GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS
DEPARTAMENTO ADMINISTRACIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS

DIAGNÓSTICO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN ACUÍFEROS DE LA II Y IV REGIÓN

INFORME FINAL

REALIZADO POR:

SUEZ MEDIOAMBIENTE CHILE, S.A.

S.I.T. N° 411

Santiago, Abril 2017

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS

MINISTRO
Sr. Alberto Undurraga Vicuña

Director General de Aguas
Sr. Carlos Estévez Valencia

JEFE DARH
Luis Alberto Moreno Rubio

Inspector Fiscal
Sr. Luis Benedicto Vidal López

SUEZ MEDIOAMBIENTE CHILE, S.A.

Jefe de Proyecto
Hidrogeólogo Senior Francisco Romero Miranda

Profesionales:

Especialista Hidrogeólogo Alberto Barrera
Especialista Hidrología José García Coba
Especialista SIG Jorge Mena
Especialista Terreno Pau Barceló Mendoza
Especialista Geofísica Juan Carlos Parra

ÍNDICE

1 INTRODUCCIÓN 1
2 OBJETIVOS 2
3 ALCANCES Y ACTIVIDADES 4
4 LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA Y COBERTURA DE ESTUDIO 5
5 II REGIÓN. CUENCA SALAR DE IMILAC – SALAR DE PUNTA NEGRA 6
5.1 RECOPILACIÓN Y ANÁLISIS DE ANTECEDENTES 6
5.2 CATASTRO DE CAPTACIONES Y MEDICIÓN DE NIVELES 53
5.2.1 REVISIÓN DEL CATASTRO PÚBLICO DE DERECHOS DE LA II REGIÓN 53
5.2.2 REVISIÓN DE EXPEDIENTES DE SOLICITUDES OTORGADAS EN LA II REGIÓN 57
5.2.3 CAMPAÑA DE MEDICIÓN DE NIVELES 63
5.3 CARACTERIZACIÓN GEOMORFOLÓGICA 70
5.3.1 DESCRIPCIÓN GENERAL 70
5.3.2 DELIMITACIÓN CUENCAS Y SUBCUENCAS 73
5.3.3 DEFINICIÓN DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA 79
5.4 ANÁLISIS DE VARIABLES HIDROMETEOROLÓGICAS 81
5.4.1 PRECIPITACIONES 82
5.4.2 TEMPERATURA 96
5.4.3 EVAPORACIÓN 104
5.5 CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA 122
5.5.1 PALEOZOICO 122
5.5.2 MESOZOICO 124
5.5.3 CENOZOICO 125
5.5.4 CUATERNARIO 126
5.6 CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA 129
5.7 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA 137
5.7.1 DEFINICIÓN DE ACUIFEROS 137

5.7.2 GEOMETRÍA DE LOS ACUÍFEROS 138
5.7.3 PIEZOMETRÍA 151
5.7.4 EVOLUCIÓN PIEZOMÉTRICA 157
5.7.5 PARÁMETROS ELÁSTICOS 172
5.8 MODELO CONCEPTUAL 177
5.8.1 HIDROLOGÍA 177
5.8.2 GEOLOGÍA 178
5.8.3 HIDROGEOLOGÍA 179
5.8.4 DETERMINACIÓN DE SHAC 184
5.9 BALANCE HÍDRICO 185
5.9.1 DEFINICIÓN DE BALANCE HÍDRICO 185
5.9.2 BALANCE HÍDRICO DEL ACUÍFERO 187
5.9.3 BALANCE HÍDRICO DE LA CUENCA 197
5.10 SELECCIÓN DEL SHAC A MODELAR 199
5.11 MODELO NUMÉRICO DEL ACUÍFERO DE LAS CUENCAS DEL SALAR DE PUNTA NEGRA Y SALAR DE IMILAC 202
5.11.1 DISCRETIZACIÓN Y MALLADO DEL MODELO 202
5.11.2 GEOMETRÍA DEL MODELO 203
5.11.3 PARÁMETROS ELÁSTICOS 208
5.11.4 CONDICIONES INICIALES 211
5.11.5 CONDICIONES DE CONTORNO 213
5.11.6 PUNTOS DE OBSERVACIÓN 223
5.11.7 EJECUCIÓN DEL MODELO 225
5.11.8 CALIBRACIÓN DEL MODELO 225
5.11.9 VALIDACIÓN DEL MODELO 235
5.11.10 RESULTADOS OBTENIDOS 236

5.11.11 ESCENARIOS FUTUROS 253

6 IV REGIÓN. SUBCUENCAS DEL RÍO CLARO Y RÍO TURBIO 291

6.1 RECOPILACIÓN Y ANÁLISIS DE ANTECEDENTES 291

6.2 CATASTRO DE CAPTACIONES Y MEDICIÓN DE NIVELES 376

6.2.1 REVISIÓN DEL CATASTRO PÚBLICO DE DERECHOS DE LA IV REGIÓN 376

6.2.2 REVISIÓN DE EXPEDIENTES DE SOLICITUDES OTORGADAS EN EL ÁREA DE ESTUDIO 379

6.2.3 CAMPAÑA DE MEDICIÓN DE NIVELES 381

6.3 CARACTERIZACIÓN GEOMORFOLÓGICA 387

6.3.1 DESCRIPCIÓN GENERAL 387

6.3.2 DELIMITACIÓN CUENCAS Y SUBCUENCAS 390

6.3.3 DEFINICIÓN DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA 395

6.4 ANÁLISIS DE VARIABLES HIDROMETEOROLÓGICAS 398

6.4.1 PRECIPITACIONES 399

6.4.2 TEMPERATURA 412

6.4.3 ANÁLISIS DE CAUDALES 421

6.4.4 EVAPORACIÓN 439

6.4.5 ZONAS DE EVAPORACIÓN 440

6.4.6 EVAPORACIÓN DESDE LÁMINA LIBRE (LAGUNAS) 442

6.4.7 EVAPOTRANSPIRACIÓN DESDE VEGETACIÓN 443

6.5 CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA 445

6.5.1 PALEOZOICO 445

6.5.2 MESOZOICO 446

6.5.3 CENOZOICO 448

6.5.4 CUATERNARIO 448

6.6 CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA 451

6.7 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA 458

6.7.1 DEFINICIÓN DE ACUIFEROS 458
6.7.2 GEOMETRÍA 458
6.7.3 PIEZOMETRÍA 476
6.7.4 EVOLUCIÓN PIEZOMÉTRICA 480
6.7.5 PARÁMETROS ELÁSTICOS 490
6.8 MODELO CONCEPTUAL 495
6.8.1 HIDROLOGÍA 495
6.8.2 GEOLOGÍA 496
6.8.3 HIDROGEOLOGÍA 497
6.8.4 DETERMINACIÓN DE SHAC 499
6.9 BALANCE HÍDRICO 500
6.9.1 DEFINICIÓN DE BALANCE HÍDRICO 500
6.9.2 BALANCE HÍDRICO DEL ACUÍFERO 502
6.9.3 BALANCE HÍDRICO DE LA CUENCA 515

7 LIMITACIONES 518
8 CONCLUSIONES GENERALES 519
9 PROPUESTAS ADMINISTRATIVAS 522
10 PROPUESTAS DE ACCIONES FUTURAS PARA EL MEJORAMIENTO Y ACTUALIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN 527
10.1 CARACTERÍSTICAS DE EQUIPOS Y POZOS DE PROPUESTAS DE ACCIONES FUTURAS 534
11 REFERENCIAS 536

ANEXOS

ANEXO 1 Catastro Público de Aprovechamiento
ANEXO 2 Levantamiento en Terreno
ANEXO 3 Información de los Expedientes de Captaciones
ANEXO 4 Variables Hidrometeorológicas
ANEXO 5 Interpretación de Ensayos de Bombeo
ANEXO 6 Informe Geofísica
ANEXO 7 Instalación de estaciones de monitoreo hidrometeorológico
ANEXO 8 Hydromodelhost
ANEXO 9 Modelo Numérico

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4-1. Localización de las áreas de trabajo de la cuenca Salar de Imilac – Punta Negra (Región de Antofagasta), y las subcuencas del río Turbio y Claro (ambos en la Región de Coquimbo)..... 5

Figura 5-1. Distribución de las costras salinas en el salar de Punta Negra. Fuente: Orellana *et al*. 1972. 9

Figura 5-2.Ubicación de los pozos construidos en el marco del proyecto 1969. Fuente: Orellana *et al*. 1972. 11

Figura 5-3. Mapa de isoprofundidades de nivel de la zona de estudio. Fuente: Orellana et al. 1972. 12

Figura 5-4. Localización del ámbito de estudio. Fuente: CORFO-ONU-DGA-CC, 1977 14

Figura 5-5. Perfil Hidrogeológico regional de Norte Grande. Fuente: CORFO-ONU-DGA-CC, 1977 17

Figura 5-6. Parámetros Hidráulicos de pozos de producción. Fuente: Álamos y Peralta Ingenieros, 1987 23

Figura 5-7. Distribución de pozos en el Salar de Punta Negra. Fuente: Álamos y Peralta Ingenieros, 1987 24

Figura 5-8. Composición de las aguas de aporte del Salar de Punta Negra. Fuente: Risarcher, 1999 28

Figura 5-9. Disposición de los puntos de monitoreo en el Salar de Punta Negra. Fuente: Risarcher, 1999 32

Figura 5-10. Representación de la Calidad en las zonas de aporte en el Salar de Punta Negra. Fuente: Risarcher, 1999 33

Figura 5-11. Representación de la Calidad en las zonas del salar en el Salar de Punta Negra. Fuente: Risarcher, 1999 34

Figura 5-12. Representación de las vías evolutivas y geología en el Salar de Punta Negra. Fuente: Risarcher, 1999 35

Figura 5-13. Ubicación del área de estudio del S.I.T. N°98. Fuente: DGA, 2004 40

Figura 5-14. Mapa con la ubicación de las vegas alimentadas por acuíferos o escurrimientos superficiales en la cuenca del salar de Punta Negra y salar de Imilac. Fuente: modificado de DGA, 2004. 42

Figura 5-15. Evolución Areal del espejo de Agua del Salar de Punta Negra (Centro de Estudios de Humedales, 2010) 43

Figura 5-16. Mapa de isoyetas, escorrentía y evapotranspiración real II Región. Fuente: DGA 1988. 46

Figura 5-17. Líneas de isotemperatura e isoevaporación II Región. Fuente: DGA 1988. 47

Figura 5-18. Mapa de precipitaciones de la II Región de Chile que incluye el salar de Punta negra y salar de Imilac. Fuente: DGA, 2009. 49

Figura 5-19. Curvas de evaporación vs profundidad definidas por diferentes autores. Fuente: DGA, 2009. 50

Figura 5-20. Captaciones existentes en el CPA de la DGA en la cuenca del salar de Imilac-Punta Negra. Fuente: Dirección General de Aguas. 54

Figura 5-21. Puntos Visitados en la Campaña de Terreno de Dic-2015. Fuente: elaboración propia. 65

Figura 5-22. Principales Unidades Geomorfológicas definidas en la Región de Antofagasta. Fuente: Ministerio de Obras Públicas, 2015 72

Figura 5-23. DEM descargado de ASTER GDEM. Fuente: METI y NASA. 74

Figura 5-24. Red de drenaje generada a partir del DEM de la Cuencas del salar de Imilac-Punta Negra. elaboración Propia 76

Figura 5-25. Sub-Subcuencas generadas para la cuenca hidrológica del salar de Imilac-Punta Negra. elaboración Propia 78

Figura 5-26.Redefinición del límite de la cuenca Salar de Imilac-Punta Negra. Fuente: elaboración Propia 80

Figura 5-27. Estaciones pluviométricas II Región. Fuente: Dirección General de Aguas. 85

Figura 5-28. Precipitación media mensual en estaciones alrededor de la cuenca de estudio para el periodo 1974-2015. Fuente: modificado Dirección General de Aguas. 89

Figura 5-29. Evolución precipitación acumulada anual II Región. Fuente: Dirección General de Aguas. 90

Figura 5-30. Series húmedas y secas de precipitación en II Región. Fuente: Dirección General de Aguas. 91

Figura 5-31. Gradiente altitudinal de precipitaciones II Región. Fuente: Dirección General de Aguas. 93

Figura 5-32. Isoyetas y bandas de precipitación II Región. Fuente: elaboración propia. 95

Figura 5-33. Estaciones meteorológicas con registro de temperatura. Fuente: Dirección General de Aguas. 98

Figura 5-34. Variación de la temperatura media mensual en las estaciones localizadas alrededor del área de estudio y zonas aledañas. Fuente: Dirección General de Aguas. 99

Figura 5-35. Gradiente altitudinal de temperaturas salar de Imilac - Punta Negra. Fuente: Dirección General de Aguas. 101

Figura 5-36. Evolución de temperaturas medias anuales. Fuente: Dirección General de Aguas. 102

Figura 5-37. Mapa de Isotermas y polígonos de temperaturas salar de Imilac- Punta Negra. Fuente: elaboración propia. 103

Figura 5-38. Reducción por salinidad vs densidad del agua en el salar de Atacama. Fuente DGA 2009. 106

Figura 5-39. Ubicación de las lagunas en salar es de Punta Negra y salar de Imilac. Fuente: elaboración propia. 107

Figura 5-40. Curvas de evaporación en función de la profundidad de extinción. Fuente: DGA 2009. 110

Figura 5-41. Mapa con la distribución espacial de los sectores con igual profundidad del nivel, densidad en el salar de Punta Negra. Fuente: elaboración propia. 113

Figura 5-42. Mapa con la distribución espacial de los sectores con igual profundidad del nivel, densidad en el salar de Imilac. Fuente: elaboración propia. 115

Figura 5-43. Ubicación de los lisímetros de carga variable instalados en terreno. Fuente: Elaboración Propia. 117

Figura 5-44. Curva realizada en base a los datos medidos con el lisímetro instalado en el salar de Punta Negra. Fuente: elaboración propia. 118

Figura 5-45. Curva realizada en base a los datos medidos con el lisímetro instalado en el salar de Imilac para una densidad de 1,22 g/cm^3. Fuente: elaboración propia. 119

Figura 5-46. Geología del Salar de Punta Negra y Salar de Imilac. Fuente: modificado de Gardeweg et al., 1994. 128

Figura 5-47. Ubicación de los perfiles realizados en la cuenca del salar de Punta Negra. Fuente: Geodatos. 130

Figura 5-48. Ubicación de los perfiles realizados en el salar de Imilac. Fuente: Geodatos. 131

Figura 5-49. Perfil W-E del relleno sedimentario del salar de Punta Negra obtenido a partir de la campaña geofísica. Fuente: GEODATOS. 133

Figura 5-50. Perfil W-E del relleno sedimentario del salar de Imilac obtenido a partir de la campaña geofísica. Fuente: GEODATOS. 134

Figura 5-51. Detalle del contraste de resistividades que define la profundidad del nivel freático. Fuente: Geodatos. 135

Figura 5-52. Contacto entre acuífero agua dulce y agua salada y geometría de la cuña salina. Fuente: modificado de Geodatos. 136

Figura 5-53. Materiales acuíferos del salar de Punta Negra y salar de Imilac: Fuente: elaboración propia. 139

Figura 5-54. Perfiles hidrogeológicos trazados para la definición del basamento en el salar de Punta Negra y salar de Imilac: Fuente: elaboración propia. 141

Figura 5-55. Perfil SI_02, corte W-E del Salar de Imilac (escala vertical por 6). Fuente: elaboración propia. 142

Figura 5-56. Perfil SI_04, corte W-E del Salar de Imilac (escala vertical por 6). Fuente: elaboración propia. 143

Figura 5-57. Perfil SI_07, E-W al sur del Salar de Imilac (escala vertical por 6). Fuente: elaboración propia. 144

Figura 5-58. Perfil SI_08, NNW-SSE en Salar de Imilac (escala vertical por 6). Fuente: elaboración propia. 145

Figura 5-59. Perfil SPN_01, dirección W-E en la cuenca del Salar de Punta Negra (escala vertical por 6). Fuente: elaboración propia. 146

Figura 5-60. Perfil SPN_03, dirección W-E al sur del Salar de Punta Negra (escala vertical por 6). Fuente: elaboración propia.....147

Figura 5-61. Perfil SI_SPN_01, NNE-SSW cuenca de Imilac y Punta Negra (escala vertical por 6). Fuente: elaboración propia.....148

Figura 5-62. Perfil SI_SPN_02, NNE-SSW cuenca de Imilac y Punta Negra (escala vertical por 6). Fuente: elaboración propia.....149

Figura 5-63. Perfil SI_SPN_03, NNE-SSW cuenca de Imilac y Punta Negra (escala vertical por 6). Fuente: elaboración propia.....149

Figura 5-64. Mapa de isohipsas del basamento del acuífero de la cuenca del Salar de Imilac y Punta Negra. Valores en msnm. Fuente: elaboración propia. 150

Figura 5-65. Vista 3D de la posición del basamento del acuífero de la cuenca del Salar de Imilac y Punta Negra. Fuente: elaboración propia. 151

Figura 5-66. Puntos con información de nivel para la elaboración de la piezometría en el Salar de Punta Negra y Salar de Imilac en diciembre de 2015. Fuente: elaboración propia.....155

Figura 5-67. Isopiezas y dirección de flujo en el Salar de Punta Negra y Salar de Imilac en diciembre de 2015 sobre mapa hidrogeológico. Fuente: elaboración propia. 156

Figura 5-68. Ubicación de pozos de observación utilizados en la evolución piezometrica. Fuente: Minera Escondida Ltda 158

