del propio salar. El agua de precipitaciones se infiltra en el medio acuífero y circula a través de las coladas de lava y del relleno sedimentario hasta alcanzar el área del acuífero salino. Al llegar al salar, el agua fresca se encuentra con la masa de agua salina que existe bajo la superficie del mismo produciéndose

entre ambas aguas una zona de interfase. Esta interfase o cuña salina fuerza al agua fresca (menos densa) a fluir sobre la salmuera y aflorar en el horizonte superior del salar formando lagunas de agua con baja salinidad. La posición de la interfase está controlada por la tasa de evaporación y el empuje de la cuña de agua dulce o fresca. Los depósitos evaporíticos se originan por la evaporación de agua desde las lagunas originadas por las vertientes. En la **Figura 8-4** se muestra un esquema de funcionamiento de este modelo de flujo.

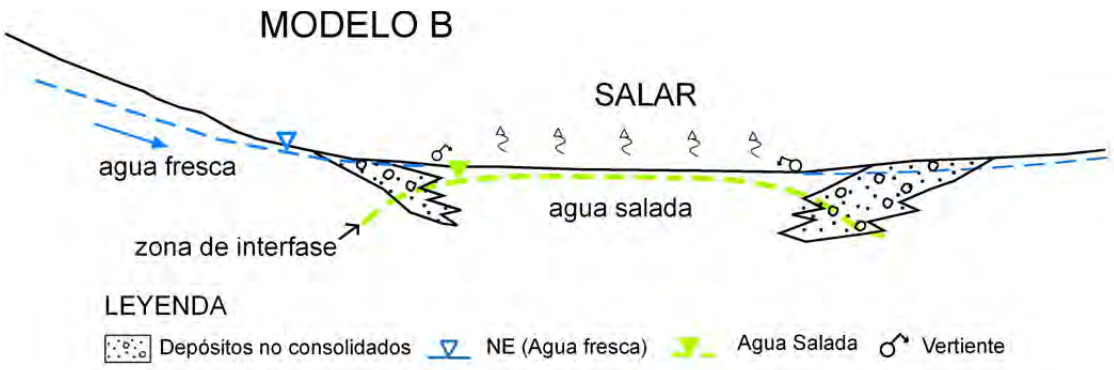


Figura 8-4. Esquema explicativo del modelo del flujo B que se producen en la zona de estudio. Fuente: elaboración propia.

Para cada una de las subcuencas que componen la zona de estudio se propone un modelo conceptual preliminar ya que, cada una de ellas se compone de unas unidades hidrogeológicas específicas y dirección del flujo subterráneo propia de cada sistema.

En el modelo conceptual preliminar han sido definidas las unidades hidrogeológicas utilizadas en base a los antecedentes disponibles y a las observaciones realizadas en terreno y en gabinete.

Para el análisis de la distribución de las distintas marcas de agua y de acuerdo a la poca variación mostrada por los parámetros fisicoquímicos entre las dos campañas de muestreo en terreno, se han utilizado los datos de la primera campaña (Octubre de 2013) y una selección de puntos adicionales de la segunda campaña de terreno (Diciembre de 2013).

Para toda la región, el ciclo del agua comienza con la evaporación y generación de nubes de origen en el océano atlántico, que viaja y se desplaza llegando al altiplano chileno con una marca continental en sulfatos y con una composición isotópica con valores livianos de $\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$. Los valores de infiltración respecto a la lluvia están

comprendidos entre el 10 y el 25% similar a los valores de los antecedentes recopilados. La aplicación de balances de masa de agua en una zona árida, donde los eventos de lluvia son muy puntuales, provoca que se sobreestime la evapotranspiación. En las cuencas endorreicas la salida del balance de agua es en su totalidad la evaporación desde el núcleo de los salares donde se concentra por gradiente gravitacional la escorrentía superficial y subterránea.

En la región las muestras tomadas en vertientes asociadas a unidades hidrogeológicas formadas por roca fracturada tienen una composición generalmente dominada por sulfatos. Estas muestras son las más representativas de la composición del agua de recarga por tener la mayoría de ellas una baja salinidad, una composición principalmente sulfatada, una composición isotópica en $\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$ con los valores más negativos, una composición de $\delta^{13}C$ con valores entre -15 y -5 ‰. La evapoconcentración del agua de precipitación y la interacción agua-roca favorecida por el geotermalismo son los principales orígenes de la salinidad de las muestras.

En las muestras tomadas en los límites de los núcleos de los salares de Carcote y Ascotán, las muestras presentan una composición claramente clorurada sódica. Al tener además valores de $\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$ sin efectos notorios de fraccionamiento por evaporación se estima el origen de su marca hidroquímica por disolución de halita.

Las composiciones de $\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$ en función de la altura además de la relación precipitación altura muestran que la recarga de agua en el sistema hídrico de la zona de estudio se produce en las zonas más altas de la cuenca.

La concentración de B, As y Si tiene como origen la interacción agua-roca en los materiales volcánicos más recientes respecto a la salinidad y contenido isotópico en $\delta^{18}O$, $\delta^{2}H$ y $\delta^{13}C$.

Se ha realizado un perfil esquemático del funcionamiento de cada subcuenca donde se explican las relaciones que existen entre los diferentes elementos del sistema. También se ha realizado un perfil Carcote-Ascotán. Pampa Puno-Loa y Ascontán-Loa con el objetivo de estimar las relaciones existentes entre estas parejas de subcuencas. En la **Figura 8-5** se muestra un mapa de la zona de estudio con la ubicación de cada perfil.

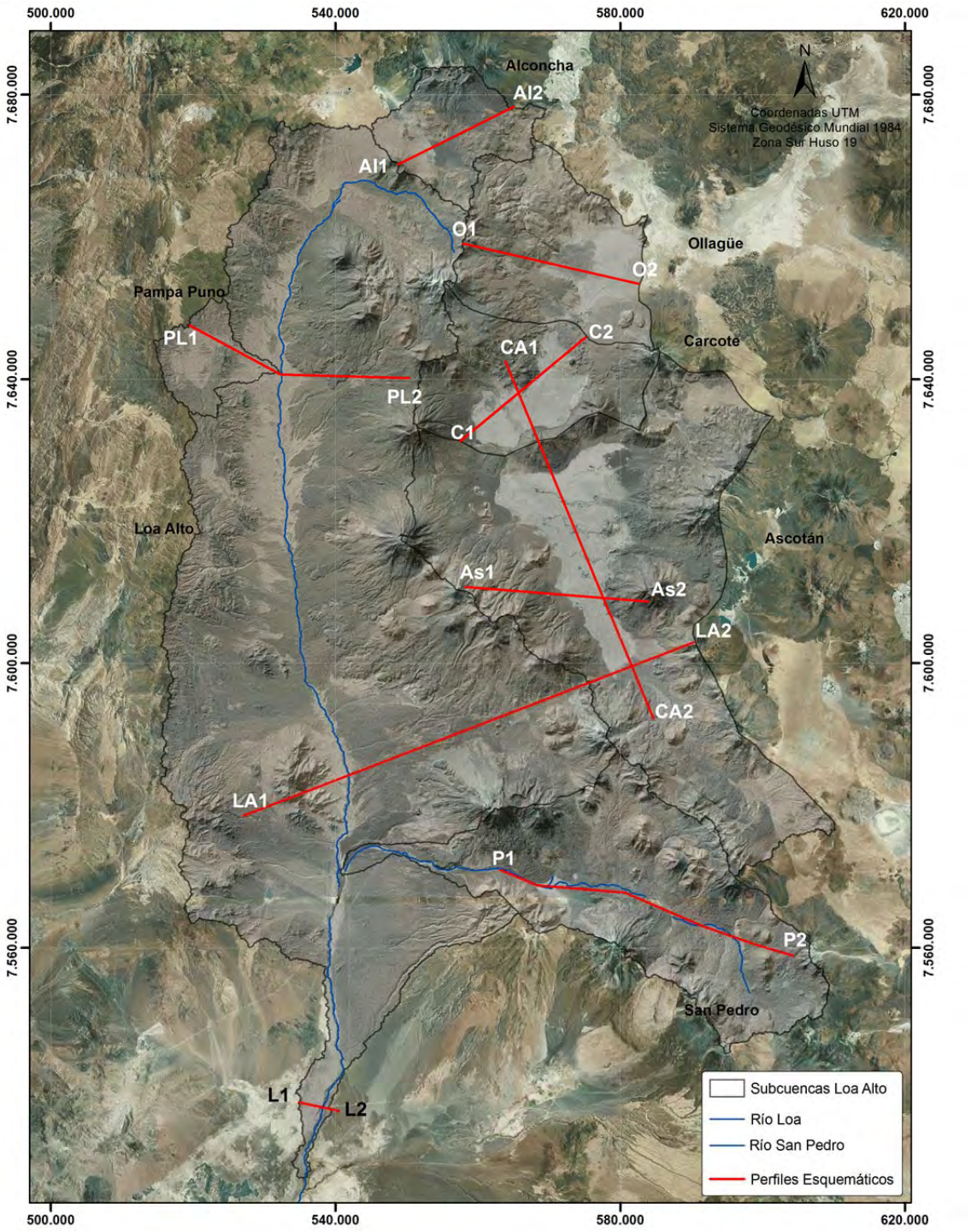


Figura 8-5. Mapa de la zona de estudio con la ubicación de los perfiles esquemáticos realizados. Fuente: elaboración propia.

8.1 SUBCUENCA DE ALCONCHA PERFIL AI1-AI2

La subcuenca de Alconcha se localiza en el sector noreste de la zona de estudio limitada por cerros y volcanes cuya altitud máxima corresponde a 5.582 msnm (cerro Portezuelo).

Geológicamente, la subcuenca de Alconcha pertenece a la cordillera de los Andes y en ella afloran materiales del Terciario y Cuaternario. Los materiales más antiguos corresponden a los estratovolcanes andesíticos del Mioceno Superior-Plioceno sobre los que se encuentra la ignimbrita de Ujina de composición riolítica y dacítica de edad Mioceno Superior. Los materiales cuaternarios están constituidos por depósitos no consolidados y depósitos salinos. La composición de los depósitos salinos del salar de Alconcha es clorurada y sulfatada.

En la subcuenca de Alconcha se diferencian 3 unidades hidrogeológicas que corresponden con una unidad de depósitos salinos, la unidad hidrogeológica de depósitos no consolidados, ambas del cuaternario, y, por último, la unidad hidrogeológica correspondiente a la ignimbrita Ujina, formada por las ignimbritas riolíticas y dacíticas y con fracturación horizontal.

El modelo piezométrico realizado por SGA (SGA, 2007), verificado en ambas campañas de terreno, muestra una dirección de flujo del agua subterránea de noreste a suroeste, correspondiendo a una circulación desde las vertientes hacia el propio salar. El modelo piezométrico propuesto es un modelo de flujo concéntrico, es decir, las líneas de flujo se dirigen hacia el centro del salar. Por otro lado, cabe destacar que en la zona noroeste de la subcuenca existe otra dirección de flujo ya que las vertientes catastradas en la zona de Puquios fluyen hacia el salar Laguani y no hacia el salar de Alconcha. De acuerdo a lo anterior, se pueden diferenciar dos subcuencas, la de Alconcha y la de Laguani.

En el salar de Alconcha se han reconocido los dos modelos de flujo definidos anteriormente: el modelo A y el modelo B. El modelo A se observa en las vertientes 35-LAV y 60-LAV, las cuales provienen de las fracturas de la ignimbrita Ujina que vierten agua subterránea que posteriormente se infiltra de nuevo. El punto 36-LAV, corresponde con una vertiente cuyo comportamiento está regido por el modelo B, en el que el agua subterránea fresca aflora debido a la presencia de la cuña salada producida por la salmuera asociada al depósito salino.

En la subcuenca de Alconcha se muestrearon vertientes ubicadas alrededor de los depósitos no consolidados, exceptuando los puntos 23-LAV y 24-LAV localizados en la zona noreste de la subcuenca, en el sector de Puquios. La muestra 24-LAV es de tipo hidrotermal ya que presenta sus aguas presentan una temperatura superior a los 20ºC. La muestra 23-LAV, muy próxima a la 24-LAV, muestra una temperatura de 13ºC lo que indica para ambas vertientes que sus orígenes son distintos.

La composición química de las aguas muestreadas presentan 4 marcas químicas distintas. Las muestras 35-LAV y 36-LAV tienen una marca química similar aunque la 36-LAV se encuentra más cargada en solutos. Ambas muestras indican un origen común perteneciente a la misma línea de flujo. La 35-LAV procede del agua subterránea que mana en la roca fracturada, posteriormente circula superficialmente hasta que se vuelve a infiltrar para, finalmente, aflorar en el borde del salar, donde se toma la muestra 36-LAV.

La muestras 23-LAV y 24-LAV se localizan muy próximas entre sí pero la primera es sulfatada cálcico magnésica y la 24-LAV es clorurada sódica. Se asocia un origen de agua más profunda a la muestra 24-LAV debido a su elevada temperatura. La muestra 23-LAV sería más superficial y su composición estaría influenciada por un botadero de materiales sulfatados que se localizan aguas arriba de la vertiente. Esta hipótesis está apoyada por el bajo pH registrado en esta muestra.

La muestra 75-LAV2, ubicada en el margen sur del salar, presenta una composición bicarbonatada cálcica muy distinta al resto de aguas muestreadas.

En relación con los isótopos de la molécula del agua ($\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$) los resultados obtenidos concretan que todas las muestras presentan la composición isotópica del agua de precipitación ya que están situadas a lo largo de la Recta Meteórica Mundial Media (RMMM) excepto la muestra 36-LAV que se localiza en el límite del salar y presenta rastros de haber sufrido fraccionamiento por evaporación desde el suelo.

En la **Figura 8-6** se muestra un esquema de la zona de estudio donde se explica el modelo conceptual preliminar para la subcuenca de Alconcha.

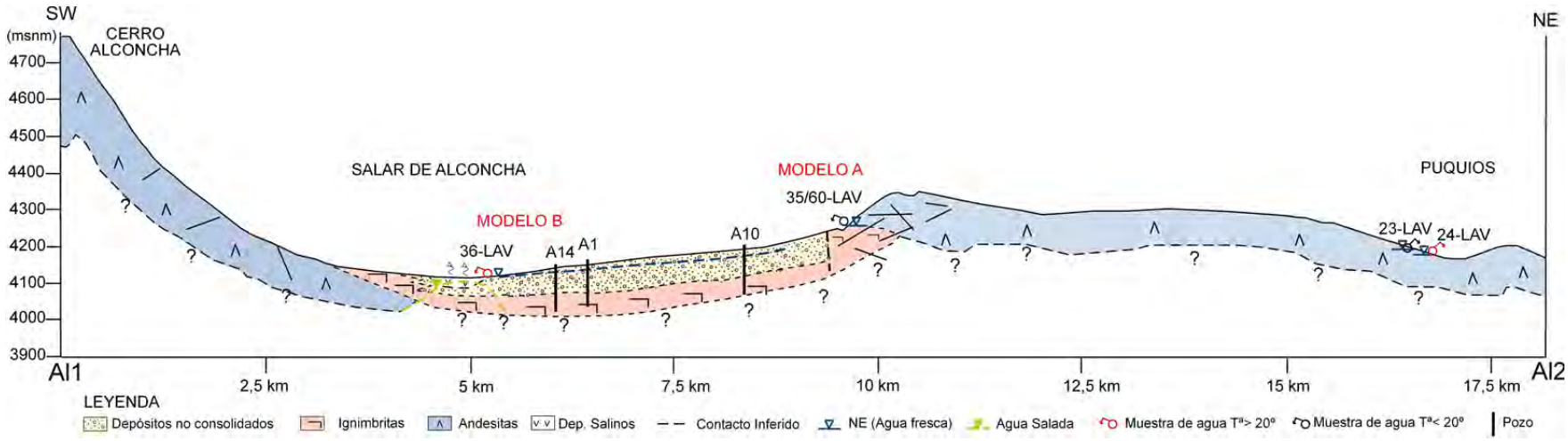


Figura 8-6. Modelo Conceptual Preliminar de la subcuenca de Alconcha. El esquema muestra una exageración vertical de acuerdo a las proporciones del perfil. Fuente: elaboración propia.

8.2 SUBCUENCA DEL SALAR DE OLLAGÜE PERFIL O1–O2

La subcuenca del salar de Ollagüe se ubica al sur del salar de Alconcha. Es una cuenca endorreica limitada por cerros y volcanes de hasta 6.176 msnm.

Geológicamente, la subcuenca del salar de Ollagüe pertenece a la cordillera de los Andes y las unidades geológicas presentes en la zona de estudio son, de más antiguo a más moderno: estratovolcanes andesíticos del Mioceno Superior-Plioceno, conglomerados y areniscas, la ignimbrita de Carcote del Plioceno y, por último, los depósitos cuaternarios que corresponden con depósitos aluviales y coluviales y con los depósitos salinos que constituyen el propio salar de Ollagüe. Los depósitos salinos se asocian principalmente con cloruros y sulfatos en la parte septentrional del salar y sulfatos en la parte sur.

En la subcuenca de Ollagüe se distinguen 5 unidades hidrogeológicas; las unidades más superficiales y modernas se corresponden con los depósitos no consolidados y salinos y a continuación se reconoce una unidad ignimbrítica constituida por una toba fracturada al igual que la unidad hidrogeológica andesítica. Por último, a 147 m de profundidad se definió una unidad de gravas y arenas.

La piezometría de la que se dispone muestra que la dirección del flujo del agua subterránea se dirige desde la periferia hacia el núcleo del salar, es decir, sigue un modelo piezométrico concéntrico. En esta subcuenca, también se observa que las aguas de la zona norte del salar fluyen hacia el salar de Laguani en lugar de hacia el salar de Ollagüe por lo que se puede considerar la existencia de dos sistemas hídricos distintos.

En este sector se han tomado 3 muestras de vertientes (20-LAV, 21-LAV y 22-LAV) que se ubican en el sector oeste y noroeste del salar. Las dos primeras son vertientes que se dirigen hacia el propio salar y la 22-LAV vierte sus aguas al salar de Laguani. Estas vertientes siguen el modelo de flujo correspondiente con el modelo A (**Figura 8-7**).

Las tres muestras presentan una marca química similar, es decir, aunque no presentan idéntica composición química, el patrón de concentración de los elementos que las componen es el mismo. Esto da idea de un origen común y de un recorrido e interacción con el subsuelo similar. Las muestras están poco cargadas químicamente por lo que se puede deducir que el trayecto de circulación ha sido muy corto. El agua infiltrada ha circulado por el material fracturado y ha aflorado a la superficie inducida

por la presencia de fracturas. La composición de estas muestras es sulfatada cálcico sódicas.

En relación con los isótopos de la molécula del agua ($\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$), las 3 muestras analizadas se sitúan sobre la Recta Meteórica Mundial Media (RMMM) por lo que se les asocia la misma altura de recarga.

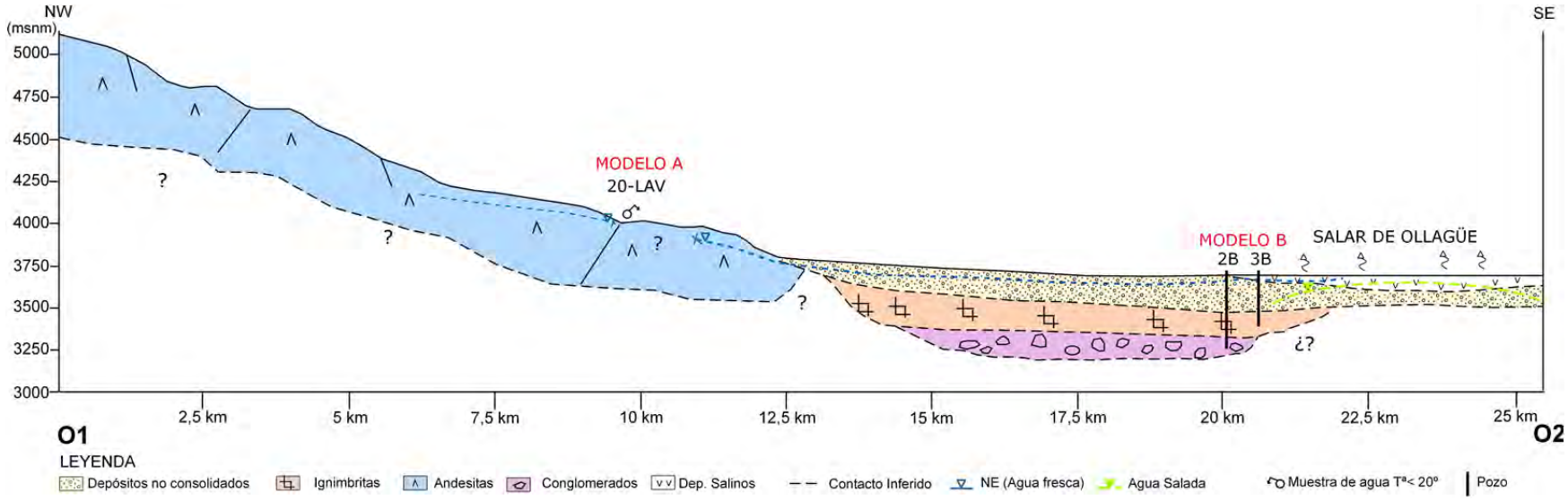


Figura 8-7. Modelo Conceptual Preliminar del salar de Ollagüe. El esquema muestra una exageración vertical de acuerdo a las proporciones del perfil. Fuente: elaboración propia.