Figura 5-69. Evolución piezométrica del pozo PH-02 (Zona Norte SPN). Fuente: modificado de Minera Escondida Ltda. 159

Figura 5-70. Evolución piezométrica del pozo PH-03 (Zona Norte SPN). Fuente: modificado de Minera Escondida Ltda. 160

Figura 5-71. Evolución piezométrica del pozo PH-05 (Zona Norte SPN). Fuente: modificado de Minera Escondida Ltda. 160

Figura 5-72. Evolución piezométrica del pozo ES-03 (sur de la Zona Norte SPN). Fuente: modificado de Minera Escondida Ltda. 161

Figura 5-73. Evolución piezométrica del pozo ES-57 (Zona Central SPN). Fuente: modificado de Minera Escondida Ltda. 163

Figura 5-74. Evolución piezométrica del pozo EX-05 (Zona Central SPN). Fuente: modificado de Minera Escondida Ltda. 164

Figura 5-75. Evolución piezométrica del pozo PH-42 (Zona Central SPN). Fuente: modificado de Minera Escondida Ltda. 164

Figura 5-76. Evolución piezométrica del pozo UN-31 (Zona Central SPN). Fuente: modificado de Minera Escondida Ltda. 165

Figura 5-77. Evolución piezométrica del pozo PH-24 (Zona Central SPN). Fuente: modificado de Minera Escondida Ltda. 165

Figura 5-78. Evolución piezométrica del pozo EX-06 (Zona Central SPN). Fuente: modificado de Minera Escondida Ltda. 166

Figura 5-79. Evolución piezométrica en pozos EP-07 y EP-09 (Zona Sur SPN). Fuente: modificado de Minera Escondida Ltda.....168

Figura 5-80. Evolución piezométrica en pozos SX-7 y SX-4 (Zona Sur SPN). Fuente: modificado de Minera Escondida Ltda.....168

Figura 5-81. Evolución piezométrica en pozos SX-8 y SX-2 (Zona Sur SPN). Fuente: modificado de Minera Escondida Ltda.....169

Figura 5-82. Evolución piezométrica en pozos SX-5 y ES-58 (Zona Sur SPN). Fuente: modificado de Minera Escondida Ltda.....169

Figura 5-83. Evolución piezométrica en pozos EP-11 y EP-13 (Zona Sur SPN). Fuente: modificado de Minera Escondida Ltda.....169

Figura 5-84. Evolución piezométrica en pozos EP-15 y ES-40 (Zona Sur SPN) 170

Figura 5-85. Interpretación de una prueba de bombeo en el pozo ND-0401-381 173

Figura 5-86. Ubicación de ensayos de bombeo interpretados y valores de transmisividad. Fuente: Elaboración propia 175

Figura 5-87. Ubicación de ensayos de bombeo interpretados y valores de coeficiente de almacenamiento. Fuente: Elaboración propia.....176

Figura 5-88. Esquema conceptual del funcionamiento del salar de Punta Negra con el ciclo del agua desde la precipitación en la cordillera de los Andes hasta su evaporación al aproximarse al salar. Fuente: elaboración propia. 180

Figura 5-89. Modelo conceptual del funcionamiento del margen de un salar. Fuente: elaboración propia. 181

Figura 5-90. Detalle del acuífero aluvial del salar de Punta Negra. Fuente: Elaboración propia. 182

Figura 5-91. Funcionamiento conceptual y componentes del balance hídrico en salar de Punta Negra y salar de Imilac. Fuente: Elaboración propia. 186

Figura 5-92. Mallado y celdas activas del modelo. Acuífero cuencas salar Punta Negra y salar Imilac. Fuente: elaboración propia. 203

Figura 5-93. Topografía introducida en el modelo. Fuente: elaboración propia. 204

Figura 5-94. Basamento calculado mediante ARCGIS e introducido en modelo numérico. Fuente: elaboración propia. 206

Figura 5-95. Imagen de la geometría del basamento introducida en el modelo. Fuente: elaboración propia. 207

Figura 5-96. Corte del acuífero E-W con mallado (escala vertical x10). Fuente: elaboración propia. 207

Figura 5-97. Distribución de las conductividades hidráulicas introducidas en el modelo. Fuente: elaboración propia. 209

Figura 5-98. Distribución del coeficiente de almacenamiento introducido en el modelo. Fuente: elaboración propia. 210

Figura 5-99. Piezometría de agosto de 2004 utilizada como referencia de inicio del modelo. Fuente: elaboración propia. 212

Figura 5-100. Pozos de inyección para simular la recarga que se produce en el sector oeste del modelo (6 pozos en zona 5 y, al NE de la anterior, 3 pozos en zona 6). Fuente: elaboración propia. 215

Figura 5-101. Sectores introducidos en el modelo con un valor de tasa de infiltración (mm/a) asignada. En la figura de la izquierda, equivale a la recarga producida desde el margen este de la cuenca (color celeste, zona 1), margen sur (color rojo, zona 2) y la recarga directa sobre el aluvial (colores morado para la zona 3 y amarillo para la zona 4). Fuente: elaboración propia. 216

Figura 5-102. Ubicación pozos de extracción en el acuífero aluvial. Fuente: elaboración propia. 217

Figura 5-103. Caudal total de los pozos incorporados al modelo. Fuente: elaboración propia. .218

Figura 5-104. Ubicación del pozo de inyección incorporado al modelo. Fuente: elaboración propia. 219

Figura 5-105. Ubicación de los drenes incorporados al modelo. Fuente: elaboración propia. ...220

Figura 5-106. Sectores de evaporación en el salar de Punta Negra. Fuente: elaboración propia. 221

Figura -5-107. Sectores de evaporación en el salar de Imilac. Fuente: elaboración propia. 222

Figura 5-108. Puntos de observación utilizados para la calibración del modelo. Fuente: elaboración propia. 224

Figura 5-109. Valores calculados vs observados en periodo inicial. Fuente: elaboración propia. 226

Figura 5-110. Valores calculados vs observados al final del periodo de simulación. Fuente: elaboración propia. 227

Figura 5-111. Valores calculados vs observados para todo el periodo de simulación. Fuente: elaboración propia. 228

Figura 5-112. Valores simulados vs calculados en el pozo PH-46. Fuente: elaboración propia. 229

Figura 5-113. Valores simulados vs calculados en el pozo PH-62. Fuente: elaboración propia. 229

Figura 5-114. Valores simulados vs calculados en el pozo T-4A. Fuente: elaboración propia. ..230

Figura 5-115. Valores simulados vs calculados en el pozo PH-55. Fuente: elaboración propia. 230

Figura 5-116. Valores simulados vs calculados en el pozo PH-20. Fuente: elaboración propia. 231

Figura 5-117. Valores simulados vs calculados en el pozo PH-20A. Fuente: elaboración propia. 231

Figura 5-118. Valores simulados vs calculados en el pozo PH-48. Fuente: elaboración propia. 232

Figura 5-119. Valores simulados vs calculados en el pozo PH-56. Fuente: elaboración propia. 232

Figura 5-120. Valores simulados vs calculados en el pozo PH-34. Fuente: elaboración propia. 233

Figura 5-121. Valores simulados vs calculados en el pozo PH-43. Fuente: elaboración propia. 233

Figura 5-122. Valores simulados vs calculados en el pozo PH-59. Fuente: elaboración propia. 234

Figura 5-123. Valores simulados vs calculados en el pozo PH-24. Fuente: elaboración propia. 234

Figura 5-124. Valores simulados vs calculados en el pozo PH-61. Fuente: elaboración propia. 235

Figura 5-125. Zonas del modelo donde se ha calculado el balance hídrico. Fuente: elaboración propia. 238

Figura 5-126. Imagen tridimensional del basamento (tonos naranjas) y superficie piezométrica (tonos azules). Fuente: elaboración propia. 245

Figura 5-127. Isopiezas obtenidas septiembre. 2014. Figura izquierda: Contornos cada 10 m entre 2900 y 3000 m. Figura derecha: Contornos cada 50 m entre 2900 y 3400 m. Fuente: elaboración propia. 246

Figura 5-128. Isopiezas obtenidas septiembre 2005. Figura izquierda: Contornos cada 10 m entre 2900 y 3000 m. Figura derecha: Contornos cada 50 m entre 2900 y 3400 m. Fuente: elaboración propia. 247

Figura 5-129. Isopiezas obtenidas septiembre 2009. Figura izquierda: Contornos cada 10 m entre 2900 y 3000 m. Figura derecha: Contornos cada 50 m entre 2900 y 3400 m. Fuente: elaboración propia. 248

Figura 5-130. Isopiezas obtenidas septiembre 2014. Figura izquierda: Contornos cada 10 m entre 2900 y 3000 m. Figura derecha: Contornos cada 50 m entre 2900 y 3400 m. Fuente: elaboración propia. 249

Figura 5-131. Isopiezas obtenidas diciembre 2015. Figura izquierda: Contornos cada 10 m entre 2900 y 3000 m. Figura derecha: Contornos cada 50 m entre 2900 y 3400 m. Fuente: elaboración propia. 250

Figura 5-132. Descensos piezométricos al final del periodo de simulación. Fuente: elaboración propia. 251

Figura 5-133. Perfil oeste-este a la altura del salar de Punta Negra. Fuente: elaboración propia. 252

Figura 5-134. Perfil oeste-este a la altura del salar de Punta Negra. Fuente: elaboración propia. 253

Figura 5-135. Ubicación de los pozos incorporados en el escenario 1. Fuente: elaboración propia. 258

Figura 5-136. Evolución de niveles piezométricos en el escenario 1. Fuente: elaboración propia. 262

Figura 5-137. Evolución de niveles piezométricos en el escenario 1. Fuente: elaboración propia. 263

Figura 5-138. Mapa de isopiezas generado a los 50 años de simulación para el escenario 1. Fuente: elaboración propia. 264

Figura 5-139. Evolución de los niveles piezométricos más representativos en el escenario 2. Fuente: elaboración propia.....270

Figura 5-140. Perfil de dirección oeste-este, al norte del salar de Punta Negra para el final del periodo simulado en el escenario 2. Fuente: elaboración propia. 270

Figura 5-141. Evolución de los niveles piezométricos más representativos en el acuífero para el 50% de derechos otorgados según el escenario 3. Fuente: elaboración propia.....275

Figura 5-142. Perfil de dirección oeste-este, al norte del salar de Punta Negra para el final del periodo simulado en el escenario 3. Fuente: elaboración propia. 277

Figura 5-143. Evolución de niveles piezométricos simulados en el marco del escenario 3 con un 4% del volumen de explotación de derechos otorgados. Fuente: elaboración propia. 279

Figura 5-144. Datos y gráfica de evolución de los niveles piezométricos en las captaciones más representativas. Escenario 4. Fuente: elaboración propia. 286

Figura 5-145. Evolución de los niveles piezométricos en el acuífero según escenario 5. Fuente: elaboración propia. 289

Figura 5-146. Mapa de isopiezas generado a los 50 años de simulación para el escenario 5. Fuente: elaboración propia. 289

Figura 6-1. Sondajes del sector río Turbio y río Claro. Fuente: Comisión Nacional de Riego, 1987. 298

Figura 6-2. Ubicación de los sondeos en sector río Turbio y río Claro. Fuente: Comisión Nacional de Riego, 1987. 299

Figura 6-3. Registros de sondeos en zona del Tranque Pastos Largos. Barrick Chile, 1995.....300

Figura 6-4. Ubicación de los diferentes sectores donde se ha realizado el modelo numérico. Fuente: Dirección General de Aguas, 2003. 302

Figura 6-5. Corte transverdal de Tranque de Relave. Fuente: Barrick Chile, 2004.....305

Figura 6-6. Valores del parámetro Conductividad eléctrica según datos de CADE-IDEPE, Anteproyecto de Norma y FAO. Fuente: CADE-IDEPE, 2005. 306

Figura 6-7. Mapa de ubicación, distribución de conductividades hidráulicas y mapa piezométrico generados durante el proyecto. 308

Figura 6-8. Subcuencas aportantes. Fuente: CAZALAC-RODHOS, 2006.....311

Figura 6-9. Acuíferos definidos para la modelación. Fuente: CAZALAC-RODHOS, 2006.....312

Figura 6-10. Mapa Geológico de la Cuenca del río Elqui. Fuente: Cabezas *et al.*, 2007. 315

Figura 6-11. Mapa litológico de la cuenca del río Elqui. Fuente: Cabezas *et al.*, 2007.....317

Figura 6-12. Mapa geomorfológico de la cuenca del río Elqui. Fuente: Cabezas *et al.*, 2007....319

Figura 6-13.Ubicación cuenca río Elqui en Algarrobal. Fuente: Universidad de Chile, 2008.....321

Figura 6-14. Acuíferos en el sistema. Fuente: Universidad de Chile, 2008. 322

Figura 6-15. Cuenca del río Elqui. Fuente: Zabala et al., 2008. 324

Figura 6-16. Foto Aérea del Glaciar Tapado. Fuente: Zabala et al., 2008.....324

Figura 6-17. Mapa hidrogeológico de Chile DGA. Fuente: Zabala et al., 2008.....326

Figura 6-18. Ubicación de las muestras de agua superficial y subterránea tomadas durante el proyecto. Imagen A corresponde a muestras de agua superficial e imagen B a muestras de agua subterránea. Fuente: Castillo, 2009.....329

Figura 6-19. Mapa geológico de la Cuenca del río Elqui. Fuente: Cepeda *et.al*., 2005.....332

Figura 6-20. Constantes elásticas del acuífero. Fuente: CORFO, 1955.....335

Figura 6-21. Estimación del flujo subterráneo. Fuente: CORFO, 1955. 335

Figura 6-22. Ubicación de perfiles geofísicos. Fuente: CORFO, 1955. 336

Figura 6-23. Mapa geológico del río Elqui. Fuente: Oyarzún *et al.*, 2008. 339

Figura 6-24. Vista general de los acuíferos. Fuente: Oyarzún *et al.*, 2008. 340

Figura 6-25. Variaciones históricas de precipitaciones y descargas. La línea de puntos grises muestra la descarga del río Turbio en Varillar. La línea segmentada representa regresiones lineales para los períodos 1918-2005 y 1950-2005, respectivamente. Fuente: Favier *et al.*, 2009. 343

Figura 6-26. Variación de la precipitación y el caudal en el embalse La Laguna. Fuente: Favier *et al.*, 2009.....344

Figura 6-27. Cobertura de nieve sobre la cuenca de La Laguna, estimados con índices de cobertura de nieve entre el 26 de febrero del 2000 y el 25 de mayo de 2003.La línea continua es la extensión de nieve como porcentaje del total del área entre 4.000 y 5.000 msnm. La línea de puntos es la extensión de nieve entre 3.000 y 4.000 msnm. El área gris representa la extensión de nieve sobre toda la cuenca. Fuente: Favier *et al.*, 2009.....345

Figura 6-28. Ubicación del área de estudio. Fuente: Habiterra. 2012. 347

Figura 6-29. Principales cuencas del área de estudio. Fuente: Habiterra. 2012. 349

Figura 6-30. Geología del área de estudio. Fuente: Habiterra. 2012. 350

Figura 6-31. Principales unidades geomorfológicas. Fuente: Habiterra, 2012. 356

Figura 6-32. Porcentaje Demanda Suplida a Nivel de Cuenca Elqui. Fuente: CONIC Ingenieros Civiles Consultores. 2013.....358

Figura 6-33. Resultados Balance Oferta Demanda Cuenca Elqui. Fuente: CONIC Ingenieros Civiles Consultores. 2013.....359

Figura 6-34. Recursos disponibles para percolación que se generan en cauces. Fuente: CONIC-BF Ingenieros Civiles Consultores, 2013. 364

Figura 6-35. Flujos subterráneos salientes de cada uno de los acuiferos. Fuente: CONIC-BF Ingenieros Civiles Consultores, 2013. 365

Figura 6-36. Evolución del volumen almacenado en los acuiferos. Fuente: CONIC-BF Ingenieros Civiles Consultores, 2013. 366

Figura 6-37. Distribución de las concentraciones de As del río Claro y río Turbio. Fuente: Miralles, 2013. 368

Figura 6-38. Cuenca río Claro, precipitación media anual, modelo de elevación digital y temperatura media anual. Fuente: Hublart *et al*., 2015....370

Figura 6-39. Variación interanual de la precipitación y escorrentía. Los valores del flujo son aquellos medidos a la salida de la cuenca antes de contabilizar las captaciones de agua. Los valores de precipitación son aquellos obtenidos después de una interpolación....371

Figura 6-40. Líneas isotermas e isoevaporación IV Región. Fuente: DGA, 1988....373

Figura 6-41. Líneas isoyetas e isoevapotranspiración IV Región. Fuente: DGA 1988 374

Figura 6-42. Captaciones existentes en el CPA de la DGA en las subcuencas del río Turbio y río Claro. Fuente: Dirección General de Aguas. 377

Figura 6-43. Puntos Visitados en la Campaña de Terreno de Nov-2015. Fuente: elaboración propia. 382

Figura 6-44. Unidades Geomorfológicas de la Región de Coquimbo. Fuente: Ministerio de Obras Públicas, 2015 389

Figura 6-45. DEM descargado de ASTER GDEM para la Región de Coquimbo. Fuente: METI y NASA 391

Figura 6-46. Red de drenaje generada a partir del DEM para el río Turbio y río Claro. elaboración Propia....392

Figura 6-47. Sub-Subcuencas generadas para el río Turbio y río Claro. elaboración Propia 394

Figura 6-48. Redefinición del límite de la cuenca del río Claro y Turbio. Fuente: elaboración Propia 396