8.3 SUBCUENCA DEL SALAR DE CARCOTE PERFIL C1-C2

La subcuenca del salar de Carcote se localiza al sur del salar de Ollagüe y al norte del salar de Ascotán. Se encuentra en una depresión cuya cota media es de 3.660 msnm. Los principales volcanes que conforman los límites de la subcuenca son el volcán Aucanquilcha (6.176 msnm) y el volcán Chela (5.644 msnm) localizados en el borde oeste.

Al igual que en los subcuencas anteriores, el salar de Carcote se ubica en la unidad geomorfológica de la cordillera de los Andes. Los materiales geológicos que afloran en la zona de estudio son principalmente estratovolcanes de composición andesítica de edad Mioceno Superior-Plioceno y Plioceno. En la parte norte y en las faldas del volcán Ollagüe afloran lavas andesíticas de edad Plioceno Superior-Pleistoceno. Los materiales más modernos están constituidos por depósitos cuaternarios de tipo aluvial y evaporítico.

En el salar de Carcote se han diferenciado 3 unidades hidrogeológicas: la más superficial corresponde a los depósitos salinos cuaternarios, por debajo se encuentran depósitos no consolidados constituidos por sedimentos aluviales y coluviales de granulometría variable y la tercera unidad hidrogeológica se corresponde con roca volcánica fracturada (andesita).

La piezometría muestra una disposición concéntrica donde las líneas de flujo se dirigen hacia el salar desde la periferia del mismo.

En esta subcuenca se tomaron 6 muestras de agua de vertientes ubicadas en los bordes del salar. Estas muestras presentan la misma huella química clorurada sódica pero con diferencias en sus concentraciones. La muestra 18-LAV es la menos salina y la 15-LAV la que mayor concentración registra.

La muestra 18-LAV presenta una temperatura de 21,6-23,3 ºC que puede estar asociada con una vertiente hidrotermal influenciada por la presencia del volcán Aucanquilcha.

En la subcuenca de Carcote se ha reconocido los dos modelos de flujo: el modelo A en las muestras 17-LAV, 80-LAV2 y 18-LAV, y el modelo B en el resto.

Los isótopos de la molécula del agua ($\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$) indican que la muestra 15-LAV presenta una marca muy evaporada relacionada con evaporación desde lámina libre. Esta muestra se tomó en una de las lagunas superficiales del salar y correspondería

con agua de la salmuera. El resto de muestras están próximas a la RMMM; la 16-LAV y la 76-LAV muestran mayor grado de evaporación aunque manteniendo la misma tendencia que las anteriores. Estas muestras sufrieron procesos de fraccionamiento por evaporación en el momento de infiltrarse. No obstante, todas las muestras muestran igual altura de recarga para toda la zona.

En la **Figura 8-8** se presenta el modelo conceptual preliminar definido en la subcuenca del salar de Carcote.

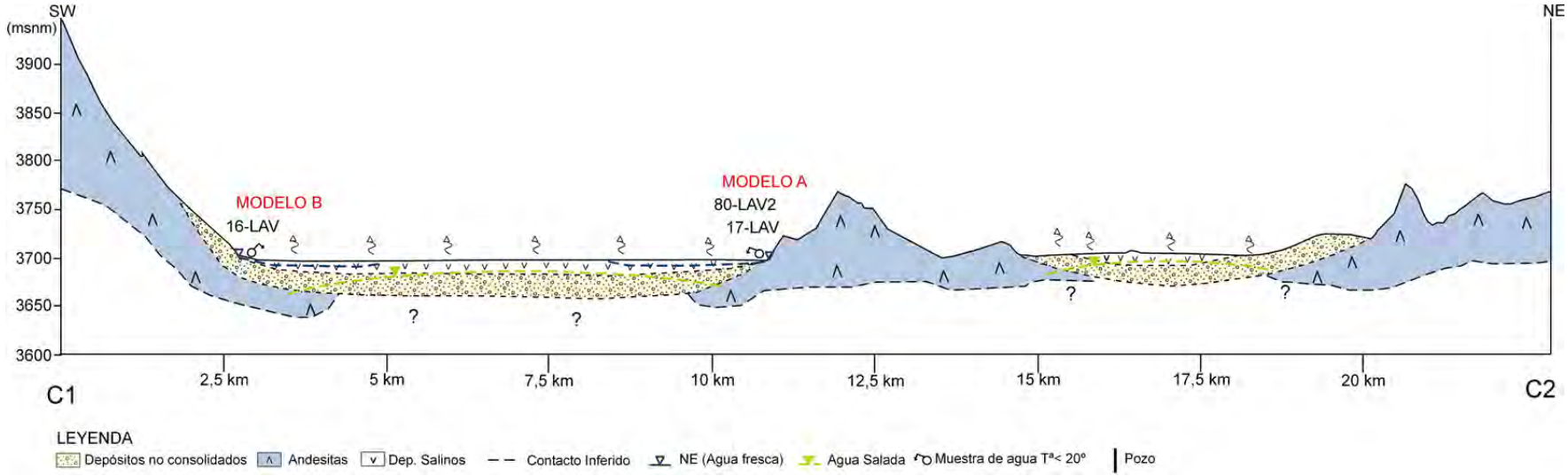


Figura 8-8. Modelo Conceptual Prelinar del salar de Carcote. El esquema muestra una exageración vertical de acuerdo a las proporciones del perfil. Fuente: elaboración propia.

8.4 SUBCUENCA DEL SALAR DE ASCOTÁN PERFIL As1-As2

La subcuenca del salar de Ascotán está ubicada en el margen este de la zona de estudio al sur del salar de Carcote y se encuentra delimitada por cerros y volcanes de hasta 6.078 msnm de altura.

Geológicamente los materiales más antiguos que afloran en la subcuenca del salar de Ascotán corresponden con estratovolcanes andesíticos con distintos grados de erosión. Estos materiales constituyen 3 unidades depositadas durante el Mioceno Superior-Plioceno, Plioceno y Plioceno Superior-Pleistoceno. En la parte sur afloran domos dacíticos porfídicos. Por último en el entorno del salar se localizan los depósitos cuaternarios, no consolidados y salinos.

Se reconocen 3 unidades hidrogeológicas (**Figura 8-9**): andesitas fracturadas, depósitos no consolidados y los depósitos salinos.

Las líneas de flujo subterráneo indican entradas de agua asociadas a las zonas de recarga por infiltración que adquieren una dirección desde los límites este, oeste y sur de la subcuenca hacia el salar.

En la subcuenca del salar de Ascotán químicamente se diferencian 2 grupos de agua con composiciones diferentes. La muestra 57-LAS presenta una composición sulfatada-cálcica y el resto de muestras son clorurada-sódicas. El punto 57-LAS se ubica en una quebrada en la parte alta de la cuenca, presenta muy baja concentración en sales y su composición es similar a la registrada en las aguas de nieve de las cuencas altas. En el resto de muestras se registra una diferencia en la relación SO_4/HCO_3 menor en las muestras asociadas a las vertientes del margen oeste de la cuenca.

En esta cuenca se manifiestan ambos modelos de flujo, el modelo A en las vertientes orientales y el modelo B en las vertientes del margen oeste del salar.

Los isótopos de la molécula del agua ($\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$) indican que existe una diferenciación de las muestras en dos grupos. El primer grupo ha sufrido evaporación desde el suelo en el momento de la infiltración y geográficamente se localizan en el margen este del salar. El segundo grupo está más enriquecido y más próximo de la RMMM y se ubica en el margen oeste del salar. Esta diferenciación en dos grupos nos indican 2 posibles alturas de recarga para cada uno de ellos.

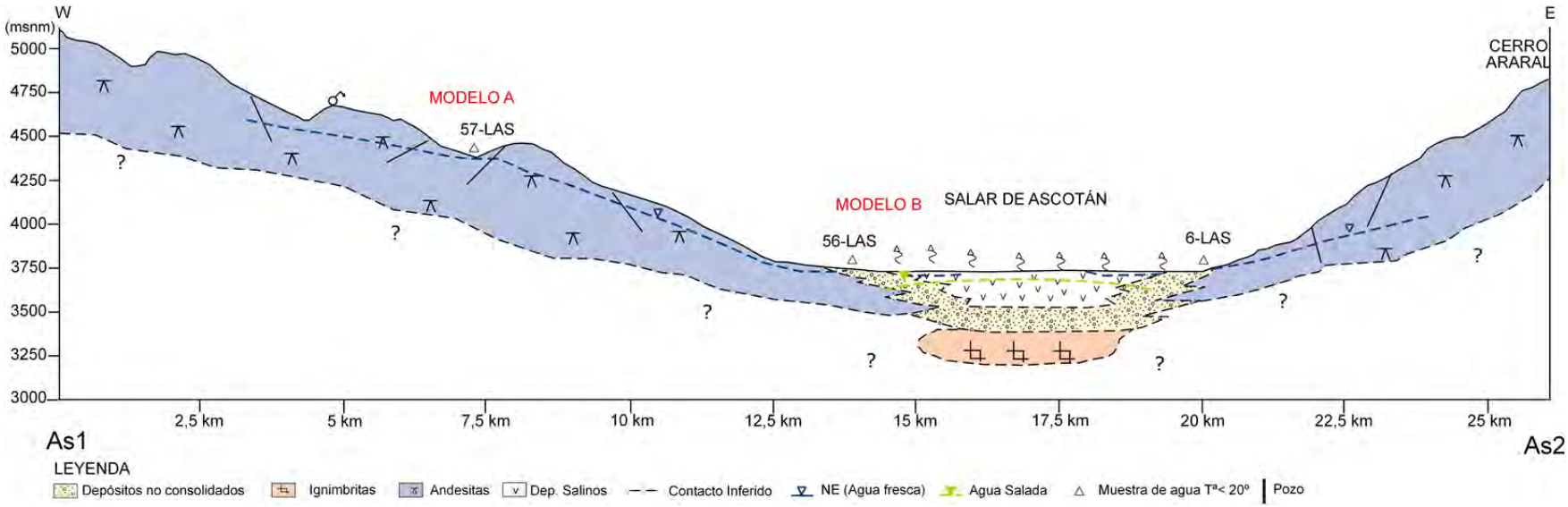


Figura 8-9. Modelo Conceptual Preliminar del salar de Ascotán. El esquema muestra una exageración vertical de acuerdo a las proporciones del perfil. Fuente: elaboración propia.

8.5 SUBCUENCA DE PAMPA PUNO PERFIL PL1-PL2

La subcuenca de Pampa Puno es la de menor dimensión espacial dentro de todas las subcuencas estudiadas. Se localiza en el sector noroeste de la zona de estudio y está limitada por alturas que superan los 4.000 msnm.

Las unidades geológicas más antiguas que afloran en el sector de estudio corresponden con series sedimentarias marinas y continentales del Jurásico. Durante el Cretácico se depositaron las lavas e ignimbritas de la Formación Collahuasi seguidas de las andesitas porfíricas del Eoceno. En discordancia se depositaron los conglomerados, brechas, areniscas de la Formación Papajoy durante el Oligoceno-Mioceno. A continuación se sitúa la ignimbrita de Carcote y el depósito más moderno de todos corresponde con materiales detríticos no consolidados.

En relación con la hidrogeología se han diferenciado 3 unidades que corresponden con la andesita fracturada, la ignimbrita de Carcote también fracturada y las rocas sedimentarias de la Formación Papajoy.

La composición química identificada en la cuenca de Pampa Puno es bicarbonatada cálcica en las 2 muestras analizadas.

En esta zona las vertientes muestreadas están tomadas en la vega Sapunta, la 42-LAV se localizada en la parte alta y la 79-LAV antes de la confluencia con el río Loa.

Los isótopos de la molécula del agua ($\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$) indican que la muestra 42-LAV ha sufrido fraccionamiento por procesos de evaporación en lámina libre, lo cual es coherente ya que fue tomada desde aguas estancadas de los bofedales de vega Sapunta.

En la **Figura 8-10** se muestra el modelo conceptual preliminar que engloba la subcuenca de Pampa Puno y del río Loa.

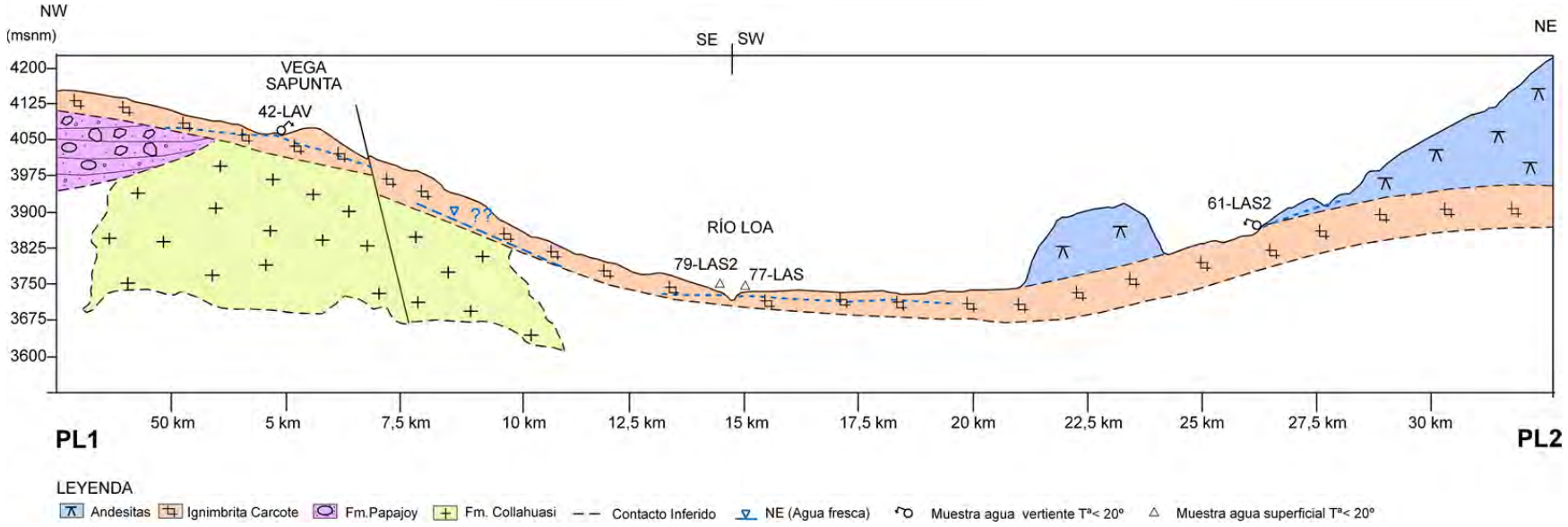


Figura 8-10. Modelo Conceptual Preliminar de la conexión hidráulica subterránia Pampa Puno-Loa. El esquema muestra una exageración vertical de acuerdo a las proporciones del perfil. Fuente: elaboración propia.

8.6 SUBCUENCA DE SAN PEDRO PERFIL P1-P2

La subcuenca de San Pedro se localiza en el sector sureste de la zona de estudio y limita al noreste con el salar de Ascotán y al noroeste con la cuenca del río Loa.

En la zona de la subcuenca de San Pedro se reconoce una estructura tectónica de tipo *graben* formada durante una fase tectónica extensional. El *graben* genera una depresión que está limitada por fallas normales y que se rellena de sedimentos de distintas granulometrías. Se diferencian 3 secuencias de lavas de edades comprendidas entre el Mioceno Superior y el Pleistoceno. Los materiales más modernos están ligados con depósitos no consolidados asociados con la dinámica actual del río San Pedro.

Se han diferenciado 3 unidades hidrogeológicas. La unidad hidrogeológica superior y más actual está constituida por depósitos sedimentarios de origen aluvial. La unidad por debajo de esta corresponde con una alternancia de rocas andesíticas fracturadas, sedimentos piroclásticos y por varios niveles arenosos. Por último, el basamento formado por ignimbrita riolítica constituye la tercera unidad hidrogeológica.

En cuanto a la piezometría las medidas realizadas en terreno indican que los niveles piezométricos más altos se localizan en la cabecera del río San Pedro y en sus vertientes y, por otro lado, los niveles más bajos están registrados en el cauce del río San Pedro.

En esta cuenca se han tomado 7 muestras de agua que corresponden a vertientes y a aguas superficiales. Las aguas de vertientes tienen una composición bicarbonatada mientras que las aguas superficiales son bicarbonatadas cloruradas. Esta evolución en la composición está asociada con la interacción agua-roca que provoca un enriquecimiento en cloruros y sodio principalmente.

Todas las muestras presentan una temperatura superior a los 20ºC que se asocia con la actividad geotermal de los volcanes presentes en la zona, como son los volcanes San Pedro, San Pablo e Inacaliri.

En la subcuenca de San Pedro, exceptuando dos muestras que se tomaron en el cauce del río San Pedro, el resto se rigen de acuerdo con el modelo de flujo de vertientes tipo B.

En relación con los isótopos de la molécula del agua ($\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$), en la subcuenca de San Pedro todas las muestras se sitúan próximas a la RMMM exceptuando la muestra

51-LAV (vertiente del río Siloli) que es más negativa e indica que tiene distinta altura de recarga que el resto de las muestras.

De acuerdo con el esquema de la **Figura 8-11**, se muestra como los depósitos aluviales no consolidados asociados con la dinámica del río San Pedro conforman el acuífero principal en la subcuenca del río San Pedro.

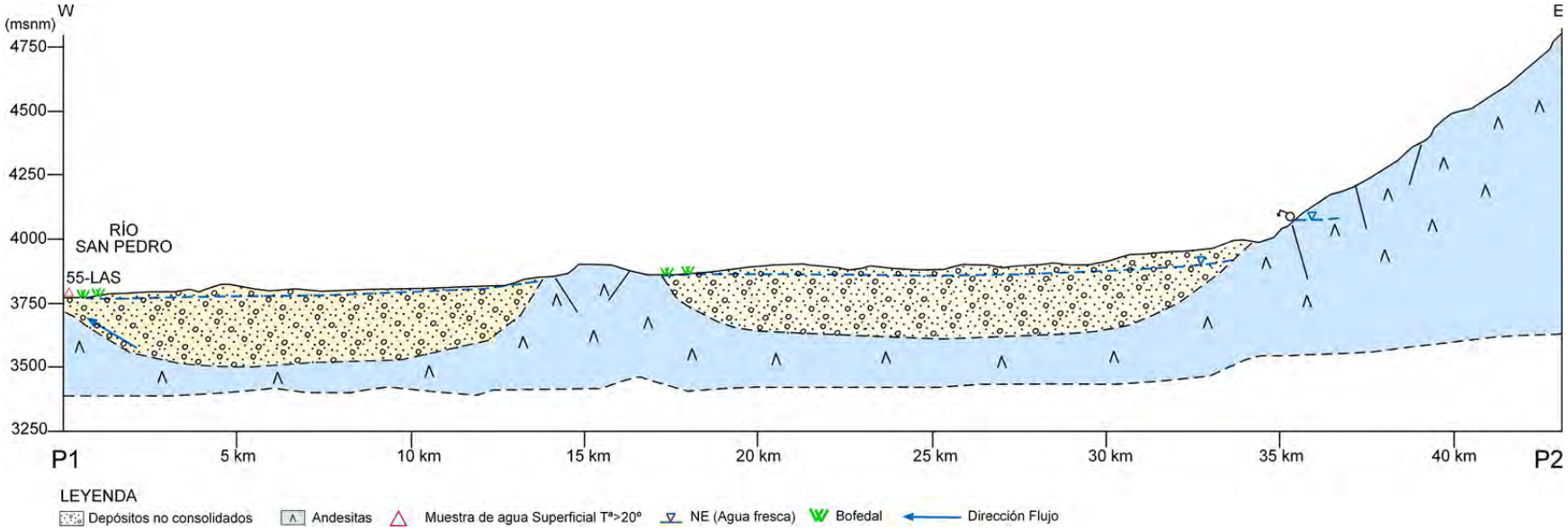


Figura 8-11. Modelo Conceptual Preliminar de la subcuenca de San Pedro. El esquema muestra una exageración vertical de acuerdo a las proporciones del perfil. Fuente: elaboración propia.

8.7 SUBCUENCA DEL RÍO LOA PERFIL L1-L2

La subcuenca del río Loa comprende la mayor parte de la zona de estudio; abarca desde el nacimiento del río Loa, en las faldas del volcán Miño, hasta justo antes de su confluencia con el río Salado.

Geológicamente, esta subcuenca abarca los tres dominios geológicos presentes en la zona de estudio. De oeste a este se encuentran la Sierra del Medio, la Depresión del río Loa y la cordillera de los Andes. La Sierra del Medio está caracterizada por los plegamientos y sistemas de fallas que controlan la disposición de sus unidades geológicas. La Depresión del río Loa presenta a grandes rasgos la ignimbrita Ujina del Mioceno Superior-Plioceno en el sector norte y sur, y la ignimbrita de Carcorte de edad Pliocena en el sector central. Por último, en el dominio del borde oeste de la cordillera de los Andes destaca la presencia de los estrato volcanes andesíticos del Mioceno y Plioceno.