Figura 6-49. Estaciones meteorológicas con información de precipitación en las cuencas del río Claro-Turbio. Fuente: Dirección General de Aguas. 402

Figura 6-50. Precipitaciones medias mensuales para la cuenca del río Claro. Fuente: Dirección General de Aguas....404

Figura 6-51. Precipitaciones medias mensuales para la cuenca del río Turbio. Fuente: Dirección General de Aguas.....404

Figura 6-52. Precipitaciones medias mensuales en estaciones del río Elqui. Fuente: Dirección General de Aguas.....405

Figura 6-53. Precipitaciones anuales en el a cuenca del río Turbio. Fuente: Dirección General de Aguas.....406

Figura 6-54. Precipitaciones anuales en la cuenca del río Claro. Fuente: Dirección General de Aguas.....406

Figura 6-55. Precipitaciones anuales en la cuenca del río Elqui. Fuente: Dirección General de Aguas.....407

Figura 6-56. Series húmedas y secas de precipitación en IV Región. Fuente: Dirección General de Aguas.....408

Figura 6-57. Gradiente altitudinal de precipitaciones en río Elqui, río Claro y río Turbio. Fuente: Dirección General de Aguas.....410

Figura 6-58. Isoyetas y bandas de precipitación IV Región. Fuente: elaboración propia.....411

Figura 6-59. Estaciones meteorológicas con información de temperatura. Fuente: Dirección General de Aguas.....415

Figura 6-60. Temperatura media mensual en estaciones del área de estudio IV Región y zonas aledañas. Fuente: Dirección General de aguas.....416

Figura 6-61. Gradiente altitudinal de temperaturas IV Región. Fuente: Dirección General de Aguas. 418

Figura 6-62. Temperatura media anual para la zona de estaciones área de estudio y zona aledañas. Fuente: Dirección General de Aguas.....419

Figura 6-63. Isotermas y bandas de temperatura media anual. Fuente: elaboración propia. ...420

Figura 6-64. Ubicación de las estaciones fluviométricas situadas en la IV Región. Fuente: Modificado de Dirección General de Aguas.....422

Figura 6-65. Estaciones fluviométricas con información de caudales en la IV Región. Fuente: Dirección General de Aguas.....424

Figura 6-66. Gráfico con los diferentes tipos de régimen que tiene un río en esta zona. Fuente: elaboración propia. 426

Figura 6-67. Caudal medio mensual en estaciones de la cuenca del río Claro. Fuente: elaboración propia. 427

Figura 6-68. Caudal medio mensual en estaciones de la cuenca del río Turbio. Fuente: elaboración propia. 428

Figura 6-69. Gráfico que relaciona los caudales medios mensuales de cada año con las precipitaciones medias mensuales. Fuente: modificado de Dirección General de Aguas. 430

Figura 6-70. Esquema del método de cálculo de la Mitad Sección. Fuente: modificado de manual OTT MF Pro. 432

Figura 6-71. Distribución de los puntos aforados durante la campaña realizada en enero de 2016. Fuente: elaboración propia. 434

Figura 6-72. Variación del caudal medio anual con la altura en estaciones del área de estudio y zonas aledañas. Fuente: elaboración propia. 436

Figura 6-73. Evolución temporal de los caudales en la cuenca del río Claro y cuenca del río Turbio. Fuente: Dirección General de Aguas. 438

Figura 6-74. Distribución de lagunas y humedales en la zona de estudio: Fuente: modificado de Ministerio de Medioambiente de Chile. 441

Figura 6-75. Geología de la cuenca de los ríos Turbio y Claro. Fuente: SERNAGEOMIN (2010). 450

Figura 6-76. Delimitación del acuífero aluvial y ubicación de los perfiles de geofísica. Fuente: elaboración propia. 452

Figura 6-77. Ubicación perfiles geofísicos en la salida de las cuencas del río Turbio y río Claro. Fuente: Geodatos. 453

Figura 6-78. Ubicación del perfil L4 en el río Claro. Fuente: Geodatos. 454

Figura 6-79. Ubicación del perfil L5 en el río Claro. Fuente: Geodatos. 455

Figura 6-80. Ubicación del perfil L6 en el río Turbio. Fuente: Geodatos. 456

Figura 6-81. Ubicación del perfil L7 en el río Turbio. Fuente: Geodatos. 457

Figura 6-82. Imagen representativa de la relación río acuífero. Ubicación: río La Laguna entre Juntas y el embalse La Laguna. Fuente: elaboración propia. 460

Figura 6-83. Distribución en planta de los materiales aluviales que forman el principal acuífero de la zona de estudio. Fuente: elaboración propia. 461

Figura 6-84. Perfil L1, salida del área de estudio. Fuente: Geodatos. 463

Figura 6-85. Perfiles río Turbio. En orden desde cabecera a desembocadura: L7, L6, L2. Fuente: Geodatos. 465

Figura 6-86. Perfiles río Claro. En orden desde cabecera a desembocadura: L5, L4, L3. Fuente: Geodatos. 467

Figura 6-87. Esquema conceptual del afloramiento de agua subterránea que se produce en el sector de pueblo Hundido. Fuente: elaboración propia. 468

Figura 6-88. Ubicación de los perfiles hidrogeológicos interpretados Fuente: elaboración propia 470

Figura 6-89. Perfil CLA_01. Dirección N-S en el río Claro (escala vertical por 2) Fuente. Elaboración propia 471

Figura 6-90. Perfil CLA_02. Dirección E-W, visto hacia aguas arriba en el río Claro (escala vertical por 2) Fuente. Elaboración propia 471

Figura 6-91. Perfil CLA_03. Dirección E-W, visto hacia aguas arriba en el río Claro (escala vertical por 2) Fuente. Elaboración propia 472

Figura 6-92. Perfil ELQ_01. Dirección NW-SE, visto hacia aguas arriba en el río Elqui (escala vertical por 2) Fuente. Elaboración propia 472

Figura 6-93. Perfil TUR_01. Dirección NW-SE, visto hacia aguas arriba en el río Turbio (escala vertical por 2) Fuente. Elaboración propia 473

Figura 6-94. Perfil TUR_02. Dirección NW-SE, visto hacia aguas arriba en el río Turbio (escala vertical por 2) Fuente. Elaboración propia 473

Figura 6-95. Perfil TUR_03. Dirección NE-SW, visto hacia aguas arriba en el río Turbio (escala vertical por 2) Fuente. Elaboración propia 474

Figura 6-96. Mapa de isohipsas de basamento (valores en msnm) Fuente. Elaboración propia 475

Figura 6-97. Isopiezas y dirección de flujo en el aluvial del río Turbio en diciembre de 2015 sobre imagen de satélite. Fuente: elaboración propia. 478

Figura 6-98. Isopiezas y dirección de flujo en el aluvial del río Claro en diciembre de 2015 sobre imagen de satélite. Fuente: elaboración propia. 479

Figura 6-99. Distribución de los pozos monitoreados por la Dirección General de Aguas. Fuente: Dirección General de Aguas. 481

Figura 6-100. Gráfica de la evolución temporal de los niveles en los pozos "Montegrande", "Pueblo Paihuano" y "Quebrada Paihuano" entre el periodo 1991-2015. Fuente: Dirección General de Aguas. 483

Figura 6-101. Gráfica de la evolución temporal de los niveles en los pozos "Bocalume" y "Varillar" entre el periodo 1991-2015. Fuente: Dirección general de Aguas. 485

Figura 6-102. Gráfica de la evolución temporal de los niveles en los pozos "Escuela Rivadavia", "Pueblo Rivadavia" y "Algarrobal" entre el periodo 1991-2015. Fuente: Dirección General de Aguas. 486

Figura 6-103. Relación entre el aumento del nivel freático con la pluviometría y el caudal en el río. Fuente: modificado de Dirección General de Aguas.....487

Figura 6-104. Grafico donde observa la repercusión de un evento en la evolución del nivel freático en el tiempo. Fuente: modificado de Dirección General de Aguas. 489

Figura 6-105. Interpretación de una prueba de bombeo en el pozo APR Rivadavia. Fuente: elaboración propia. 491

Figura 6-106. Ubicación de ensayos de bombeo interpretados y valores de transmisividad. Fuente: Elaboración propia 493

Figura 6-107. Ubicación de ensayos de bombeo interpretados y valores de coeficiente de almacenamiento. Fuente: elaboración propia.....494

Figura 6-108. Sección 'tipo' inferida del cauce del río Turbio. Fuente: elaboración propia. 498

Figura 6-109. Esquema del balance hídrico del acuífero aluvial. Fuente: elaboración propia....501

Figura 6-110. Esquema del cálculo realizado para la estimación del gradiente hidráulico. Fuente: elaboración propia. 508

Figura 6-111. Sección utilizada para el cálculo del caudal de salida de la cuenca del río Claro. Fuente. Geodatos.....509

Figura 6-112. Sección utilizada para el cálculo del caudal de salida de la cuenca del río Turbio. Fuente. Geodatos.....510

Figura 6-113. Variación del volumen almacenado en la cuenca del río Claro-Turbio. Fuente: CAZALAC-RODHOS, 2006. 513

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1. Resumen de las actividades de la Etapa II y los resultados esperados en cada una de ellas. Fuente: elaboración propia. 4

Tabla 5-1. Resumen de los antecedentes analizados en el sector del Salar de Imilac-Punta Negra. Fuente: elaboración propia. 7

Tabla 5-2. Características hidrogeológicas de las ubicaciones de la zona de estudio. Fuente: CORFO-ONU-DGA-CC, 1977 19

Tabla 5-3. Clasificación de la calidad del agua subterránea en el Norte Grande. Fuente: CORFO-ONU-DGA-CC, 1977 19

Tabla 5-4. Rango Típico de composición química en el Salar de Punta Negra. Fuente: CORFO-ONU-DGA-CC, 1977 20

Tabla 5-5. Análisis cuantitativo en el Salar de Punta Negra. (CORFO-ONU-DGA-CC, 1977) 20

Tabla 5-6. Puntos utilizados para la caracterización hidroquímica del Salar de Punta Negra. Fuente: (Risarcher, 1999) 26

Tabla 5-7. Resultados químicos y vías evolutivas del Salar de Punta Negra. Fuente: (Risarcher, 1999) 28

Tabla 5-8. Definición de las características de la Sub-Subcuenca Salar de Punta Negra (CORFO,2010) 44

Tabla 5-9. Balance hídrico salar de Punta Negra. Fuente: DGA 1988 45

Tabla 5-10. Derechos de aprovechamiento del CPA en la cuenca salar de Imilac-Punta Negra. Fuente: Dirección General de Aguas. 55

Tabla 5-11. Uso de los derechos de aprovechamiento del CPA en la cuenca salar de Imilac-Punta Negra. Fuente: Dirección General de Aguas. 56

Tabla 5-12. Listado de los expedientes encontrados en la zona de estudio y descripción de la información que contienen. Fuente: elaboración propia. 62

Tabla 5-13 Ubicación de pozos y niveles medidos en la campaña de terreno de Noviembre y Diciembre 2015. Fuente: elaboración propia. 66

Tabla 5-14. Tabla resumen caudal otorgado pozos Minera Escondida Ltda. vs caudal explotado según el Informe de control de extracciones. Fuente: Minera Escondida Ltda..... 69

Tabla 5-15 Coordenadas del DEM utilizado para la Región de Antofagasta y para la cuenca Salar de Imilac-Punta Negra. Fuente: elaboración propia 73

Tabla 5-16. Definición de las cuencas del salar de Imilac-Punta Negra. Fuente: elaboración Propia 79

Tabla 5-17. Estaciones meteorológicas con información de precipitación en el área de estudio y zonas aledañas. Fuente: Dirección General de Aguas..... 83

Tabla 5-18. Años de registro en estaciones evaluadas. Fuente: Dirección General de Agua..... 83

Tabla 5-19. Coordenadas estaciones meteorológicas DGA. Fuente: Dirección General de Aguas. 84

Tabla 5-20. Precipitación media mensual en estaciones meteorológicas del área de estudio y zonas aledañas para el periodo 1974-2015. Fuente: Dirección General de Aguas. 88

Tabla 5-21. Secuencias de precipitación II Región. Fuente: Dirección General de Aguas..... 91

Tabla 5-22. Precipitación media anual en las estaciones del área de estudio y zonas aledañas para el periodo 1974-2015. Fuente: Dirección General de Aguas. 92

Tabla 5-23. Periodos de registro de las estaciones evaluadas. Fuente: Dirección General de Aguas. 96

Tabla 5-24. Coordenadas estaciones meteorológica utilizadas en el análisis de temperaturas . Fuente: Dirección General de Aguas. 97

Tabla 5-25. Temperatura media mensual en estaciones meteorológicas del área de estudio y zonas aledañas. Fuente: Dirección General de Aguas. 100

Tabla 5-26. Temperatura media anual en las estaciones del área de estudio y zonas aledañas. Dirección General de Aguas. 100

Tabla 5-27. Datos de evaporación potencial de referencia (EP0) utilizados para el cálculo de la evaporación desde lámina libre. Fuente: DGA 2009. 105

Tabla 5-28. Superficie de lámina libre para cada sector de lagunas. Fuente: elaboración propia. 107

Tabla 5-29. Cálculo de la evaporación desde lámina libre en los salares de Punta Negra e Imilac. Fuente: elaboración propia. 108

Tabla 5-30. Valores de área, profundidad del nivel y densidad del agua correspondiente a cada uno de los sectores del salar de Punta Negra. Fuente: elaboración propia. 112

Tabla 5-31. Valores de área, profundidad del nivel y densidad del agua correspondiente a cada uno de los sectores en el salar de Imilac. Fuente: elaboración propia. 114

Tabla 5-32. Resultados de evaporación calculados en el salar de Punta Negra. Fuente: elaboración propia. 120

Tabla 5-33. Resultados de evaporación calculados en el salar de Imilac. Fuente: elaboración propia. 120

Tabla 5-34. Total tasa de evaporación calculada para las cuencas del salar de Punta Negra y salar de Imilac. Fuente: elaboración propia. 121

Tabla 5-35. Variación del nivel estático en pozos de Zona Norte del SPN (julio 2004-diciembre 2015). Fuente: Modificado de Minera Escondida Ltda. 159

Tabla 5-36. Profundidad de nivel estático medio mensual en pozos de Zona Norte del SPN (julio 2004-diciembre 2015). Fuente: modificado de Minera Escondida Ltda. 161

Tabla 5-37. Variación del nivel estático medio mensual en pozos de Zona Norte del SPN (julio 2004-diciembre 2015). Fuente: modificado de Minera Escondida Ltda. 162

Tabla 5-38. Variación del nivel estático en pozos de Zona Central del SPN (julio 2004-diciembre 2015). Fuente: modificado de Minera Escondida Ltda. 163

Tabla 5-39. Niveles estáticos medios mensuales en pozos de Zona Central del SPN (julio 2004-diciembre 2015). Fuente: modificado de Minera Escondida Ltda. 166

Tabla 5-40. Variación de niveles estáticos semestrales en pozos de Zona Central del SPN (julio 2004-diciembre 2015). Fuente: modificado de Minera Escondida Ltda. 167

Tabla 5-41. Variación de niveles estáticos semestrales en pozos de Zona Central del SPN (julio 2004-diciembre 2015). Fuente: modificado de Minera Escondida Ltda. 168

Tabla 5-42. Niveles estáticos medios mensuales en pozos de Zona Sur del SPN (julio 2004-diciembre 2015). Fuente: modificado de Minera Escondida Ltda. 170

Tabla 5-43. Variación de niveles estáticos semestrales en pozos de Zona Sur del SPN (julio 2004-diciembre 2015). Fuente: modificado de Minera Escondida Ltda. 171

Tabla 5-44. Parámetros elásticos obtenidos. Fuente: modificado de Minera Escondida Ltda. ... 174

Tabla 5-45. Parámetros elásticos bibliográficos. Fuente: modificado de Álamos y Peralta Ingenieros. 1987 174

Tabla 5-46. Entradas y salidas en un sistema acuífero. Fuente: Elaboración propia. 187

Tabla 5-47. Total tasa de evaporación calculada para las cuencas del salar de Punta Negra y salar de Imilac. Fuente: elaboración propia. 193

Tabla 5-48. Resultado del cálculo de la variación de almacenamiento estimada para el sector norte y centro de la cuenca del salar de Punta negra. Fuente: elaboración propia. 195

Tabla 5-49. Variación en el almacenamiento acuífero aluvial Imilac - Punta Negra. Fuente: elaboración propia. 197

Tabla 5-50 Tabla comparativa entre los parámetros hidráulicos introducidos en el modelo y los obtenidos tras la calibración. Fuente: elaboración propia..... 211

Tabla 5-51. Series de recarga introducidos al modelo. Fuente: elaboración propia..... 214

Tabla 5-52. Caudales de inyección. Fuente: elaboración propia basado en información de MEL. 219

Tabla 5-53. Balance hídrico acuífero salar Punta Negra-Imilac. Fuente: elaboración propia..... 236

Tabla 5-54. Resultados balance sistema VCL-3. Fuente: elaboración propia. 239

Tabla 5-55. Resultados entradas balance sistema VCL-2. Fuente: elaboración propia..... 240

Tabla 5-56. Resultados salidas balance sistema VCL-2. Fuente: elaboración propia. 240

Tabla 5-57. Resultados salidas balance sistema VCL-2. Fuente: elaboración propia. 242

Tabla 5-58. Resultados balance cuenca salar de Punta Negra. Fuente: elaboración propia. 243