En cuanto a la hidrogeología se han definido las unidades hidrogeológicas en dos sectores muy locales de la zona de estudio. En las proximidades a la represa de Lequena se han definido 4 unidades hidrogeológicas que corresponden con una unidad superficial sedimentaria seca por encima de una unidad de gravas y arenas, una unidad de sedimentos arcillosos y, finalmente, un basamento ignimbrítico.

En el sector de la estación de Polapi se han reconocido 5 unidades hidrogeológicas distintas a las anteriores. La unidad más superficial (Unidad I) está constituida por arenas y gravas; la Unidad II por coladas de lavas andesíticas altamente fracturadas; la Unidad III constituida por flujos ignimbríticos; la Unidad IV está formada por gravas y arenas y la unidad V constituye el basamento formado por estratovolcanes del Mioceno Superior.

Los niveles de agua medidos en terreno indican que existe un flujo desde las vertientes hacia el río Loa y de norte a sur según la propia dirección del río Loa. Sin embargo, no se ha dispuesto de datos suficientes para la realización de una piezometría completa.

La parte alta del río Loa dentro de la cuenca del Loa Alto (nacimiento hasta represa Lequena) el río tiene 3 tipos de aporte de agua. Un aporte sulfatado-clorurado sódico principalmente por la entrada de agua de la quebrada Paco Paco. Una aporte bicarbonatado sódico en la zona límite entre la cuenca con Pampa Puno. Y por último un aporte sulfatado clorurado sódico entre el río Chela y la represa Lequena. En el tramo del río Loa entre Lequena y Chiu Chiu el aporte con mayor importancia en

términos de caudal se produce entre la represa Lequena y la quebrada Taira con una marca clorurada sódica, con agua precipitada a menor altura que en la parte alta de la zona de estudio.

Otro aporte significativo pero de menor magnitud tiene lugar entre la quebrada Taira y la intersección de la cuenca de San Pedro con el cauce del río Loa, a la altura del río Loa. Este aporte se manifiesta por el incremento de la concentración de bicarbonatos, calcio y el aumento del valor de $\delta^{13}C$. Este último especialmente por el posible aporte de aguas subterráneas desde la cuenca del río San Pedro.

En relación con los isótopos de la molécula del agua ($\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$), en la subcuenca del río Loa se aprecian diferencias en la composición isotópica de las muestras debido a que es una zona muy extensa y con alto rango de alturas topográficas. En la parte de la cabecera las muestras están más empobrecidas y a medida que se avanza hacia el sur de la misma se van enriqueciendo.

En la **Figura 8-12** se ha realizado un esquema del funcionamiento del sistema al cierre de la cuenca próximo al poblado de Lasana.

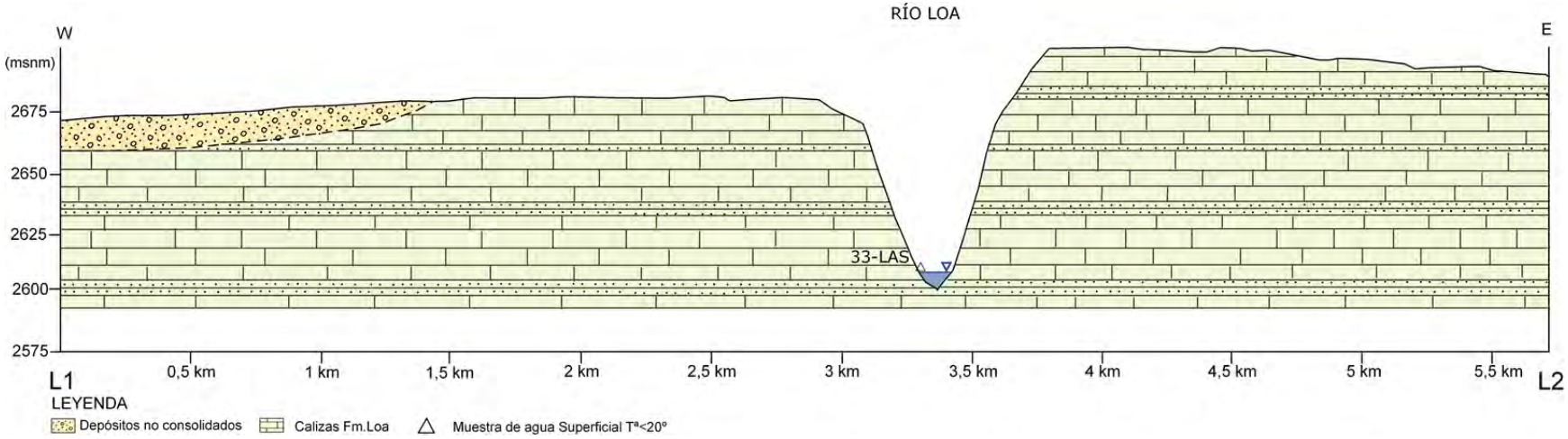


Figura 8-12- Modelo Conceptual Preliminar de la subcuenca de río Loa, en Lasana. El esquema muestra una exageración vertical de acuerdo a las proporciones del perfil. Fuente: elaboración propia.

En el río Loa se ha realizado un análisis de caudales con el objetivo de detectar aumentos o disminuciones de caudales significativos que no sean causados por la recarga de la precipitación producida en la propia cuenca y para ello se han utilizado los aforos realizados por Matraz en la segunda campaña de terreno. Las subcuencas generadas han sido clasificadas por Subcuenca A-4, Subcuenca A-6, Subcuenca A-7, Subcuenca A-8, Subcuenca A-10 y Subcuenca A-11.

En la cuenca del río Loa se observa que hay dos zonas con un mayor aporte de agua al curso superficial desde el acuífero. Estas zonas corresponden, por orden de importancia, a las subcuenca A-4, A-10, y A-11. Comparando las características topográficas, extensión y precipitación se observa que las cuencas A-10 y A-11 tienen una relación caudal del río Loa en función de su extensión y precipitación significativamente mayor al resto (en especial A-10) de subcuencas del río Loa dentro del área de estudio. Además, a partir de la composición química se observa como las aguas del río Loa antes de la quebrada Paco Paco son cloruradas sódicas mientras que las aguas de la propia quebrada son sulfatado-cloruradas sódicas. Aguas debajo de la confluencia la composición en el río Loa es una mezcla entre ambas composiciones siendo su huella química sulfatada-clorurada sódica.

En la Subcuenca A-10 se observa la existencia de un mayor aporte desde el acuífero al río Loa en la Subcuenca A-10. La causa se asocia a un aporte desde la subcuenca del Salar de Ascotán que es explicada en el siguiente subcapítulo de conexión entre subcuencas.

8.8 CONEXIÓN ENTRE SUBCUENCAS

En el modelo conceptual, además del análisis individualizado de cada subcuenca, se ha realizado también el análisis de la conexión hidráulica subterránea que puede existir entre ellas. Esto se ha realizado a partir de los datos hidroquímicos e isotópicos obtenidos y con la ayuda del modelo hidrogeológico.

Las potenciales conexiones hidráulicas subterráneas identificadas han sido 4 y, todas exceptuando una, tienen la subcuenca del río Loa como destino del flujo de las aguas. Estas conexiones corresponderían a la conexión Pampa Puno-Loa, Ascotán-Loa y San Pedro-Loa. La cuarta conexión es la que se produciría entre las subcuencas de Ascotán y Carcote (Ascotán-Carcote) (**Figura 8-13**).

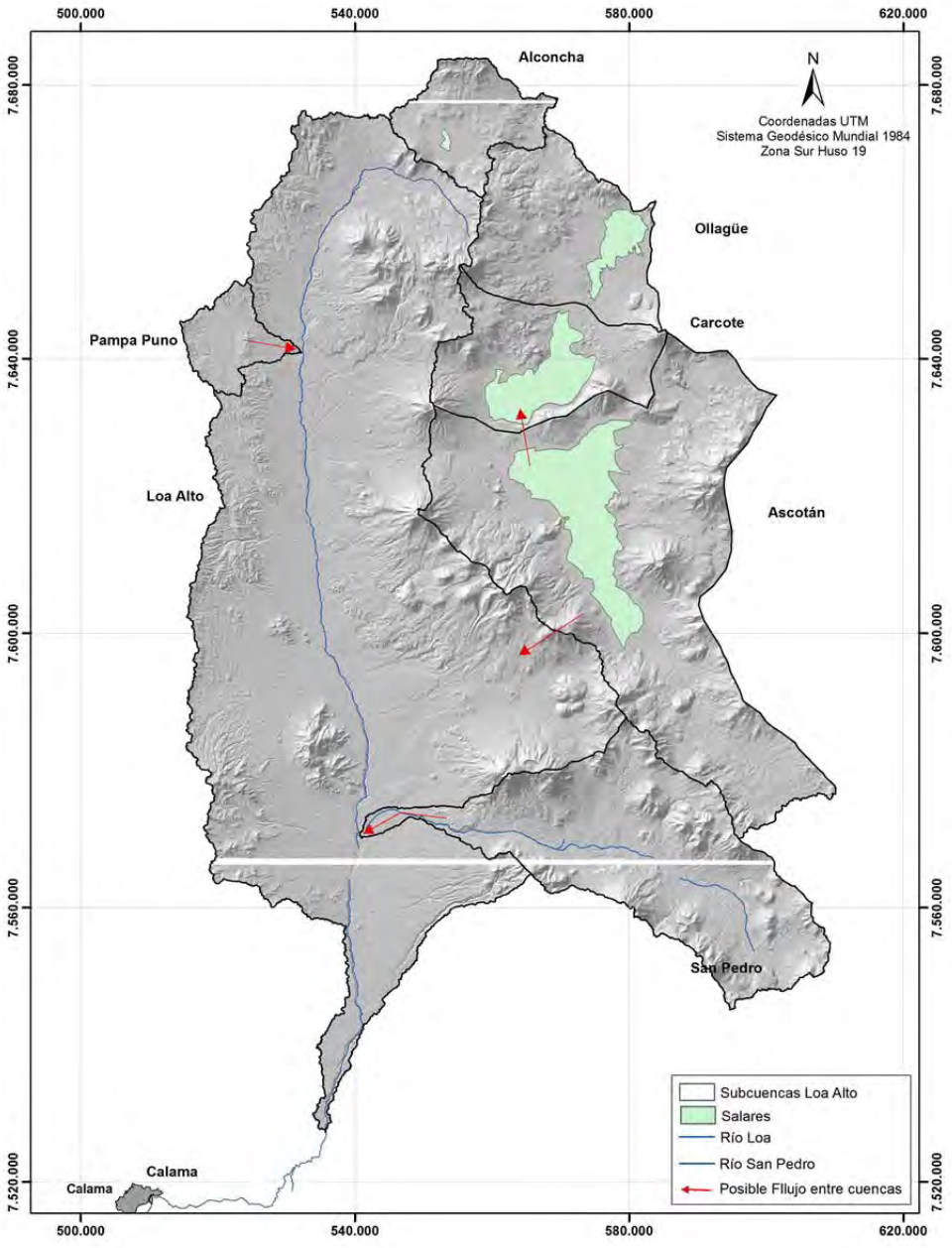


Figura 8-13. Potenciales conexiones hidráulicas subterráneas entre subcuencas. Fuente: elaboración propia.

Por lo que respecta a la conexión Ascotán-Carcote, en los antecedentes MARDONES (Mardones, 1998), en el sector noroeste se observan líneas de flujo subterráneo que van desde la subcuenca de Ascotán hacia el salar de Carcote. Sin embargo, en la zona norte no existen líneas de flujo, indicando que el componente de salida de agua subterránea principal en la subcuenca de Ascotán es la evaporación. El flujo que infiltra

en el salar de Carcote desde el salar de Ascotán fue estimado por MARDONES (Mardones, 1998) en 15-20 l/s.

En la **Figura 8-14** se muestra un esquema entre la subcuenca de Ascotán y la subcuenca de Carcote. A continuación se explican los argumentos que apoyarían esta posible conexión hidrogeológica entre el salar de Carcote y el salar de Ascotán.

- La altura media del salar de Carcote está en torno a los 3.697 msnm mientras que la altura media del salar de Ascotán es de aproximadamente 3.720 msnm, lo que apoyaría un flujo desde Ascotán hacia Carcote.
- En el modelo piezométrico de MARDONES (Mardones, 1998) se propone una conexión directa.
- Las dos subcuencas están separadas por una misma unidad hidrogeológica de andesitas fracturadas y depósitos no consolidado cuaternarios.
- Existe una composición química común: las aguas de ambas cuencas tienen una huella clorurada sódica.

Si bien los antecedentes disponibles sustentan una probable conexión, la información existente no permite ser concluyente al respecto, así como tampoco es posible realizar cálculos que permitan cuantificar el caudal pasante desde una cuenca hacia la otra.

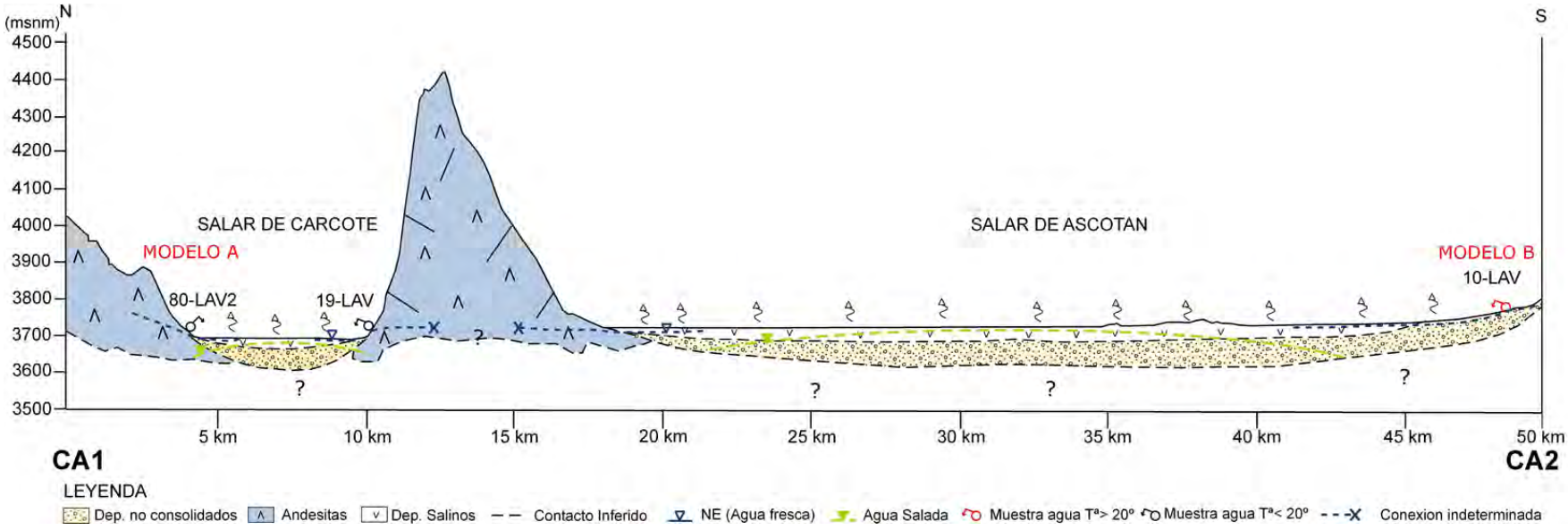


Figura 8-14. Modelo Conceptual Preliminar de la conexión hidráulica subterránea entre Ascotán-Carcote. El esquema muestra una exageración vertical de acuerdo a las proporciones del perfil. Fuente: elaboración propia.

En la **Figura 8-10** se muestra el modelo conceptual preliminar que engloba la subcuenca de Pampa Puno y del río Loa. Tal como se presenta en el esquema conceptual para la cuenca de Pampa Puno, existiría un acuífero en roca fracturada hacia la salida de la cuenca. Este acuífero estaría compuesto por el sector de la Ignimbrita Carcote que posee permeabilidad secundaria, generada por un fracturamiento estructural. La hipótesis que sustenta una posible conexión entre la cuenca de Pampa Puno y la cuenca del Río Loa se basa en la diferencia de gradientes hidráulicos existente entre ambas cuencas, así como la cercanía geográfica y la presencia con continuidad del mismo depósito de ignimbritas fracturadas. La continuidad de la Ignimbrita Carcote entre ambas cuencas permite proponer la continuidad hidráulica del acuífero. Siguiendo esta hipótesis, se estima que si los recursos hídricos subterráneos de Pampa Puno no fuesen a desembocar hacia la cuenca del río Loa, estos deberían acumularse en la propia cuenca y generar depósitos evaporíticos, tal como sucede con otras cuencas endorreicas de la región, sin embargo esta situación no se observa. Más aun, la piezometría de la subcuenca de Pampa Puno muestra líneas de flujo con dirección suroeste-noreste hacia Vega Sapunta donde se observa afloramiento en superficie de aguas subterráneas que crean una zona de bofedales. Sin embargo, aguas más abajo y debido a la estructura geológica formada por un sistema de fallas normales, estas aguas se infiltran. Por otro lado, en la quebrada Sapunta y antes de la confluencia con el río Loa las aguas subterráneas vuelven a aflorar en superficie aunque sin conexión superficial con la subcuenca del río Loa. La composición isotópica en $\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$ entre estas dos muestras, las muestras de agua en la Vega Sapunta 42-LAV y la muestra en la Quebrada Sapunta en las proximidades del río Loa, tienen una misma altura de recarga, apoyando la hipótesis de contribución de la subcuenca de Pampa Puno a la subcuenca del río Loa.

Si bien los antecedentes disponibles sustentan una probable conexión, la información existente no permite ser concluyente al respecto, así como tampoco es posible realizar cálculos que permitan cuantificar el caudal pasante desde una cuenca hacia la otra.

En la **Figura 8-15** se muestra el esquema del modelo conceptual con la posible conexión entre el salar de Ascotán y la cuenca del río Loa. Esta conexión se basa en la diferencia de gradientes hidráulicos entre ambas cuencas y se produciría mediante la conectividad subterránea generada por fallas y fracturas de la unidad de estratovolcanes andesíticos. Estos depósitos se ubican entre ambas subcuencas, y se siguen con claridad desde el sector oeste central de la subcuenca de Ascotán, **Figura 8-2**. Esta hipótesis es coherente también con la información química de las aguas de

ambos sectores ya que en la cuenca del Loa se observa un cambio de composición química de las aguas, pasando de sulfatada-clorurada sódica en la cabecera y sector medio a clorurada sódica. En la subcuenca de Ascotán las aguas son cloruradas sódicas lo que apoyaría la hipótesis de un aporte subterráneo desde Ascotán.

Si bien los antecedentes disponibles sustentan una probable conexión, la información existente no permite ser concluyente al respecto, así como tampoco es posible realizar cálculos que permitan cuantificar el caudal pasante desde una cuenca hacia la otra.

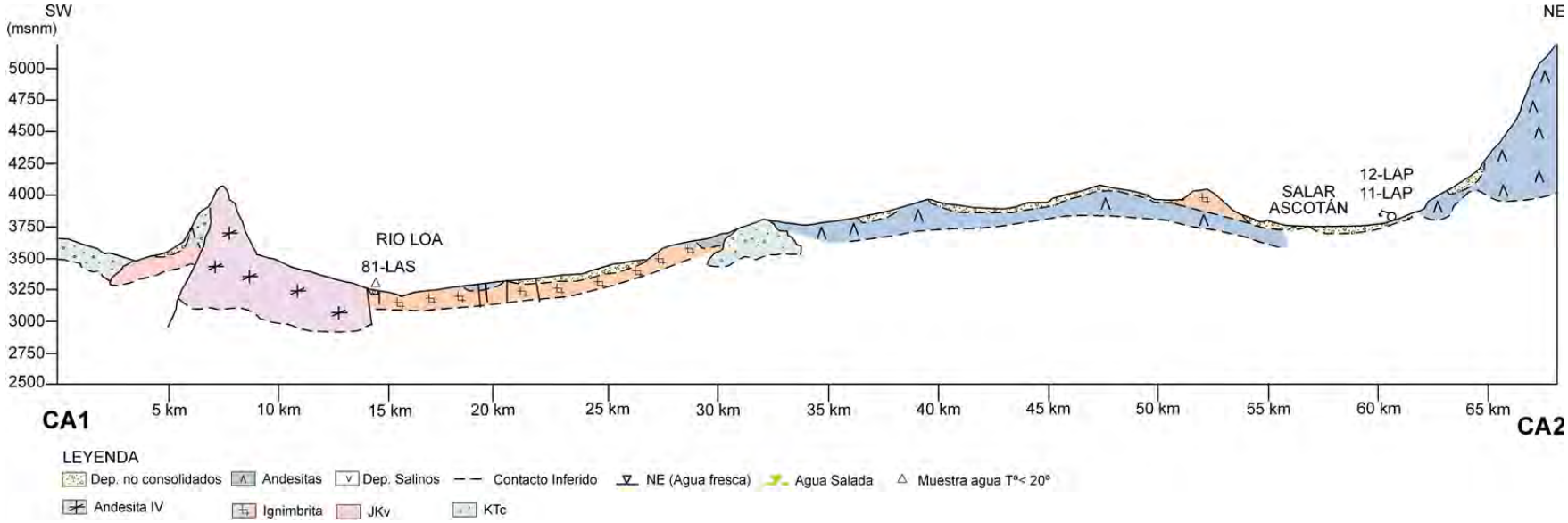


Figura 8-15- Modelo Conceptual Preliminar de la conexión hidráulica subterrània Ascotán-Loa. El esquema muestra una exageración vertical de acuerdo a las proporciones del perfil. Fuente: elaboración propia.