Tabla 5-59. Resultados balance cuneca salar de Imilac. Fuente: elaboración propia..... 244

Tabla 5-60. Captaciones con derechos otorgados incorporados al modelo Fuente: elaboración propia a partir de información facilitada por la DGA. 257

Tabla 5-61. Resultados del balance hídirco con caudal de explotación igual a la totalidad de los derechos otorgados, simulado para un periodo de 50 años. Fuente: elaboración propia. 260

Tabla 5-62. Captaciones afectadas durante la simulación del escenario 1. Fuente: elaboración propia. 261

Tabla 5-63. Captaciones con derechos en trámite incorporados al modelo Fuente: elaboración propia a partir de información facilitada por la DGA. 266

Tabla 5-64. Resultados del balance hídirco con caudal de explotación igual a la totalidad de los derechos otorgados mas los derechos e trámite, simulado para un periodo de 50 años. Fuente: elaboración propia. 268

Tabla 5-65. Captaciones afectadas durante la simulación del escenario 2 (Derechos ortorgados + en trámite). Fuente: elaboración propia. 269

Tabla 5-66. Captaciones afectadas durante la simulación del escenario 3 al 50% de los derechos otorgados. Fuente: elaboración propia. 273

Tabla 5-67. Resultados del balance hídirco con caudal de explotación igual al 50% de los derechos otorgados, simulado para un periodo de 50 años. Fuente: elaboración propia. 275

Tabla 5-68. Captaciones afectadas durante la simulación del escenario 3 al 12,5% de los derechos otorgados. Fuente: elaboración propia. 276

Tabla 5-69. Captaciones afectadas durante la simulación del escenario 3 al 10% de los derechos otorgados. Fuente: elaboración propia. 278

Tabla 5-70. Captaciones afectadas durante la simulación del escenario 3 al 4% de los derechos otorgados. Fuente: elaboración propia. 278

Tabla 5-71. Resultados del balance hídrico con caudal de explotación igual al 4% de los derechos otorgados, simulado para un periodo de 50 años. Fuente: elaboración propia. 281

Tabla 5-72. Resumen resultados obtenidos en escenario 3. Fuente: elaboración propia. 282

Tabla 5-74. Balance hídrico escenario "Situación actual". Fuente: elaboración propia.....285

Tabla 5-75. Resultados del balance hídrico con caudal de explotación igual al 60% del caudal de explotación actual, simulado para un periodo de 50 años (escenario 5). Fuente: elaboración propia. 288

Tabla 5-76. Resumen resultados obtenidos en escenario 5. Fuente: elaboración propia. 290

Tabla 5-77. Resumen de resultados de los escenarios simulados. Fuente: elaboración propia. 290

Tabla 6-1. Resumen de los antecedentes analizados para las subcuencas del río Claro y río Turbio. Fuente: elaboración propia. 293

Tabla 6-2. Subcuencas con generación de caudal en base a modelo nival. Fuente: CAZALAC-RODHOS, 2006. 310

Tabla 6-3. Caracterización acuíferos Elqui. Fuente: CAZALAC-RODHOS, 2006. 313

Tabla 6-4 Demanda consuntiva y de captación. Fuente: Romero, 2009. 330

Tabla 6-5 Caracterización de la demanda agrícola actual. Fuente: Romero, 2009. 331

Tabla 6-6. Caudales medidos en las cuencas del río Turbio y río Claro en Diciembre de 2008. Fuente: Lafuente, 2008. 337

Tabla 6-7. Demanda promedio de agua por área económica. Fuente: Oyarzún *et al.*, 2008. ...341

Tabla 6-8. Estaciones pluviométricas usadas en este estudio. Fuente: Favier *et al.*, 2009. 342

Tabla 6-9. Volumen y Flujos en entrada y Salida de Acuiferos. Fuente: CONIC-BF Ingenieros Civiles Consultores, 2013. 362

Tabla 6-10. Derechos de agua subterráneos totales m^3/s. Fuente: CONIC-BF Ingenieros Civiles Consultores, 2013. 362

Tabla 6-11. Derechos subterráneos para riego y otros usos en m^3/s. Fuente: CONIC-BF Ingenieros Civiles Consultores, 2013. 363

Tabla 6-12. Percolaciones, afloramiento y recarga neta de los acuíferos. Fuente: CONIC-BF Ingenieros Civiles Consultores, 2013. 365

Tabla 6-13. Grado de explotación de los acuíferos. Fuente: CONIC-BF Ingenieros Civiles Consultores, 2013. 366

Tabla 6-14. Balance hídrico cuencas ríos Claro y Turbio. Fuente: DGA, 1988 372

Tabla 6-15. Solicitudes de derechos de aprovechamiento subterráneos del CPA en las subcuencas del río Claro y del río Turbio. Fuente: Dirección General de Aguas. 378

Tabla 6-16. Uso de los derechos de aprovechamiento del CPA en las subcuencas del río Claro y del río Turbio. Fuente: Dirección General de Aguas.....378

Tabla 6-17. Listado de los expedientes encontrados en la zona de estudio y descripción de la información que contienen. Fuente: elaboración propia.....380

Tabla 6-18. Ubicación de Pozos y niveles medidos durante las campañas de terreno de Noviembre de 2015 y Enero de 2016 en la zona del río Claro- Turbio. Fuente: elaboración propia. 384

Tabla 6-19. Comparativa caudal otorgado registrado en el CPA vs caudal medido en terreno. Fuente: elaboración propia.....385

Tabla 6-20. Caudal explotado por usuarios no registrados en el CPA. Fuente: elaboración propia. 385

Tabla 6-21. Coordenadas características del DEM de la Zona de Estudio. Fuente: elaboración propia 390

Tabla 6-22. Definición de las Subcuencas del río Claro y río Turbio. Fuente: elaboración Propia 395

Tabla 6-23. Coordenadas de estaciones meteorológicas con información de precipitación IV Región. Fuente: Dirección General de Aguas. 400

Tabla 6-24. Estaciones pluviométricas IV Región, periodos de registro y tipo de dato. Fuente: Dirección General de Aguas.....401

Tabla 6-25. Precipitación media mensual (mm/mes) en estaciones meteorológicas del área de estudio y zonas aledañas. Fuente: Dirección General de Aguas. 403

Tabla 6-26. Secuencias de precipitaciones IV Región. Fuente: Dirección General de Aguas. 408

Tabla 6-27. Precipitaciones medias anuales IV Región. Fuente: Dirección General de Aguas. ..409

Tabla 6-28. Estaciones meteorológicas con información de temperatura en el área de estudio y zonas aledañas. Fuente: Dirección General de Aguas.....413

Tabla 6-29. Coordenadas de estaciones con información de temperatura en el área de estudio. Fuente: Dirección General de Aguas. 414

Tabla 6-30. Temperatura media mensual (ºC) en estaciones meteorológicas del área de estudio y zonas aledañas. Fuente: Dirección General de Aguas.....417

Tabla 6-31. Temperatura media anual estaciones IV Región. Fuente: Dirección General de Aguas. 417

Tabla 6-32. Estaciones fluviométricas en el área de estudio y zonas aledañas. Fuente: Dirección General de Aguas.....423

Tabla 6-33. Caudal medio mensual (m^3/s) en estaciones fluviométricas del área de estudio y zonas aledañas. Fuente: modificado de Dirección General de Aguas. 429

Tabla 6-34.Resultados de la campaña realizada en enero de 2016. Fuente: elaboración propia. 433

Tabla 6-35. Caudal medio anual en las estaciones del área de estudio y zonas aledañas. Fuente: Dirección General de Aguas.....435

Tabla 6-36. Resultados del cálculo de la salida por evaporación en el embalse La Laguna. Fuente: elaboración propia. 443

Tabla 6-37. Cálculo de la evapotranspiración desde humedales en el área de estudio. Fuente: elaboración propia. 444

Tabla 6-38. Pozos de monitoreo de la Dirección General de Aguas ubicados en la zona de estudio. 480

Tabla 6-39. Parámetros elásticos obtenidos. Fuente: elaboración propia. 492

Tabla 6-40. Entradas y salidas en un sistema acuífero. Fuente: Elaboración propia. 501

Tabla 6-41. Tabla con el caudal total otorgado en la cuenca del río Claro y cuenca del río Turbio. Fuente: elaboración propia.....505

Tabla 6-42. Cálculo del promedio de variación del nivel en los pozos monitoreados por la Dirección General de Aguas. Fuente: elaboración propia. 512

Tabla 6-43. Cálculo de la variación de almacenamiento para el acuífero aluvial del río Claro y río Turbio. Fuente: elaboración propia. 512

Tabla 6-44. Total caudal superficial de salida de la cuenca del río Turbio. Fuente: Dirección General de Aguas. 516

Tabla 6-45. Total caudal superficial de salida de la cuenca del río Claro. Fuente: Dirección General de Aguas. 516

Tabla 10-1 Lisímetros propuestos en SHAC de Salar de Punta Negra e Imilac 527

Tabla 10-2 Piezómetros propuestos en SHAC de Salar de Punta Negra e Imilac 528

Tabla 10-3 Estaciones meteorológicas propuestas en SHAC de Salar de Punta Negra e Imilac 528

Tabla 10-4 Estimación del coste de las propuestas de mejora. 530

Tabla 10-5 Piezómetros propuestos en los SHAC de río Turbio y río Claro 531

Tabla 10-6 Estimación del coste de las propuestas de mejora. 533

Tabla 10-7. Estaciones meteorológicas propuestas de mejora. 535

1 INTRODUCCIÓN

La **Dirección General del Aguas** licitó el estudio titulado "**DIAGNÓSTICO DE AGUAS SUBTERÁNEAS EN ACUÍFEROS DE LA II Y IV REGIÓN**", el cual cuenta con un plazo de realización de 18 meses, cuya fecha final corresponde al 1 de abril del 2017, debiendo estar entregada la totalidad de los productos en el informe de la Etapa Final el 1 de Marzo del 2017.

La empresa **SUEZ MEDIOAMBIENTE CHILE S.A.** (en adelante **SUEZ**) consideró que el contenido, alcance y exigencias de las actuaciones a realizar en el estudio se ajustan a sus objetivos sociales y medios materiales y humanos de la sociedad y, en consecuencia, licita al concurso en el convencimiento de ofrecer a la Dirección General de Aguas la consecución de los objetivos previstos a su entera satisfacción.

La determinación de la disponibilidad de aguas para la constitución de derechos de aprovechamiento es una materia eminentemente técnica, que le corresponde resolver a la **Dirección General de Aguas**, dependiente del **Ministerio de Obras Públicas**.

En consecuencia, para la constitución de derechos sobre aguas subterráneas es necesario conocer el recurso disponible a nivel de la fuente para posteriormente definir el caudal a extraer (*Manual DARH, 2008*) y además el volumen de explotación sustentable a nivel de sectores de aprovechamiento, en el sentido de que la **Dirección General de Aguas** pueda constituir derechos de aprovechamiento cuando las solicitudes sean legalmente procedentes, cuando existan recursos disponibles y no perjudicando ni menoscabando derechos de terceros.

2 OBJETIVOS

El ***Diagnóstico de Aguas Subterráneas en acuíferos de la II y IV Región*** se ha dividido en cuatro etapas a lo largo de 18 meses, con el objetivo final de poder definir la disponibilidad de aguas subterráneas para dar salida a las solicitudes de aprovechamiento de aguas y poder realizar una gestión sustentable de los recursos hídricos. En particular, este informe hace referencia a la **Etapa II** en la cual se ha definido como objetivos generales la **Desarrollo del balance hídrico**.

En esa línea, se establece como objetivo principal la generación, análisis y sistematización informática de carácter meteorológico, hidrológico, geológico, hidrogeológico, balance hídrico, modelación conceptual y simulaciones de escenarios en sectores acuíferos de aprovechamiento común (SHAC), para que sirva de herramienta de apoyo a la gestión para las tareas ordinarias de la Dirección General de Aguas.

Los **objetivos generales** del Diagnóstico de Aguas Subterráneas en acuíferos de la II y IV Región se definen como:

1. Determinar la **disponibilidad de aguas subterráneas** susceptibles de explotar a nivel de Sector Hidrogeológico de Aprovechamiento Común, realizando un análisis detallado de la realidad de los acuíferos existentes para conocer la cantidad de agua disponible y el **volumen de explotación sustentable**.
2. Definir y realizar balances hídricos individualizados para cada SHAC.
3. Desarrollo y definición de **modelos numéricos hidrogeológicos** como herramienta de gestión del recurso hídrico a nivel de cada Sector Hidrogeológico de Aprovechamiento Común.

La definición de los **objetivos generales** crea el marco de las necesidades a resolver con este primer diagnóstico de disponibilidad de aguas subterráneas para las cuencas definidas de estudio. En particular, en la subcuenca del **Salar de Imilac- Salar de Punta Negra** existe la necesidad de dar salida a solicitudes de derechos de aprovechamiento en trámite desde el año 2000 y definir si existe una sectorización hidrogeológica entre los dos salares. Por otro lado, en el sector del **río Claro-río Turbio** es necesario poder definir el marco hidrogeológico con el objetivo de dar salida de derechos en trámite existentes desde el año 2009.

La resolución de las necesidades definidas en el párrafo precedente se va a realizar mediante unos objetivos específicos o **alcances particulares** citados a continuación:

1. Realizar un **Análisis Crítico** de los antecedentes (meteorológicos para cada uno de los SHAC y de las cuencas asociadas, hidrológicos, geológicos, hidrogeológicos, hidrogeoquímicos y de demandas, incluidos modelos conceptuales, balances hídricos o modelos numéricos).
2. Realizar un **levantamiento y monitoreo** de las variables relevantes para el desarrollo de balances hídricos y modelo de simulación hidrológica para cada SHAC.
3. Desarrollar un **catastro georreferenciado** de captaciones de aguas subterráneas, incluyendo la caracterización de cada una de ellas.
4. Desarrollar **campaña de monitoreo de niveles** a una muestra estadísticamente significativa de captaciones.
5. **Desarrollo** o mejoramiento de un modelo conceptual asociado a cada área de estudio (dirección de flujos de agua subterránea, fuentes de recarga del acuífero y su extensión, condiciones de borde, uso del suelo).
6. Realización de **prospecciones geofísicas** para actualizar la geometría acuífera y el **volumen almacenado**.
7. Desarrollar **propuesta de sectorización**, en caso de ser pertinente.
8. **Actualizar y diseñar un SIG** con toda la información generada en este Estudio Básico.
9. Proponer acciones futuras para el mejoramiento y actualización de la información.
10. Proponer bases técnicas para el desarrollo de Modelos Hidrogeológicos Integrados, generación de escenarios y propuestas de medidas administrativas para cada uno de los SHAC.

3 ALCANCES Y ACTIVIDADES

Los alcances de este informe, correspondiente a la segunda etapa (Etapa II) del *Diagnóstico de Aguas Subterráneas en Acuíferos de la II y IV Región* incluyen el levantamiento de información de las subcuencas del salar de Punta Negra y del salar de Imilac en la Región de Antofagasta, y de las subcuencas del río Claro y río Turbio de la Región de Coquimbo.

A partir de la información obtenida de los antecedentes y la levantada en terreno, se realizará un análisis crítico de la información existente para cada una de las zonas definidas. El objetivo principal y final de todo el estudio es desarrollar un modelo hidrogeológico conceptual con el balance hídrico de cada una de las áreas de estudio, a partir del cual se estimará el recurso hídrico disponible para el otorgamiento de derechos. En esta etapa (Etapa II), este informe representa el análisis crítico de la información de antecedentes existentes además de presentar actividades específicas detalladas en la **Tabla 3-1**.

ACTIVIDADES	RESULTADOS
Recopilación y análisis de antecedentes.	Recopilación y análisis de información existente para entender el funcionamiento de las dos cuencas de estudio. El análisis comportará: - Definir el funcionamiento Hidrogeológico Preliminar de las cuencas. - Levantar la máxima información en referencia al catastro de usuarios. - Analizar la información relacionado con el balance hídrico.
Catastro de captaciones y medición de niveles	Realización de un catastro de usuarios mediante la información histórica y la levantada en terreno.
Caracterización geomorfológica	Validación y redefinición de los límites geográficos de los Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común (SHAC) asociados a las sub-cuencas del Salar de Imilac-Punta Negra (Región de Antofagasta) y a los ríos Turbio y Claro de la cuenca hidrográfica del río Elqui Alto (Región de Coquimbo).
Monitoreo de variables hidrometeorológicas	Planificación preliminar de la ubicación de las estaciones meteorológicas, fluviométricas y lisímetros a instalar por el proyecto.
Estimación ofertas, descarga y variación de almacenamiento	A partir de la información levantada en los antecedentes, realizar un primer balance hídrico preliminar de cada cuenca de estudio.
Conclusiones, Informe Final.	Conclusiones específicas de la Etapa 2. Información disponible y estrategia para abordar las siguientes etapas.

Tabla 3-1. Resumen de las actividades de la Etapa II y los resultados esperados en cada una de ellas. Fuente: elaboración propia.

4 LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA Y COBERTURA DE ESTUDIO

El *Diagnóstico de Aguas Subterráneas en la II y IV Región* corresponde a las cuenca del Salar de Imilac-Punta Negra en la II Región (Región de Antofagasta) y a las subcuencas del río Claro y río Turbo ubicados en la IV Región (Región de Coquimbo). No obstante, el estudio abarcará aquellas cuencas y subcuencas cuyos límites de estudio no corresponden a los límites administrativos de las mismas, sino a los **límites hidrológicos** e **hidrogeológicos** a definir durante el desarrollo de las tareas y en concordancia con la Inspección Fiscal (**Figura 4-1**).



Figura 4-1. Localización de las áreas de trabajo de la cuenca Salar de Imilac – Punta Negra (Región de Antofagasta), y las subcuencas del río Turbio y Claro (ambos en la Región de Coquimbo).

5 II REGIÓN. CUENCA SALAR DE IMILAC – SALAR DE PUNTA NEGRA

5.1 RECOPILACIÓN Y ANÁLISIS DE ANTECEDENTES

La **recopilación de antecedentes** y análisis de la información existente tiene como objetivo la creación de una base de datos con todos los estudios/trabajos relacionados con los recursos hídricos de la zona de estudio y publicados hasta la fecha.

A continuación, se presenta una selección y resumen de los estudios considerados como relevantes para la realización del proyecto (**Tabla 5-1**). Esta información servirá de base para la interpretación de los datos levantados en terreno y la elaboración del modelo conceptual.

La revisión de antecedentes ha contado con estudios, informes, tesis, entre otros, que son de dominio público en instituciones como la Dirección General de Aguas (DGA), Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), Universidades, Centro de Información Recursos Hídricos (CIREN), Dirección de Obras Hidráulicas (DOH), Servicio de Evaluación Ambiental (SEA), Comisión Nacional de Riego (CNR), Instituto Geográfico Militar (IGM), entre otros.

N° ARCHIVO	CÓDIGO DE INFORME	AÑO PUBLICACIÓN	AUTOR, TÍTULO y/o MANDANTE
IIR-AQ-1	S/C	1972	ORELLANA Q., J.; RAMÍREZ G., E. Hidrología General, Salar de Punta Negra. Dirección General de Aguas.
IIR-AQ-2	S/C	1977	CORFO-ONU-DGA-CCC. Investigación de Recursos Hidráulicos en el Norte Grande (CHI-69/535). Hidrogeología de la segunda región con referencia especial a las Zonas Investigadas. Volumen I.
IIR-AQ-3	S/C	1987	DGA. Análisis crítico de la red de medición de niveles de agua subterránea. II Región. Álamos y Peralta Ingenieros.
II-AQ-4	S.I.T.51	1999	Convenio Cooperación DGA-UCN-IRD. Geoquímica de aguas en cuencas cerradas: I, II y III Regiones-Chile.
IIR-AQ-5	S/C	2003	CEDREM. Anexo C: Caracterización del Medio Ambiente. Declaración de impacto Ambiental para el Proyecto de Prospección Minera OGA, II Región de Antofagasta.

N° ARCHIVO	CÓDIGO DE INFORME	AÑO PUBLICACIÓN	AUTOR, TÍTULO y/o MANDANTE
IIR-AQ-6	S.I.T.98	2004	DGA. Actualización delimitación de acuíferos alimentadores de vegas y bofedales, II Región. Chile.
IIR-AQ-7	S/C	2010	CENTRO DE ESTUDIOS DE HUMEDALES. Análisis multitemporal de Cuencas de los Humedales Alto Andinos Prioritarios de Chile. Informe Final.
IIR-AQ-8	S/C	2010	Proyecto CIREN-INNOVA de CORFO. Caracterización Base de Vegas y Bofedales Alto Andinos para una gestión sostenible de los recursos hídricos. Primera Parte: Región de Antofagasta. Código: 08CM01-23.
IIR-AQ-9	S.I.T.291	2012	ARRAU INGENIERÍA. Diagnóstico plan estratégico para la gestión de los recursos hídricos, Región de Antofagasta. Informe final.
IIR-AQ-10	S/C	1988	DGA. Balance Hídrico Nacional.
IIR-AQ-11	S.I.T. 157	2008	DICTUC. Levantamiento hidrogeológico para el desarrollo de nuevas fuentes de agua en áreas prioritarias de la zona norte del Chile, Regiones XV, I, II y III. Etapa 1. Informe final parte II. Hidrología Regional del Altiplano de Chile
IIR-AQ-12	S.I.T. 195	2009	DICTUC. Levantamiento hidrogeológico para el desarrollo de nuevas fuentes de agua en áreas prioritarias de la zona norte del Chile, Regiones XV, I, II y III. Etapa 2. Informe final parte VII. Medición de la evaporación mediante el método del "Domo".
IIR-AQ-13		1998	MARDONES, L. Flux et évolution des solutions salines dans les systemèmes hydrologiques des salars d'Ascotal et d'Atacama.
IIR-AQ-14		1986	GRILLI y VIDAL. Evaporación desde salares: Metodología para evaluar los recursos hídricos renovables. Aplicación en las regiones I y II.
IIR-AQ-15		2015	SGA. Estudio hidrogeológico y modelo numérico sector sur del salar de Atacama. Anexo 1 del Estudio de Impacto Ambiental presentado por la empresa Rockwood Lithium.

Tabla 5-1. Resumen de los antecedentes analizados en el sector del Salar de Imilac-Punta Negra. Fuente: elaboración propia.

1. ***ORELLANA Q., J.; RAMÍREZ G., E. Hidrología General, Salar de Punta Negra. Dirección General de Aguas. 1972.***

El presente estudio realiza un levantamiento preliminar de información hidrogeológica/hidrológica del Salar de Punta Negra.

Características generales

En este informe se define la cuenca del Salar de Punta Negra con una superficie de 6.331 km^2. A partir de los continuos procesos de evaporación a través del tiempo se ocasionó que en la zona más deprimida de la cuenca se formase una costra salina de espesor importante con una superficie de 103 km^2, rodeada por una costra salina más reciente, de una superficie de 94 km^2 y de menor espesor (**Figura 5-1**). La altura media de la planicie salina se definió entorno a los 2.700 msnm y la de la cuenca en 3.500 msnm.

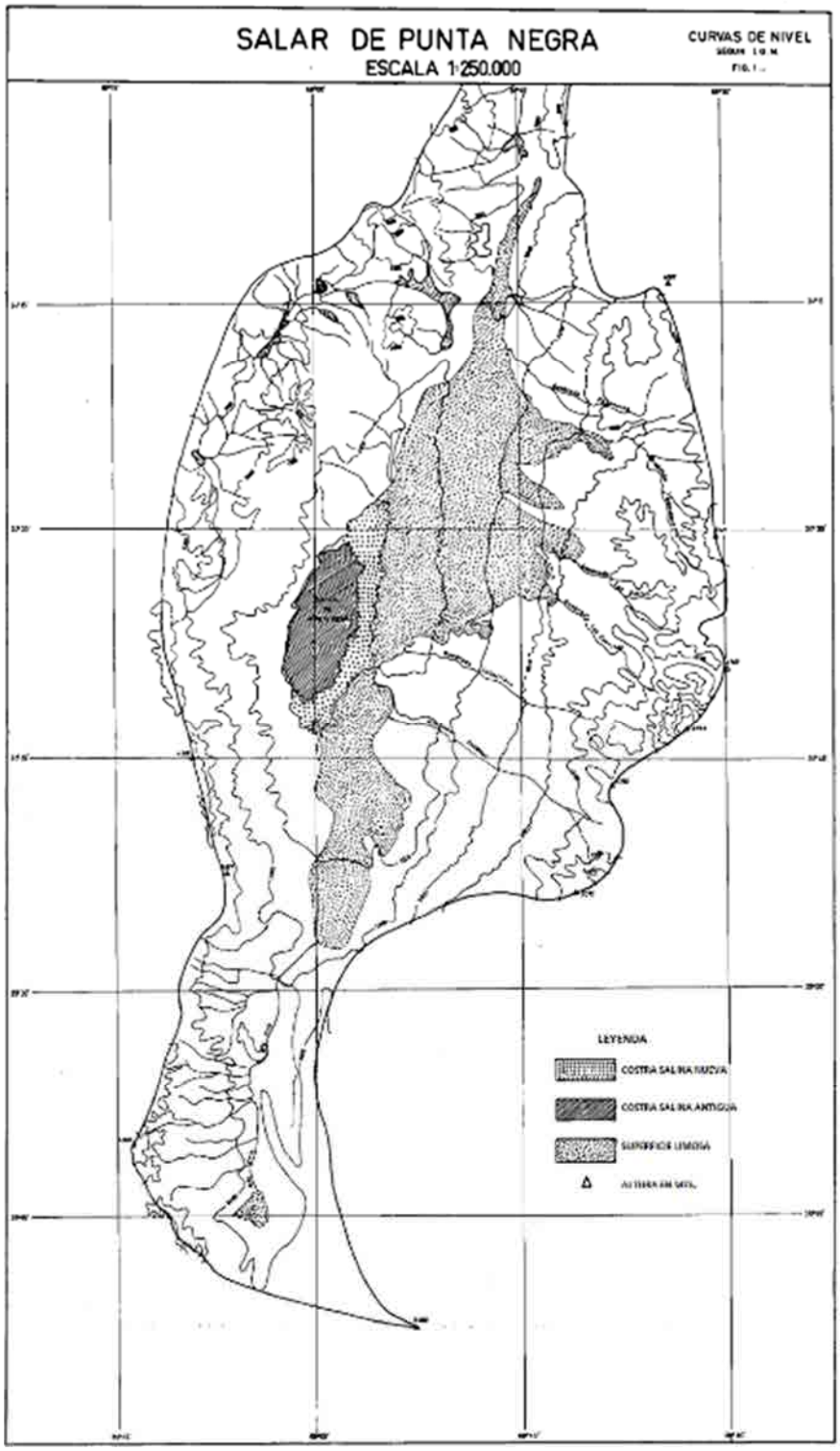


Figura 5-1. Distribución de las costras salinas en el salar de Punta Negra. Fuente: Orellana *et al*. 1972.

Hidrología

Orellana *et al* definió las precipitaciones como eventos ocasionados durante los meses de verano, debido a la entrada de bajas presiones que se manifiestan en forma de lluvia y nieve en la cordillera. Estas lluvias, producidas por la condensación y precipitación de la humedad de masas de aire, ascienden por el calentamiento del suelo. Estimaciones en base a la relación altura versus precipitación, indican una precipitación media de 53 mm anuales en toda la cuenca.

Dado el tipo de lluvias, la gran mayoría de ellas se evaporan antes de generar escorrentía. Sin embargo, en este informe se asume que las precipitaciones nivales serían las que circularían por las quebradas recargando el acuífero de forma continua. Según citas a otros estudios históricos realizados en la cuenca del salar de Atacama, **podría esperarse que un 22,4 % de la precipitación escurre y se infiltra antes de alcanzar el salar recargando así el acuífero. El resto de la precipitación (77,6%) se evaporaría**.

En base a la hipótesis de equilibrio entre entradas y salidas en la cuenca, **Orellana *et al* estima una recarga media anual de 75 hm^3 equivalentes 2.380 L/s**. De acuerdo a esta hipótesis, la descarga por evaporación desde el acuífero alcanzaría un valor de 363 mm anuales para un área de costra salina de 207 km^2.

Otros estudios realizados por ENDESA en la zona, son citados en este informe sin definir ni el autor ni el origen, asumen una evaporación media, en toda la cuenca y desde evaporímetros WB, de 2.250 mm anuales.

Hidrogeología

En este informe, se presentan los datos hidrogeológicos extraídos de unos pozos construidos en el año 1969. En ese año se construyeron 29 sondajes de pequeño diámetro y profundidad habilitados con fines de observación y distribuidos a lo largo de la cuenca. (**Figura 5-2**). Se ubicaron solo en el acuífero superficial del salar, con una profundidad media de 15 m y perforándose un total de 446,5 m. En estos pozos, según se cita, se realizaron pruebas de bombeo para la obtención de parámetros hidráulicos, sin especificar los ensayos de bombeo ni las características de los mismos.

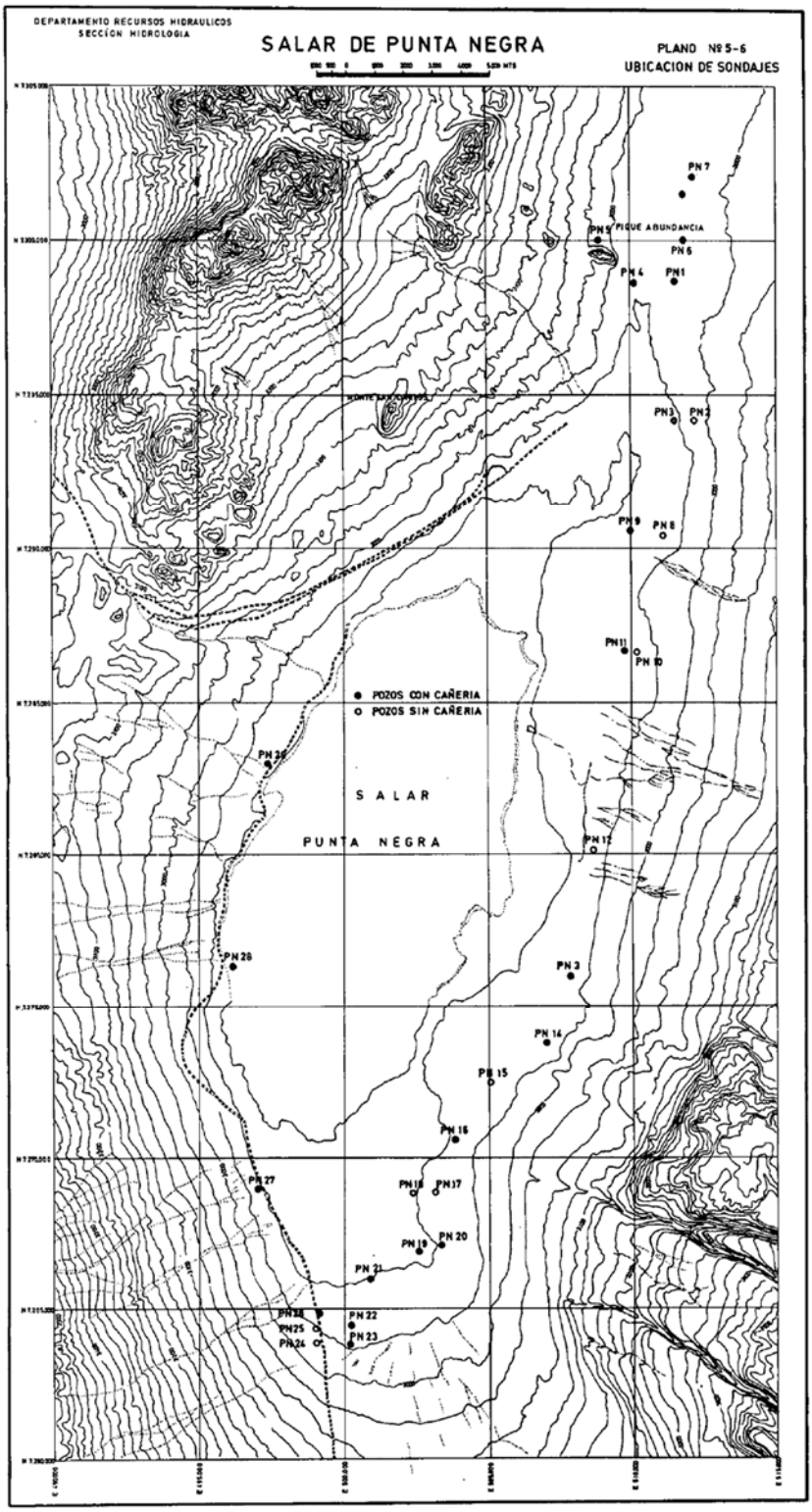


Figura 5-2.Ubicación de los pozos construidos en el marco del proyecto 1969. Fuente: Orellana *et al*. 1972.

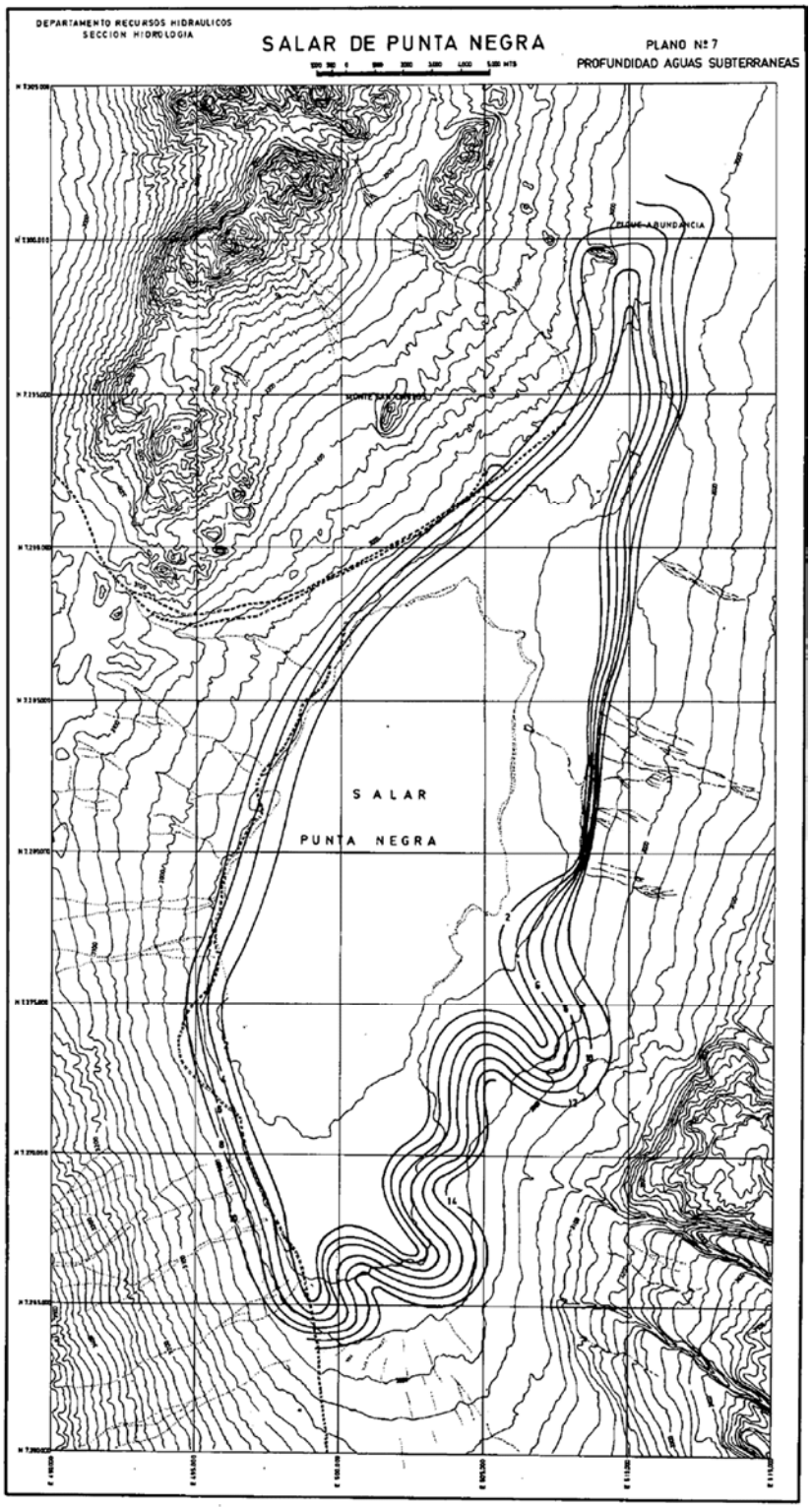


Figura 5-3. Mapa de isoprofundidades de nivel de la zona de estudio. Fuente: Orellana et al. 1972.