9 DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Se realizó una completa caracterización de los recursos hídricos del área de estudio definida como Loa Alto. Esta caracterización se construyó a partir de cuatro campos básicos que definen el ciclo hídrico: la geología, la hidrología, hidrogeología e hidroquímica. En todas y cada una de estas disciplinas se profundizó en el conocimiento del funcionamiento del sistema hídrico, teniendo en consideración la gran extensión y heterogeneidad del área y la complejidad de las relaciones entre las diferentes subcuencas que componen la región denominanda Loa Alto.

Una de las características únicas de este proyecto de modelación, es la representación de toda la información de forma integrada y la búsqueda de las relaciones de interconexión de las diferentes áreas que componen al conjunto. Esta metodología de representación de los recursos hídricos y la visión integrada se realizó para distintas escalas de trabajo, y por lo tanto permite lograr una visión completa de la región, facilitando la gestión de los acuíferos y los cursos superfciales. Los trabajos realizados hasta la fecha en la zona se orientan a definir y abordar ámbitos locales y particulares, con un alcance más reducido o con objetivos centrados en la observación de aspectos particulares del funcionamiento hídrico. Se ha levantado información hidroquímica e integrado la información existente de toda la cuenca del Loa Alto, se han definido acuíferos y masas de agua, y se desarrolla el modelo conceptual hidrogeológico de la cuenca del Loa Alto.

Las principales zonas de recarga de la zona de estudio se caracterizan mediante la hidrología, hidrogeología, hidroquímica e isotopía. Mediante la hidrología se observa que las zonas con mayor altitud (>4000 msnm) es donde se produce la mayor precipitación, donde predomina la unidad hidrogeológica de andesita fracturada, que mediante el contacto agua-roca aporta a la composición hidroquímica los sulfatos, arsénico y sílice. El agua de recarga se caracteriza hidroquímica e isotópicamente por una relación SO_4/Cl mayor a 1 y por tener valores de $\delta^{13}C$ comprendidos entre -15 y -5‰ VPDB.

En la zona de estudio se han delimitado dos dominios hidroquímicos principales. Un dominio sulfatado formado por las subcuencas de Alconcha, Ollagüe y la subcuenca del río Loa entre su nacimiento hasta la represa Lequena. Otro dominio clorurado sódico que abarca la zona de la subcuenca del río Loa desde la represa Lequena hasta Chiu Chiu y las subcuencas de Carcote, Ascotán y San Pedro.

La integración de la información señalaría una posible conexión entre la subcuenca de Ascotán y la parte sur de la subcuenca del río Loa. La hidrología pone de manifiesto que hay un posible aporte desde el acuífero hacia el río Loa. La semejanza entre las composiciones hidroquímicas e isotópicas también apuntan a una conexión entre Ascotán y el río Loa. Las subcuencas de Ascotán y Loa limitan entre sí con las mismas unidades geológicas y estructurales, esto podría explicar su similitud en la huellas hidroquímica e isotópica.

La probable interconexión entre las cuencas endorreicas de Ascotán y Carcote tiene argumentos a favor y en contra. Los datos con los que se dispone no son suficientes para concluir afirmativamente o descartar el flujo de agua entre las dos subcuencas. Para determinar conclusivamente la existencia de conexión hídrica entre las dos subcuencas se necesitaría de una red depiezómetros en la zona límite entre Ascotán y Carcote.

La conexión entre las subcuencas de Carcote y Ollagüe se podría estudiar si se dispusiera de información hidroquímica de Ollagüe en el límite con la subcuenca de Carcote.

Existiría un aporte de la subcuenca de Pampa Puno a la subcuenca del río Loa, que se reflejaría en la similar marca hidroquímica del agua superficial del río Loa en el encuentro de la quebrada Sapunta con el Loa y en la misma altura de recarga entre las muestras de la Vega Sapunta (42-LAV) y Quebrada Sapunta (79-LAV2) que muestra su composición isotópica de $\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$.

A partir de la hidroquímica, de la hidrología y las observaciones en terreno se ha redefinido la delimitación de las subcuencas de Alconcha y Ollagüe. El agua de las vertientes muestreadas y denominadas en este estudio 22-LAV2 (inicialmente dentro de la subcuenca de Ollagüe), 23-LAV2 y 24-LAV2 (inicialmente dentro de la subcuenca de Alconcha) quedarían fuera hidrogeológicamente fuera de la cuenca del Loa Alto. Es decir, el presente estudio propone que las 2 vertientes situadas en Puquios y la vertiente situada en Kosca no pertenecerían a las subcuencas de Alconcha y Ollagüe, si no a la cuenca del Salar de Laguani. En la **Figura 9-1** se presenta el mapa con la redelimitación propuesta a partir de la información obtenida en el presente estudio.

Figura 9-1. Redelimitación de las subcuencas propuesta por el presente estudio. Fuente: elaboración propia.

10 RECOMENDACIONES

Se realizó el levantamiento de la información hidrogeoquímica e isotópica en la cuenca del Loa Alto, región de Antofagasta. El resultado obtenido en este informe ha sido una modelo preliminar de la cuenca del Loa Alto y de las subcuencas que lo constituyen. Este diagnóstico ha permitido identificar actividades orientadas a definir, caracterizar y acotar las interrogantes e incertezas sobre las variables más sensibles para el conocimiento hidrogeológico del modelo conceptual de la zona de estudio.

Se propone la ejecución de actividades de investigación futuras que permitan abordar aquellos aspectos que requieren un mayor conocimiento del proyecto. Estas actividades han sido categorizadas de acuerdo al orden en que deben ser ejecutadas y a la urgencia temporal que impone la medición de variables para conocer con mayor detalle incertidumbres detectadas en el presente informe:

- Actividades prioritarias: aquellas actividades fundamentales para complementar el estudio preliminar del río Loa analizado a partir de los aforos y del análisis hidroquímico en el río Loa en las campañas de terreno efectuadas en este estudio.
- Actividades secundarias: aquellas actividades que aclaran los interrogantes planteados en el modelo preliminar de cada subcuenca de los salares definida en el informe. Estas propuestas se realizan particularmente para la subcuenca del salar de Alconcha, de Puquios y Kosca y de la conexión entre el salar de Carcote y Ascotán debido a la necesidad de un estudio más detallado y específico en cada una de ellas.

10.1 ACTIVIDADES PRIORITARIAS

Construcción de red de piezómetros. Estos piezómetros están orientados al desarrollo de piezometrías, investigación de las unidades hidrogeológicas, monitoreo de niveles y toma de muestras para hidroquímica. Se propone la construcción de piezómetros de pequeño diámetro (3” diámetro interno) mediante el método de perforación diamantina, con el fin de identificar las unidades geológicas. Estos piezómetros deberían quedar habilitados para la medición de nieveles y muestreo de química. Una adecuada ubicación y distribución de los piezómetros permite definir un correcta sección para calcular el caudal que aporta las siguientes áreas según la ley de Darcy.

Se diferencian tres sectores en los que se construirá una red de piezómetros en cada una:

- Quebrada Paco Paco, ubicada al suroeste del volcán Miño se propone construir 10 piezómetros distribuidos alrededor de esta quebrada y el río Loa. Con el fin de definir el caudal exacto que aporta este sector al río Loa, ya que el presente estudio define este sector como una zona importante de recarga de agua al río Loa.
- En el sector este del río Loa desde la represa Lequena (Aforo 8) hasta el Aforo 11 se recomienda construir 20 piezómetros para comprobar la conexión o desconexión entre el río Loa y la subcuenca del salar de Ascotán, ya que ha quedado cuestionada en el presente informe.
- En el sector del vado de Santa Bárbara y el entorno de la confluencia del río San Pedro se podrían construir 10 piezómetros, con el objetivo de cuantificar el caudal que aporta subterráneamente el río San Pedro al río Loa.

Programa de muestreo hidroquímico semestral. Diseñado para determinar la calidad del agua subterránea y su evolución estacional. El programa de muestreo y análisis se efectuaría semestralmente en los piezómetros construidos en la actividad anterior para determinar la variación estacional en la composición hidroquímica del agua subterránea.

Revisión del estado y condición de las estaciones de aforo pre-existentes. Re-acondicionamiento y puesta en marcha para el comienzo de registro del nivel de agua superficial en la estación de aforo pre-existente en la quebrada Paco Paco.

Instalación de una estación de aforo. Se propone la instalación de una estación de aforo en el cauce del río Chela en el tramo más próximo a la confluencia al río Loa. Esta configuración permite establecer un monitoreo detallado del aporte superficial del río Chela al río Loa.

10.2 ACTIVIDADES SECUNDARIAS

Subcuenca del salar de Alconcha:

- Programa de muestreo hidroquímico semestral. Ejecución de una campaña de muestreo hidroquímico de mayor densidad de puntos de vertientes y con acceso a los pozos pre-existentes en el salar de Alconcha, con el fin de definir la caracterización hidroquímica a nivel de detalle de esta subcuenca. Esta

actividad complementa el conjunto de datos de marcas químicas obtenidos en el presente estudio.

Subcuenca del salar de Ollagüe:

- Construcción y monitoreo de una red de piezómetros. Es necesario construir una red de 15 piezómetros pequeño diámetro (3" diámetro interno) en el sector de Puquios, en la subcuenca de Alconcha, y de Kosca, en el norte de Ollagüe. Estos piezómetros deberían quedar habilitados para la medición de nieveles y muestreo de química. El objetivo de esta actividad es el desarrollo de piezometrías, reconocimiento de las unidades hidrogeológicas, monitoreo de niveles y toma de muestras para el análisis hidroquímico, ya que en este estudio se ha detectado que las aguas superficiales de estos sectores fluyen hacia el salar de Laguani y de Chiguana.
- Sectorización del sector Puquios y Kosca. Se recomienda la sectorización de esta zona según el modelo hidrogeológico elaborado a partir de los resultados obtenidos en la actividad anterior.

Subcuenca del salar de Carcote y de Ascotán:

- Construcción y programa de monitoreo de una red de piezómetros. La perforación de 15 piezómetros en la zona noroeste de la subcuenca del salar de Ascotán y al sureste del salar de Carcote, aclara la incógnita existente entre ambas subcuencas. La perforación de los piezómetros pequeño diámetro (3" diámetro interno) mediante diamantina facilita el reconocimiento a nivel de detalle de las unidades geológicas existentes. Estos piezómetros deberían quedar habilitados para la medición de niveles y muestreo de química. La medición de los niveles de agua en los piezómetros construidos permite desarrollar una piezometría detallada en la zona de incertidumbre que limita las dos subcuencas y determinar el estado de conexión entre ambas subcuencas.