De la perforación de los sondajes, se definió que en general, el **nivel freático** se presenta a escasa profundidad en las cercanías de la costra salina, aumentando la profundidad a medida que crece la distancia de separación a la zona de descarga (**Figura 5-3**).

Algunos de los pozos presentan fluctuaciones del nivel estático, que se atenúan a medida que se aproximan a la zona de descarga. En un principio, Orellana *et al* correlaciona este hecho con los mecanismos de recarga.

Según los bombeos realizados, se distinguen dos zonas con diferentes características hidrogeológicas. Un primer sector llamado **Pirque Abundancia** que presenta bajas transmisividades del orden de 23 m^2/d con acuíferos supuestamente de menor extensión. Un segundo sector situado en el borde occidente presentaría transmisividades más altas del orden de 400 m^2/d.

En relación al coeficiente de almacenamiento, se define según los resultados obtenidos, que el drenaje diferido tiene un efecto sustancial sobre el ensayo, siendo el valor obtenido poco fiable. No obstante, en este informe concluyen que se podría determinar un valor de coeficiente de almacenamiento sería del orden de S=10%.

Además, Orellana *et al* realiza un cálculo aproximado del volumen embalsado en el acuífero aluvial. Si se supone un área de 517 km^2, un espesor saturado de 150 m y un coeficiente de almacenamiento del 10%, el volumen almacenado sería de 7.750 hm^3. Posteriormente, calculan cual sería el volumen que se podría extraer deprimiendo el nivel 5 m y en ausencia de recarga. El resultado arroja la posibilidad, en ese año, de explotar un caudal de 300 L/s durante 20 años.

2. ***CORFO-ONU-DGA-CCC. Investigación de Recursos Hidráulicos en el Norte Grande (CHI-69/535). Hidrogeología de la segunda región con referencia especial a las Zonas Investigadas. Volumen I. Mayo, 1977.***

En este informe se presenta una descripción regional de la geomorfología, geología, unidades hidrogeológicas, hidroquímica y una evaluación cuantitativa del recurso hídrico en la II región. Con un énfasis principal en el sector del Salar de Atacama, como un ámbito referente en la región, el sector estudiado comprende los principales salares y vegas existentes en la región de Antofagasta. En la **Figura 5-4** se presenta la ubicación de la zona de estudio.

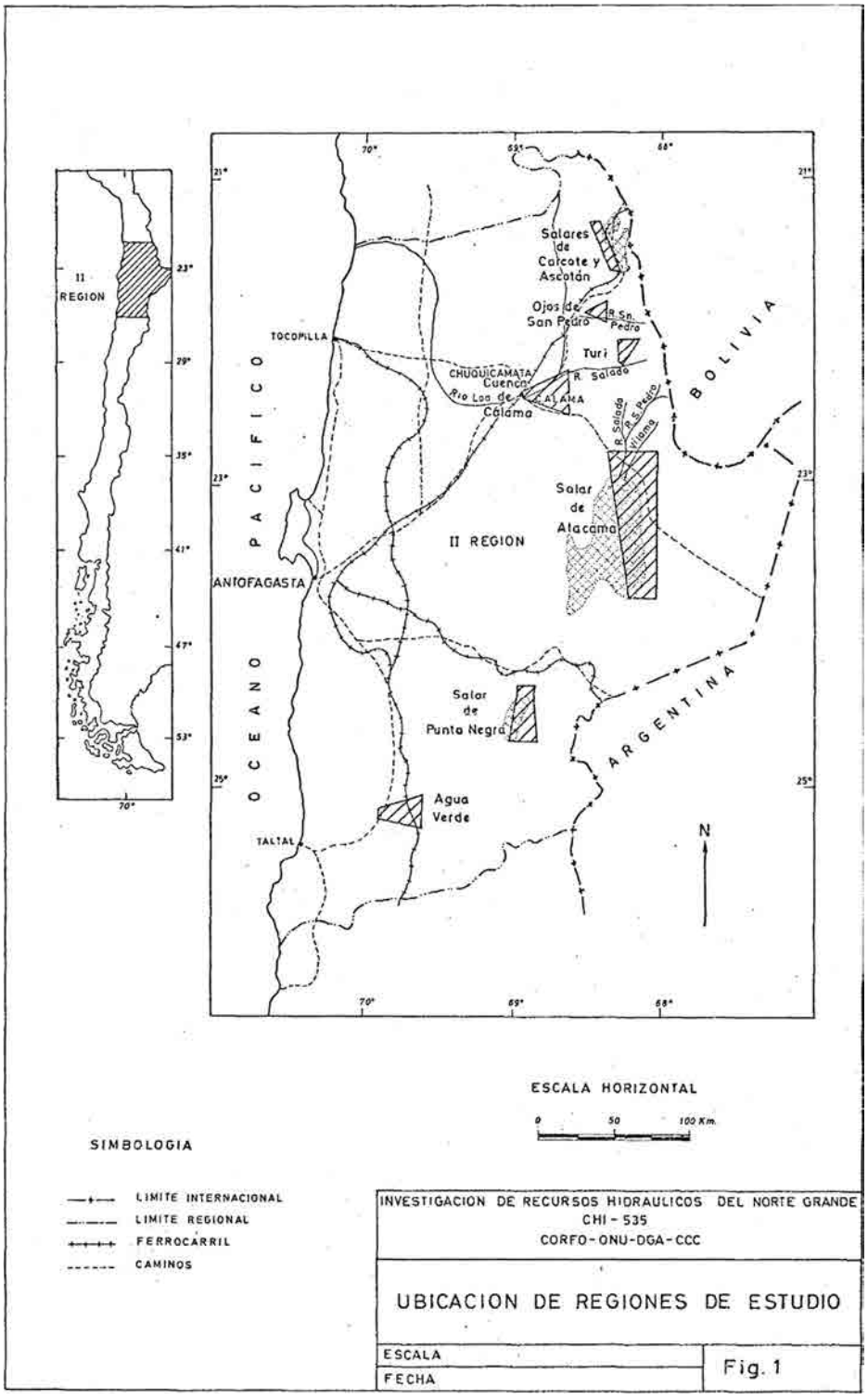


Figura 5-4. Localización del ámbito de estudio. Fuente: CORFO-ONU-DGA-CC, 1977

Geología

En relación a la información sobre la geología, en este estudio se definen cinco periodos geológicos existentes con diferentes características:

1. **Precámbrico**. Descrito como rocas metamórficas expuestas en forma aislada y de escasa distribución areal.
2. **Paleozoico**. Presente en facies marinas volcánicas metamórficas y de ambiente continental.
3. **Triásico**. De origen esencialmente volcánico, con intercalaciones continentales subordinadas, mientras que el **Jurásico**, uno de los Sistemas mejor expuestos, corresponden facies marinas, volcánicas y sedimentarias continentales y evaporíticas.
4. **Cretácico**. Formado por facies marinas, en su parte inferior, para luego transformarse en un ambiente volcánico-continental que resulta similar al que se desarrolla durante el Terciario y Cuaternario.
5. **Rocas intrusivas**. Definidas desde el Paleozoico Inferior hasta la parte alta del Terciario, asociadas a fases tectónicas principales.

Hidrogeología

En relación a la información hidrogeológica, se definen para toda la región de Antofagasta, **cuatro clases principales de Unidades Hidrogeológicas**, en función de la tipología de roca y de su disposición geográfica.

La subdivisión primaria comprende a la tipología de rocas: **rocas no consolidadas**, las cuales tienen permeabilidad primaria, **rocas consolidadas** con permeabilidad en la forma de poros entre granos de los sedimentos consolidados y **rocas consolidadas con la permeabilidad secundaria** (fracturas, efectos tectónicos o a contracción durante el enfriamiento de coladas de lava).

La definición de la subdivisión primaria se realiza de la siguiente forma:

1. **Rocas Pre-Terciario Superior**. Rocas sedimentarias y lavas, deformadas por los ciclos orogénicos, más intrusivos graníticos asociados con esto ciclos.

2. **Lavas e ignimbritas Post-Terciario Superior**. Materiales no deformados por orogénesis, aunque con presencia de fracturas por fallas.
3. Sedimentos lacustres y aluviales del Terciario Superior.
4. **Sedimentos cuaternarios y también Terciario Superior**, incluyendo sedimentos de salares, playas, ríos y abanicos aluviales.

Con esta subdivisión primaria, en este informe se definen las **Unidades hidrogeológicas** como unidades con disposición regional en forma de cinturones orientados norte-sur, subparalelos a la costa. En más detalle, se especifica la ubicación de las rocas no consolidadas entre las Cordilleras de la Costa, Domeyko y Los Andes, es decir, en valles antiguos, flancos de las cordilleras y en cuencas intramontañas.

Además, tal y como se muestra en la **Figura 5-5**, presentan un perfil hidrogeológico regional, mostrando las **zonas de descarga** del agua subterránea y sectores con mayor potencial como reservorio, en base a las apreciaciones siguientes:

- ***Los salares representan afloramientos de agua subterránea.***
- ***Las partes de los ríos donde el caudal de agua es permanente representa el afloramiento de agua subterránea.***
- ***La profundidad del agua subterránea es somera bajo las vegas (llanuras naturales con una cubierta de plantas las cuales incluyen freatofitas).***
- ***La profundidad de agua subterránea bajo los depósitos de salitre es Somera.***
- ***Los cinturones de rocas consolidadas tienen muy poca conductibilidad hidráulica, pero no son barreras completas al flujo de agua subterránea.***

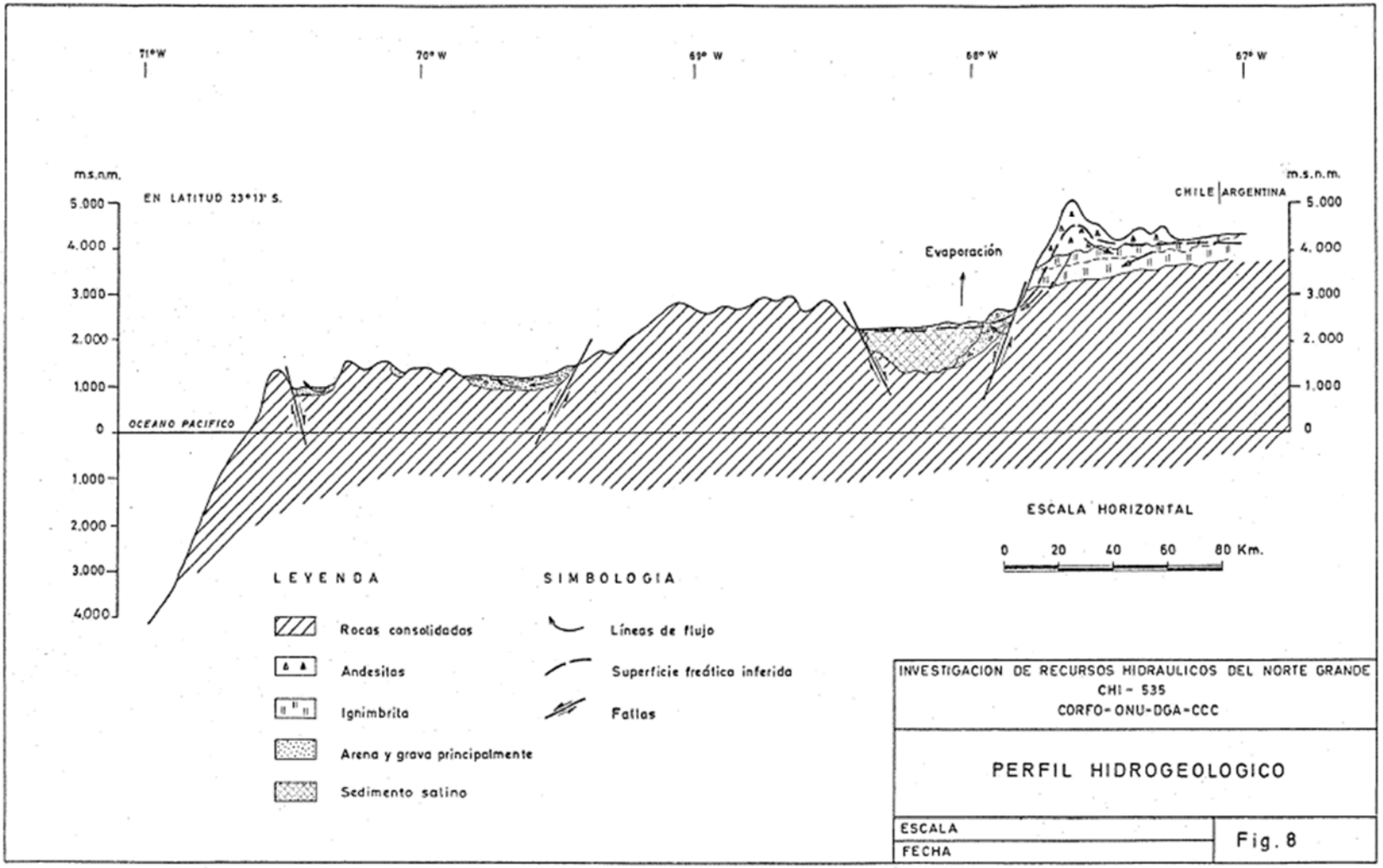


Figura 5-5. Perfil Hidrogeológico regional de Norte Grande. Fuente: CORFO-ONU-DGA-CC, 1977

En relación a la misma **Figura 5-5**, y a las consideraciones para su creación, en el informe se definen las **Zonas de Descarga** como:

- ***Los ríos, en la forma de quebradas profundas, con fuentes en la Alta Cordillera y entre las latitudes 21° y 24°. La constancia de los caudales en los ríos indican que ellos provienen de una descarga subterránea, variando escasamente en épocas de crecidas.***
- ***En salares, vegas y playas, la pérdida del agua subterránea es por evaporación y evapotranspiración. La evaporación potencial diaria para gran parte de la región donde existen salares es de 6 mm/día hasta 9 mm/día. Se estima que las zonas concéntricas de freatofitas son zonas de descarga muy importante.***
- ***Se estima que en el pasado la pérdida de agua a partir de los depósitos de salitre fue muy importante, pero la evaporación en la actualidad debe ser baja.***

La distribución de las **zonas de descarga** indica que el flujo de agua subterránea ocurre principalmente a través de las rocas no consolidadas y, en menor grado, en lavas terciarias, ignimbritas, arcillas o cenizas. Los acuíferos, en las rocas no consolidadas, son constituidos por arena y grava, separados por los acuitardos de ignimbrita, arcilla o ceniza.

En relación a las **Zonas de Recarga,** en este informe las localizan principalmente en los volcanes de la Cordillera de los Andes, pero el mapa de superficie freática indica que la región del Altiplano ubicada al este de la Cordillera, podría ser también importante como **región de recarga**. En otras palabras, las rocas consolidadas en muchos casos no reciben recarga directamente por infiltración, pero si principalmente como subflujo, con las líneas de flujo regional originándose en las partes altas de los volcanes o en el Altiplano.

En la **Tabla 5-2** se presenta las características geológicas e hidrogeológicas de diferentes ubicaciones en la zona de estudio comprendida en el informe analizado. En esta tabla se define el Salar de Punta Negra con una relación entre la Recarga y el Almacenamiento alta para los conos aluviales emplazados cerca de salares.

Situaciones	Ubicaciones	$\frac{R}{S}$ (Recarga) (Almacenam.)
(A) Sedimentos cerca de una quebrada profunda	Turi Ojos San Pedro	"alto"
(B) Cuencas sedimentarias entre la Cordillera de la Costa y la Cordillera de los Andes	Cuenca del Tamarugal Cuenca Calama (Chiu-Chiu y Calama) Agua Verde	"bajo"
(C) Conos aluviales cerca de los salares	Salar de Ascotán y Salar de Carcote Salar de Atacama Salar de Punta Negra	"alto"

Tabla 5-2. Características hidrogeológicas de las ubicaciones de la zona de estudio. Fuente: CORFO-ONU-DGA-CC, 1977

En el mismo informe, se presenta una definición de la **calidad hidroquímica de los acuíferos**, clasificando la calidad de las aguas subterráneas en 5 clases (I, II, III, IV y IV). Las clases I, II y III están frecuentemente asociadas en este orden escrito, a lo largo de las líneas de flujo. Por el contrario, las clases IV y V no las definen en una determinada secuencia (**Tabla 5-3 y Tabla 5-4**).

TABLA Nº 1

Clases químicas del agua subterránea (en mg/l)

Clase	TSD	B	As	SO_4/Cl	Mg/Ca	Ubicaciones
I	600 - 4000	2 - 8	0.001 - 0.5	0.15 - 0.7	0.5 - 0.9	Salar de Atacama Salar de Punta Negra Salar de Ascotán Turi,Ojos de San Pedro
II	4000 - 7000	2 - 8	0.05 - 0.1	0.03 - 0.3	0.8 - 3	Salar de Carcote Salar de Atacama, Turi, Cuenca de Calama
III	50000 - 350000	2 - 8	0.9	0.1 - 0.2	1 - 50	Salar de Carcote Salar de Ascotán Salar de Atacama Salar de Punta Negra
IV	1000 3000	2 - 8	0.2 - 0.9	1 - 2	0.25-0.50	Agua Verde Pampa del Tamarugal Río Loa sobre Lequena
V	2000 - 9000	50 - 190	8 - 20	0.05 - 0.1	0.1 -0.25	El Tatio

Tabla 5-3. Clasificación de la calidad del agua subterránea en el Norte Grande. Fuente: CORFO-ONU-DGA-CC, 1977

En general, en el informe analizado, los acuíferos existentes se han definido como acuíferos emplazados en los conos aluviales ubicados en los bordes de los salares, presentan una cuña de agua salada.

T A B L A N° 2 (Continuación)

Rango típico de composición de agua en cada zona

mg/l	SALAR DE CARCOTE		SALAR DE PUNTA NEGRA		AGUA VERDE		CUENCA DE CALAMA		CUENCA DEL TAMARUGAL	
	Desde	Hasta	Desde	Hasta	Desde	Hasta	Desde	Hasta	Desde	Hasta
TSD		17984	505	3572	678	908	3480	12944	800	9240
Ca		822	14	195	98	94	87	922	-	777
Mg		256	3	4	17	14	131	218	-	68
Na		4670	138	960	105	143	900	2875	-	2175
K		340	7	119	9	16	60	-	-	45
Na + K		0.0	-	-	-	-	-	-	-	-
Li		-	-	-	-	-	-	-	-	0.2
CO_3		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-	0.0
HCO_3		64	127	86	53	57	227	368	-	46
Cl		8903	149	1598	103	228	1560	4761	-	3794
SO_4		162	65	610	282	341	237	2517	-	1345
NO_3		3.7	-	-	11	9.4	1.02	142	-	147
SiO_2		23	-	-	33	33	-	63	-	12.8
B		14	4	5	1	1.3	10	16.2	-	1.35
As		0.0	0.05	0.26	-	0.08	0.24	1.56	-	0.0
pH		7.2	-	8.05	7.35	7.5	8.5	6.68	-	7.58
CE mmhos/cm			725	5900	890	1020	5500	16100	-	13000
N° Pozos	1		21		5		2		30	

Tabla 5-4. Rango Típico de composición química en el Salar de Punta Negra. Fuente: CORFO-ONU-DGA-CC, 1977

Otra sección en este informe es la estimación cuantitativa de los recursos hídricos para cada sector de estudio. Como se puede ver en la **Tabla 5-5**, para el Salar de Punta Negra, se estima una Recarga Natural de 800 L/s, sin especificar el origen ni las unidades hidrogeológicas relacionadas.

T A B L A N° 5 (continuación)

Análisis cuantitativos de agua subterránea

Ubicación	Zona	Rec.Natural		Minando almacenamiento óptimo de un per.					Caudal total (l/s) (alternativas)			Caud. usado actual. (l/s)
		Sin desarrollo Q'a (l/s)	Con desarrollo Q"a (l/s)	Espesor med.del almac. de un períod.	Volumen Vo (m^3)	Caudal(l/s) (Alternativa) 10 años	50 años	100 años	10 años	50 años	100 años	
Salar de Ascotán	A	221	221						221	221	221	
	B	122	122						122	122	122	
	C	138	138						138	138	138	
	Total								481	481	481	
Salar de Carcote		12.2	12.2						12.2	12.2	12.2	
Salar de Pta.Negra		(800)	(800)						(800)	(800)	(800)	
Agua Verde		31	31	30	$2.7x10^8$	857			888			19
							171			202		
								85.7			117	
Cuenca de Calama		poco	poco	60	$4.2x10^9$	(2600)			(2600)			
							(1300)				(1300)	
Cuenca del Tamarugal		poco	poco	50	$4.7x10^{10}$	(30000)			(30000)			
							(15000)				(15000)	

Tabla 5-5. Análisis cuantitativo en el Salar de Punta Negra. (CORFO-ONU-DGA-CC, 1977)

En resumen, la información presentada en el informe de la CORFO-ONU-DGA-CC, se describen las características del Salar de Punta Negra de la siguiente forma:

Geología y Geomorfología

El Salar de Punta Negra está formado por rocas no consolidadas y ceniza del Terciario Superior y Cuaternario, presentándose en un graben limitado por rocas ígneas. La información estratigráfica histórica indica un espesor superior a 400 m.

Topografía

El Salar de Punta Negra se define por una altura de 2.950 msnm y los volcanes del sector Este con una altura máxima de 5.500 msnm.

Clima

- ***Precipitación anual de la cuenca sedimentaria (0- 50 mm)***
- ***Precipitación anual en los volcanes (200 - 300 mm)***
- ***Evaporación potencial diaria en la cuenca sedimentaria (4,15 - 6 mm)***

Hidrogeología

Existen algunos acuíferos en la cuenca, separado por capas de arcilla y limo. Las zonas de recarga se ubican en los volcanes del sector este, y la de descarga, la constituye el Salar y las vegas. En este informe se define la posibilidad de existir una recarga importante desde la Cordillera de Domeyko.

Análisis Cuantitativo

En la cuenca del Salar de Punta Negra, la recarga natural se estima en los 800 L/s. Considerando este caudal estimado de recarga, la buena calidad hidroquímica de las aguas y el nivel freático poco profundo se presenta la hipótesis sobre la posibilidad de existir una **eventual recarga** desde el oeste de la cuenca Salar de Punta Negra, concretamente desde el sector de la **Cordillera de Domeyko**.

3. DGA. Análisis crítico de la red de medición de niveles de agua subterránea. II Región. Álamos y Peralta Ingenieros. 1987.

El objetivo de este informe de la DGA, fue actualizar el catastro de pozos existentes en la II Región. El catastro realizado en la cuenca del Salar de Punta Negra se basó en un informe de Minera Escondida. Según *Álamos y Peralta,* la empresa minera cuenta con un total de 35 sondajes de reconocimiento tipo S, de los cuales 7 tienen más de 100 metros, llegando a un máximo de 494 metros; de ellos 15 están secos y los restantes tienen el nivel estático entre **1,6 y 106,13** metros.

Minera Escondida, además de lo anterior, presenta la existencia de 65 sondeos de exploración "ES" con una media de 244 m de profundidad de habilitación. De ellos, solo 17 carecen de nivel estático, los demás están comprendidos entre 4,92 y 176,35, salvo 2 que son surgentes.

En algunos de estos sondajes, en el informe de la DGA se escribe sin especificar los detalles técnicos, se realizaron **31 pruebas de bombeo** por el método de aire comprimido, durante el proceso de perforación de los 65 sondajes. Como conclusiones de los ensayos hidráulicos, se define la mayoría de **transmisividades** alrededor de los 40 m^2/d.

Por último se construyeron 5 pozos de producción (Serie T) repartidos a lo largo del borde E del salar. El nivel freático en estos pozos se encuentra entre 8,16 m y 124,97 m de profundidad. La zona dónde se ubicaron estos pozos presenta transmisividades entre 200 m^2/día y 282 m^2/d y los caudales de producción entre 19 L/s y 36 L/s con una capacidad total de extracción de 149 L/s.

En la **Figura 5-6** se presentan los resultados de los parámetros hidráulicos definidos en el informe de *Álamos y Peralta* Ingenieros.

Tabla 1.4 POZOS DE PRODUCCION /

CARACTERISTICAS FISICAS

Pozo	Coordenadas,m Latitud	Longitud	Cota	Profundidad m	ft.	Nivel freático m.b.p.m.	Cota
T-1	7284.703	513.023	3033.15	186.7	612	67.20	2965.95
T-2	7307.628	514.024	3016.45	107.4	352	37.86	2978.59
T-3	7302.036	511.847	2985.44	128.1	420	8.16	2977.28
T-4	7295.288	514.785	3039.26	189.1	620	65.75	2973.51
T-5	7258.135	502.077	3088.28	204.4	670	124.97	2963.31

CARACTERISTICAS HIDROLOGICAS

Pozo Nº	Gasto l/s	g.p.m.	Transmisividad m^2/hr	g.p.d./pie	Coeficiente Almacenaje
T-1	36	570	10.4	20.000	0.13
T-2	32	510	9.57	18.400	0.08
T-3	32	510	11.75	22.600	4×10^{-4}
T-4	30	475	11.49	22.100	0.20
T-5	19	300	8.32	16.000	0.10

Calidad de agua

Pozo Nº	Salinidad,mg/l	Conductividad,/Umhos/cm	Relación vertical / Conductividad horizontal Kv/Kh
T-1	6000	8200/8260	1/7
T-2	700	953/1020	1/13
T-3	1200	1790/1800	1/10
T-4	1850	2350/1400	1/10
T-5	7500	10540 /11630	1/100

Figura 5-6. Parámetros Hidráulicos de pozos de producción. Fuente: Álamos y Peralta Ingenieros, 1987

En este informe, se define un caudal potencial de extracción para toda la cuenca en función de un volumen embalsado calculado. Según el **volumen embalsado** bajo las condiciones actuales (1987) se pueden extraer como mínimo 1.150 L/s en forma continua y durante 30 años, a una razón de bombeo del 50%. En la **Figura 5-7** se muestra la distribución de los distintos pozos (Serie S y T) en la cuenca del Salar de Punta Negra.

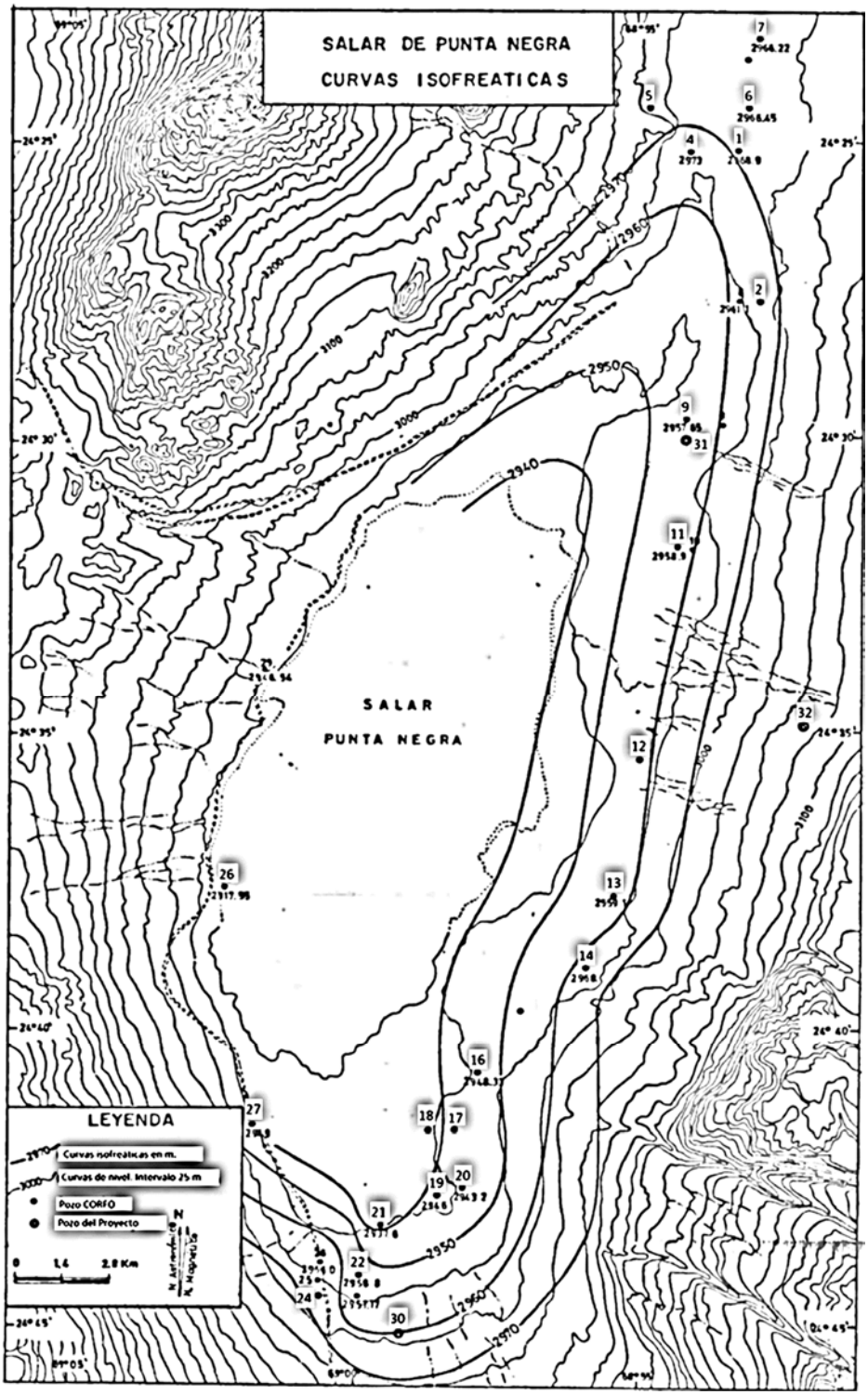


Figura 5-7. Distribución de pozos en el Salar de Punta Negra. Fuente: Álamos y Peralta Ingenieros, 1987

4. ***Convenio Cooperación DGA-UCN-IRD. Geoquímica de aguas en cuencas cerradas: I, II y III Regiones-Chile. 1999.***

Este documento consta de un estudio detallado sobre la **geoquímica de aguas del salar** de Punta Negra. Aparece la información de los puntos de muestreo en los que se ha basado el estudio (**Tabla 5-6**), un cuadro de análisis, diagramas de la composición química de las aguas de aporte y mapas evolutivos de la calidad hidroquímica.

Características Generales

Se define que el salar de Punta Negra se encuentra en la II Región, en una depresión tectónica entre la Cordillera de Domeyko y la Cordillera de los Andes, al sur del salar de Atacama, caracterizándose por grandes variaciones morfológicas, climatológicas y geológicas. Con precipitaciones casi nulas en la Cordillera de Domeyko, ascienden a 250 mm/año en la Cordillera de los Andes.

En cuanto a la geología de la cuenca, en este informe se define como una mezcla compleja de terrenos sedimentarios, de formaciones volcánicas y de rocas plutónicas. En particular, se caracteriza el salar como una costra de sal (yeso y halita) con pocas y pequeñas lagunas someras, y con características morfométricas y climatológicas tales como:

- ***Altura de salar: 2.945 msnm***
- ***Superficie de la cuenca: 4.263 km^2***
- ***Superficie del salar: 250 km^2***
- ***Superficie de las lagunas 0,1 - 0,2 km^2***
- ***Precipitaciones: 50 mm/año (salar) - 250 mm/año (cuenca oriental)***
- ***Evaporación potencial: 2.000 mm/año (salar)***
- ***Temperatura media: 10°C (salar)***

El descubrimiento del yacimiento de cobre de Minera Escondida incentivó numerosos estudios sobre la hidrogeología de la cuenca, ya que la empresa minera explota las napas del **sector oriental** y en su programa de gestión ambiental, monitorea los parámetros físicos, químicos y biológicos de las lagunas del salar.

En la **Tabla 5-6** se presenta los puntos utilizados para el análisis cualitativo del Salar de Punta Negra, y en la **Figura 5-9** su disposición en la cuenca.