11 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACOSTA, O.; GUIMERÀ, J.; CUSTODIO, E; ANSÓN, I; DELGADO, J.L. Contribución al conocimiento de la hidrogeología de las cuencas intraandinas del N de Chile. En González, N., Kruse, E.E., Trovatto, M.M., Laurencena, P. (eds). Agua Subterránea Recurso Estratégico. Editorial de la Universidad de La Plata (Edulp). La Plata. Argentina, 2013. Tomo 1: 118–125. ISBN: 978–987–1985–03–6.

AGUA INGENIEROS CONSULTORES LIMITADA. Servicios de asesoría para la prospección Hidrogeológica del Alto Loa, cuenca río San Pedro-Inacaliri. Corporación Nacional del Cobre, División Chuquicamata, Santiago, 1985. 76 p.

APPELO, C.; POSTMA, D. Geochemistry, groundwater and pollution. Bélgica, 2009. 648 p.

AQUATERRA INGENIEROS LIMITADA. Estimación de recargas en cuencas altiplánicas y precordilleranas de vertiente pacífica. Dirección General del Agua (DGA), Santiago, 2011. 205 p.

ARAVENA, Ramón; SUZUKI, Osamu. Isotopic Evolution of River Water in the Northern Chile Region. **En: Water Resources Research**. Vol. 26, Nº12, , 1990. 2887-2895 p.

ARAVENA, R.; SUZUKI, O.; PEÑA, H.; POLLASTRI, A.; FUENZALIDA, H.; GRILLI, A.. Isotopic composition and origin of the precipitation in Nothern Chile. **En: Applied geochemistry**. 14. 1999. 411-422 p.

ARCADIS CHILE. Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Sistema de impulsión de agua Lequena –Ujina. Capítulo 2 linea de base, geología, geomorfología y riesgo. Compañía minera Doña Inés de Collahuasi SCM (CMDIC). Santiago, 2011. 19 p.

CADE-IDEPE CONSULTORES EN INGENIERÍA. Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad, Cuenca río Loa. Dirección General del Agua (DGA), Santiago, 2004. 149 p.

CICA INGENIEROS CONSULTORES. Estudios Ambientales por extracción de aguas subterráneas en la cuenca del salar de Ascotán. Corporación Nacional del Cobre-División Chuquicamata, Santiago, 1998. 400 p.

CLARK, Ian; FRITZ, Peter. Enviromental Isotopes in Hidrogeology. Ottawa, Canadá. 1997. 311 p.

DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS. 2012. Diagnóstico plan estratégico para la gestión de los recursos hídricos, Región de Antofagasta. Santiago, Diciembre, 2012. 68 p.

DOMENICO, Patrick A.; SCHWARTZ, Franklin W. Physical and Chemical Hydrogeology. Second Edition. John Wiley &Sons, Inc. 1999. 506 p.

ESPILDORA, Basilio, et al. Estudio hidrológico y operacional del sistema embalse Conchi – río Loa. Ministerio de Obras Públicas. Dirección de Riego. Santiago, Febrero, 1979. 210 p.

FAO, ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA AGRICULTURA Y LA ALIMENTACIÓN. Guía para la descripción de suelos. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación (FAO). Roma, Italia. 2009. 111 p.

FALCÓN, Eduardo. Volumen de agua subterránea almacenada en la cuenca San Pedro-Inacaliri, Segunda Región. Corporación Nacional del Cobre, Santiago. 1987. 4 p.

FERROCARRIL DE ANTOFAGASTA A BOLIVIA (FCAB). Estudio hidrogeológico y modelo de simulación, sector estación Polapi, II Región. Dirección General de Aguas. Santiago. 2003. 350 p.

FETTER, C. W. Applied Hydrogeology. Pearson Education. New Jersey, 2001. 598 p.

FUENTES, J. Análisis morfométrico de cuencas: caso de estudio del Parque Nacional Pico de Tancítaro. Dirección General de Investigación de Ordenamiento Ecológico y Conservación de Ecosistemas. Insituto Nacional de Ecología. México. 2004.

FUNDACIÓN CENTRO INTERNACIONAL DE HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA (FCIHS). Hidrogeología – Conceptos Básicos de Hidrología Subterránea. Barcelona. 2009. 768 p.

GCF INGENIEROS LIMITADA. Actualización de la evaluación de la disponibilidad de recursos hídricos para constituir derechos de aprovechamiento en las subcuencas afluentes al salar de Atacama. S.I.T. Nº 210. Dirección General de Aguas (DGA). Santiago, Enero. 2010. 277 p.

GEODATOS LIMITADA. Estudio geofísico cuenca Ojos de San Pedro-Incaliri. Informe resumen. Corporación Nacional del Cobre, División Chuquicamata. Santiago. 1985. 42 p.

GEODATOS LIMITADA. Estudio geofísico cuenca Ojos de San Pedro-Inacaliri. Revisión de avance Nº4. Corporación Nacional del Cobre, División Chuquicamata. Santiago. 1986. 13 p.

GEODATOS LIMITADA. Estudio geofísico Cuencas Ojos de San Pedro-Inacaliri. Revisión de resultados. Corporación Nacional del Cobre-División Chuquicamata. Santiago, 1986. 13 p.

GP CONSULTORES LIMITADA. Plan de alerta temprana de Pampa Puno del proyecto Suministro, construcción y operación de aducción Pampa Puno. Corporación Nacional del Cobre, Santiago, 2008. 166 p.

IGME. Isótopos ambientales en el ciclo hidrológico. Madrid, 2002. 596 p.

IGSA CONSULTORES. Evaluación de Impacto Ambiental Proyecto Extracción Minera en Salar de Carcote. Sociedad Química y Minera de Chile (SQM). Santiago. 311 p.

INGEOREC LIMITADA. Hidrogeología y modelo de simulación Pampa Puno. Corporación del Cobre, División Chuquicamata. Santiago, 2001. 237 p.

LINGSCH, Mario. Modelo de simulación y planificación hidrológico y de constitución química: su aplicación a la cuenca del río Loa, Provincia de Antofagasta. Departamento de Estudios y Planificación. Santiago, 1975-1976. 350 p.

MARDONES, Léonardo. Flux et évolution des solutions salines dans les systèmes hydrologiques des salars d´Ascotán et d´Atacama. Tesis Doctoral. Universidad de Paris-Sur. Paris. 1998. 203 p.

MATRAZ CONSULTORES ASOCIADOS LIMITADA. Estudio acuífero de Calama sector Medio del río Loa, Región de Antofagasta. Dirección General de Aguas (DGA), Santiago. Diciembre, 2012. 233 p.

MAY, Geoffrey ; HARTLEY Adrian J. ; CHONG, Guillermo ; STUART, Fin ; TURNER, Peter ; KAPE, Stephanie J. Eocene to Pleistocene lithostratigraphy, chronostratigraphy and tectono-sedimentary evolution of the Calama Basin, northern Chile. En : Revista Geológica de Chile, Santiago, Vol. 32, Nº1. 2005. 33-58 p.

MUÑOZ P, J. 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. Parte III: Hidrología Regional del Altiplano de Chile. S.I.T. Nº 157. Ministerio de obras públicas, Dirección general de Aguas (DGA). Santiago, 2008. 155 p.

NCh 409/1. Of2005. Norma chilena oficial. Agua Potable. División de Normas del Instituto Nacional de Normalización. Chile.

NIEMEYER, Hans. Estudio de la contaminación del río Loa. Dirección General de Aguas (DGA). Santiago, 1968. 73 p.

NIEMEYER, Hans. Hoyas Hidrográficas de Chile, Segunda Región. Dirección General de Aguas (DGA), Santiago. 1980-90. 97 p.

NORTERO, E. (s.f.) El Nortero. Recuperado el 02 de febrero de 2012, de www.elnortero.cl

OMS, WORLD HEALTH ORGANIZATION. Guidelines for drinking-water quality.Vol 1. Geneva. 2008. 668 p.

RAMÍREZ, Carlos .F. y HUETE, Carlos. Hoja Ollagüe, Región de Antofagasta. Serie Carta Geológica de Chile escala 1:250.000. Instituto de Investigaciones Geológicas (IIG). Santiago, 1981. 47 p.

RISACHER, François; ALONSO, Hugo; SALAZAR, Carlos. Geoquímica de aguas en cuencas cerradas: I, II y III Regiones – Chile. S.I.T Nº51. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas (DGA)-UCN-IRD. Santiago, Enero, 1999. 299 p.

SCHLUMBERGER WATER SERVICES CHILE LIMITADA. Actualización del modelo conceptual hidrogeológico y desarrollo de un modelo numérico. Plan de manejo ambiental. Salar de Ascotán. Sociedad Contractual Minera EL ABRA. Santiago, 2009. 64 p.

SGA LIMITADA. Declaración de Impacto Ambiental Proyecto Estudio hidrogeológicos salar de Alconcha. Anexo Nº3, Estudio de Línea Base. Cía Minera Quebrada Blanca. Santiago, 2007. 112 p.

TASSI, F.; AGUILERA, F.; DARRAH, T.; VASELLI, O.; CAPACCIONI, B. ; POREDA, R.J. ; DELGADO, A. . Fluid geochemistry of hydrothermal systems in the Arica-Parinacota, Tarapacá and Antofagasta regions (northern Chile). **En: Journal of Volcanology and Geothermal Research**. 2010. 15 p.

TOMLINSON, Andrew J.; BLANCO P, Nicolás; MAKSAEV J., Víctor; DILLES, John H.; GRUNDER, Anita L.; LADINO U., Marco. Geología de la precordillera Andina de Quebrada Blanca-Chuquicamata, Regiones I y II (20º30'-22º30'S). Servicio Nacional de Geología y Minería. Santiago, 2001. 455 p.

USDA, United Estates Department of Agriculture. Diagnosis and Improvement od Saline and Alkali Soils. Agriculture Handbook Nº 60. United Estates Department of Agriculture (USDA). Washington, 1954. 159 p.

VILLABLANCA, Daniela; HERRERA, Christian; PUEYO M., Juan José. Uso de perfiles de conductividad eléctrica e isótopos estables para estudiar la relación de agua dulce-agua salada: Salar de Ascotán. Congreso Geológico Chileno, Antofagasta, Agosto, 2006. 4 p.

VILLABLANCA, Daniela. Estudio de la relación isotópica $\delta^{18}O/\delta^{2}H$ de los manantiales en el sector de las nacientes del Loa, Región Antofagasta. XII Congreso Geológico Chileno, Santiago, Noviembre, 2009. 4 p.