NUMERO	FECHA	HORA	UTM (WGS 1984 Huso 19S)		ALTURA (msnm)	TIPO DE MUESTRA
			ESTE	NORTE		
PUN-1	24-05-1994	13H15	506.460	7.284.025	2.945	Laguna (Esc: VCL-2 o 2L)
PUN-2	24-05-1994	14H15	507.325	7.283.560	2.945	Laguna (Esc: 2C)
PUN-3	24-05-1994	14H50	508.325	7.282.310	2.945	Laguna (Esc: 2V)
PUN-4	24-05-1994	16H30	507.305	7.273.960	2.950	Manantial difuso (Esc: 3S)
PUN-5	24-05-1994	17H00	506.525	7.274.500	2.945	Dren (Esc: 3C)
PUN-6	25-05-1994	11H15	504.275	7.276.815	2.945	Laguna (Esc: 3L2)
PUN-7	25-05-1994	13H25	499.270	7.267.345	2.945	Laguna (Esc: V3L)
PUN-8	25-05-1994	13H40	499.240	7.267.190	2.945	Cateo (Esc: V3S)
PUN-9	25-05-1994	16H00	496.925	7.272.770	2.945	Laguna (Esc: VCL-4)
PUN-10	25-05-1994	16H20	496.810	7.272.635	2.946	Manantial difuso (Vegas)
PUN-11	25-05-1994	18H00	507.925	7.293.925	2.960	Pique San Carlos(Esc: VCL-1)
PUN-12	26-05-1994	12H15	542.635	7.279.800	4.190	Manantial corriente (Zorras 1)
PUN-13	26-05-1994	13H25	542.100	7.277.250	4.190	Manantial corriente (Zorritas)
PUN-14	26-05-1994	15H50	530.300	7.290.000	3.520	Manantial corriente (Zorras 2)
PUN-15	26-05-1994	14H30	524.275	7.291.170	3.350	Napa (pozo ES-24)
PUN-16	26-05-1994	17H55	508.535	7.281.165	2.952	Napa (pozo SF-2)
PUN-17	30-05-1994	12H45	525.740	7.273.255	3.610	Vertedero Llullallaco
PUN-18	30-05-1994	13H45	507.445	7.274.950	2.953	Napa (pozo SG2)
PUN-19	30-05-1994	15H50	503.175	7.267.270	2.953	Napa (pozo UN-19)
PUN-20	30-05-1994	16H30	502.325	7.265.310	2.955	Napa (pozo SH-1)
PUN-21	31-05-1994	17H45	515.000	7.301.000	3.040	Napa (pozo producción 12)
PUN-22	31-05-1994	12H20	532.800	7.259.850	4.080	Manantial corriente Tocomar
PUN-23	31-05-1994	16H30	491.250	7.227.000	3.780	Río Frío
PUN-24	31-05-1994	18H15	500.585	7.263.120	2.970	Napa (pozo S-40)

Tabla 5-6. Puntos utilizados para la caracterización hidroquímica del Salar de Punta Negra. Fuente: (Risarcher, 1999)

La información principal de este informe es la caracterización de la calidad de las aguas subterráneas existentes en el sector de estudio, presentada en 5 puntos:

- ***Composición de las aguas***
- ***Origen de las sales disueltas***
- ***Vías evolutivas y relación con la geología***
- ***Evolución cuantitativa de aguas***
- ***Balance hídrico***

En detalle, el documento analizado presenta:

Composición de las aguas

Se puede distinguir claramente cuatro grupos de agua según su posición en la cuenca:

- ***El*** anillo exterior***: son aportes en sectores elevados de la cuenca, tales como vertientes fluyentes, ríos y una napa.***
- ***El*** anillo interior***: son napas cerca, pero no pegadas, a la orilla del salar.***
- Aguas de orilla***: son napas o vertientes difusas pegadas a la orilla.***
- ***Las*** lagunas ***dentro del salar.***

La **Tabla 5-7** resume las características químicas de las aguas de cada grupo y la **Figura 5-8** presenta las composiciones de los componentes mayores en diagramas triangulares. En estos diagramas, se desprende como conclusión la existencia de ***alta salinidad*** en la mayor parte de los aportes del anillo exterior, es decir, de las aguas ubicadas más arriba de la cuenca. En cambio, las aguas del anillo interior estando mucho más cercanas al salar, no tienen mayor salinidad, como podría esperarse. Las aguas de la orilla, pegadas al salar, tienen una salinidad elevada probablemente a causa de una cuña salina o de la pre-evaporación de las napas al llegar a las orillas.

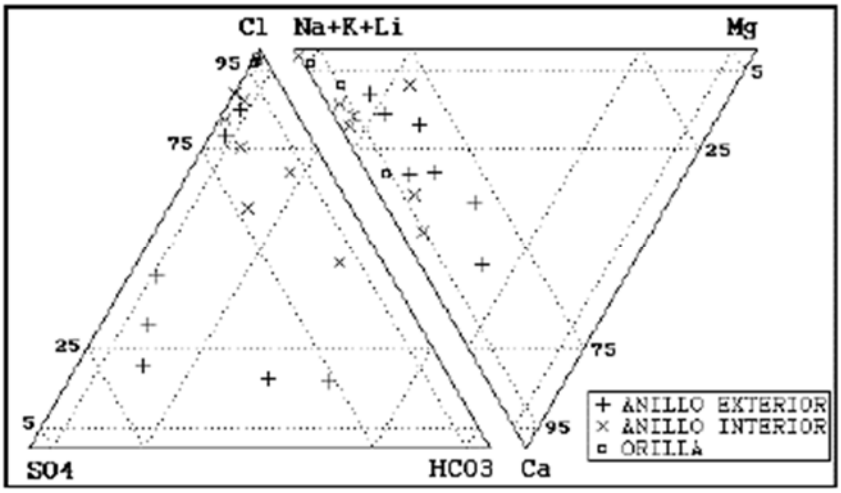


Figura 5-8. Composición de las aguas de aporte del Salar de Punta Negra. Fuente: Risarcher, 1999

	SALINIDAD (mg/l)	TIPO QUÍMICO CATIONES	TIPO QUÍMICO ANIONES	VIA EVOLUTIVA
ANILLO EXTERIOR				
PUN-22	196	Na-Ca-(Mg)	/ HCO3-SO4-(Cl)	CO3
PUN-23	272	Ca-Na-(Mg)	/ HCO3-SO4-(Cl)	SO4 (N)
PUN-12	816	Na-Ca-(Mg)	/ SO4-(Cl)-(HCO3)	SO4 (N)
PUN-13	1206	Na-Ca-(Mg)	/ SO4-Cl-(HCO3)	SO4 (N)
PUN-15	2945	Na-(Ca)-(Mg)	/ Cl-(SO4)	SO4 (N)
PUN-17	3197	Na-(Ca)-(Mg)	/ Cl-(SO4)	Ca
PUN-14	5400	Na-(Ca)-(Mg)	/ SO4-Cl-(HCO3)	SO4 (N)
ANILLO INTERIOR				
PUN-24	480	Na-(Ca)	/ Cl-(SO4)	Ca
PUN-19	549	Na-(Ca)	/ Cl-(HCO3)-(SO4)	CO3
PUN-21	603	Na-Ca	/ Cl-(SO4)-(HCO3)	Ca
PUN-20	636	Na	/ Cl-HCO3-(SO4)	CO3
PUN-18	2818	Na-(Ca)	/ Cl-(SO4)	Ca
PUN-16	3325	Na-Ca-(Mg)	/ Cl-(SO4)	Ca
PUN-11	3735	Na-(Mg)-(Ca)	/ Cl-(SO4)-(HCO3)	SO4 (A)
ORILLA				
PUN-8	6877	Na	/ Cl	Ca
PUN-4	10432	Na-(Ca)-(Mg)	/ Cl	Ca
PUN-10	14160	Na-Ca	/ Cl	Ca
LAGUNAS				
PUN-7	9451	Na	/ Cl	Ca
PUN-3	10532	Na-(Ca)-(Mg)	/ Cl-(SO4)	Ca
PUN-2	12750	Na-(Ca)-(Mg)	/ Cl-(SO4)	Ca
PUN-5	17815	Na-(Ca)-(Mg)	/ Cl	Ca
PUN-1	20245	Na-(Ca)-(Mg)	/ Cl-(SO4)	Ca
PUN-9	41958	Na-(Ca)	/ Cl	Ca
PUN-6	233344	Na	/ Cl	Ca

Tabla 1 : Salinidades, tipos químicos y vías evolutivas de las aguas de Punta Negra
CO_3 = vía carbonatada ; SO_4 (A) = vía alcalina sulfatada
SO_4 (N) = vía neutra sulfatada ; Ca = vía calcica.

Tabla 5-7. Resultados químicos y vías evolutivas del Salar de Punta Negra. Fuente: (Risarcher, 1999)

Origen de las sales disueltas

Las aguas diluidas de los dos anillos (anillo exterior e interior) no plantean mayor problema en cuanto al origen de sus componentes disueltos por alteración de rocas. La vertiente (PUN-22), que surge en las faldas del volcán Lullaillaico, con Na y HCO3 como componentes principales, es una típica agua de alteración de roca volcánica. El agua del río (PUN-23) tiene el calcio como catión principal, lo que refleja los terrenos mayormente sedimentarios que lixivia. La composición de las aguas de napa (PUN-19, PUN-21 y PUN-24), con Na y Cl dominantes, corresponde a terrenos sedimentarios predominantes alrededor del salar.

Se plantea un problema de contaminación para el agua de napa (PUN-20). Su pH muy elevado (PUN-9, PUN-70) asociado a un contenido anormalmente bajo de Mg (0,06 mg/l) indica casi seguramente una contaminación por los cementos del pozo. El calcio esta probablemente también afectado, porque un aumento de pH induce la transformación del bicarbonato en carbonato, lo que provoca la precipitación de carbonato de calcio. El agua de napa (PUN-19) tiene también un pH un poco elevado (9,01), pero no presenta reducción apreciable de su contenido de magnesio. Podría entonces presentar una muy leve contaminación de la misma índole.

El problema principal es el origen de la alta salinidad de gran parte de las aguas de aporte. Si para las tres aguas salobres del anillo interior (PUN-11, PUN-16 y PUN-18) se podría abogar el efecto de la cuña salina del salar, eso no puede ser para las aguas salobres del anillo exterior. Tales salinidades en aguas de aportes se deben casi siempre a la disolución de antiguas evaporitas o salmueras. El agua de vertiente PUN-14 del anillo exterior es la más concentrada (5,4 g/l) de todas las aguas de aporte de los dos anillos, por lo que su composición debería reflejar más nítidamente las influencias de las sales o salmueras redisueltas.

Vías evolutivas y relación con la geología

Las vías evolutivas están indicadas en la **Figura 5-12** y en el mapa geológico del informe. Las aguas del anillo exterior evolucionan mayormente según la vía neutra sulfatada reflejando así la salinización de las napas de este sector por salmueras o sales de sulfato de sodio. El agua muy diluida PUN-22 sigue la vía carbonatada en buen acuerdo con la litología volcánica de esta parte de la cuenca. En caso de un origen de los componentes disueltos por alteración de rocas, la vía neutra sulfatada refleja la presencia de rocas

sedimentarias, como el caso del agua diluida PUN-23, o de rocas volcánicas con azufre. En el caso de Punta Negra, esta vía evolutiva se debe a antiguas evaporitas que han sido redisueltas. Las aguas del anillo interior tienden a seguir la vía cálcica lo que refleja la salinización de las napas por salmueras cloruradas cálcicas.

En cambio, existen excepciones como las aguas diluidas PUN-19 y PUN-20 que siguen la vía carbonatada, representando una contaminación por el cemento del pozo, impidiendo la interpretación de sus vías evolutivas. Sin embargo, son aguas diluidas, como lo son casi siempre las aguas de aporte que siguen la vía carbonatada y se encuentran cuenca abajo de PUN-22, un agua de alteración que sigue la misma vía. Es posible que la contaminación debida a los pozos no haya cambiado la vía evolutiva.

El agua de napa (PUN-11) es el único aporte del oeste de la cuenca y el único que sigue la vía evolutiva alcalina sulfatada. Eso podría deberse a alguna influencia de las rocas plutónicas (KTg) que caracterizan la geología del nor-oeste de la cuenca. Las aguas de alteración de rocas plutónicas tienden a seguir preferencialmente las vías carbonatadas o sulfatadas, dependiendo de las mineralizaciones o impurezas que contienen.

Evolución cuantitativa de aguas

En el informe se presenta la evolución cuantitativa de las aguas de aporte cuando se evaporan. La **Tabla 5-7** presenta la composición calculada de todas las aguas de aporte evaporadas por simulación computacional hasta la salinidad de la laguna PUN-1, considerando las demás aguas de lagunas con características similares.

El agua de aporte evaporada que más se acerca a la composición de la laguna (PUN-1) es la napa (PUN-18) con un coeficiente de desviación bajo. La segunda agua más parecida es el río (PUN-17) ubicado exactamente cuenca arriba de (PUN-18), pero con un coeficiente de desvío no tan bueno. Globalmente, las aguas evaporadas del anillo interior, y las más bajas del anillo exterior, se acercan netamente más a las aguas de lagunas que las del anillo exterior. Las aguas superficiales del salar de Punta Negra provienen de la evaporación de aguas de napas cercanas al salar de tipo químico cálcico. Las aguas sulfatadas cuenca arriba no tienen influencia sobre la composición de las lagunas, por lo que es probable, entonces, que las aguas de los sectores elevados al este de la cuenca no contribuyan significativamente a la alimentación del salar.

Balance hídrico

En este informe se estableció valores de los aportes superficiales al salar, despreciando las infiltraciones de las lagunas dentro del salar. Este autor no define en términos hidrogeológicos el balance de los aportes de recurso superficial al salar, sino que realiza una estimación volumétrica en función de la diferencia de las tasas de evaporación (He) de los cauces superficiales y respecto de las tasas de precipitación (Hp). La definición de la estimación de los aportes superficiales se realiza de la siguiente forma:

$$V_{ap} = S\ (He\text{-}Hp) = 390\ 000\ m^3/año = 12\ L/s$$

$$\text{con } (He = 2\ m/año;\ Hp = 0,\ 05\ m/año;\ S = 0,\ 2\ km^2)$$

Dónde:

V_{ap}= Volumen de Aporte o caudal aportante

S=Superficie del recurso

H_e=Tasa de Evaporación del sector

H_p=Tasa de Precipitación en el sector

Para un salar de este tamaño, el autor define un flujo superficial del orden de 12 L/s el cual considera, según su criterio, como muy bajo.

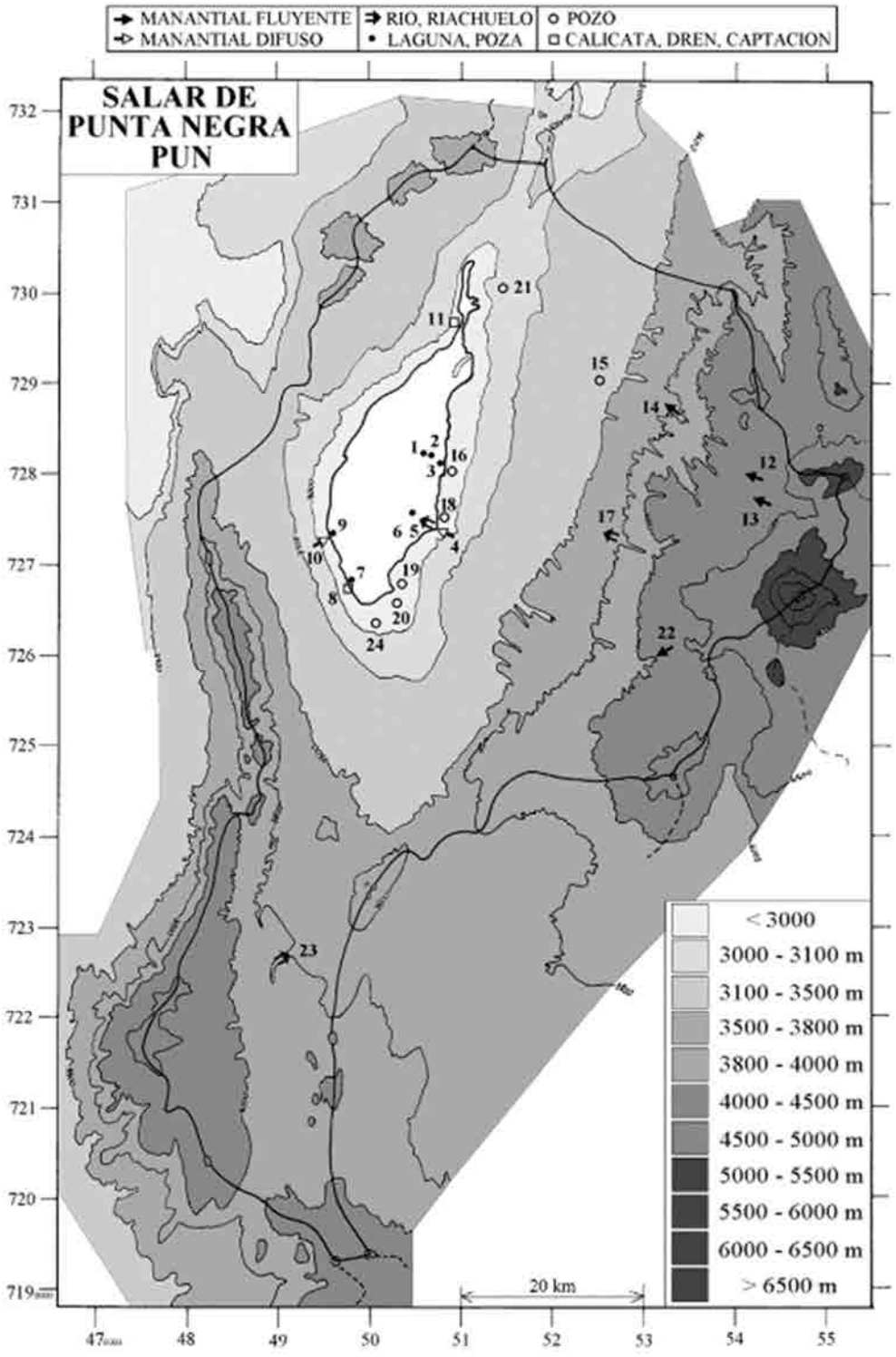


Figura 5-9. Disposición de los puntos de monitoreo en el Salar de Punta Negra. Fuente: Risarcher, 1999

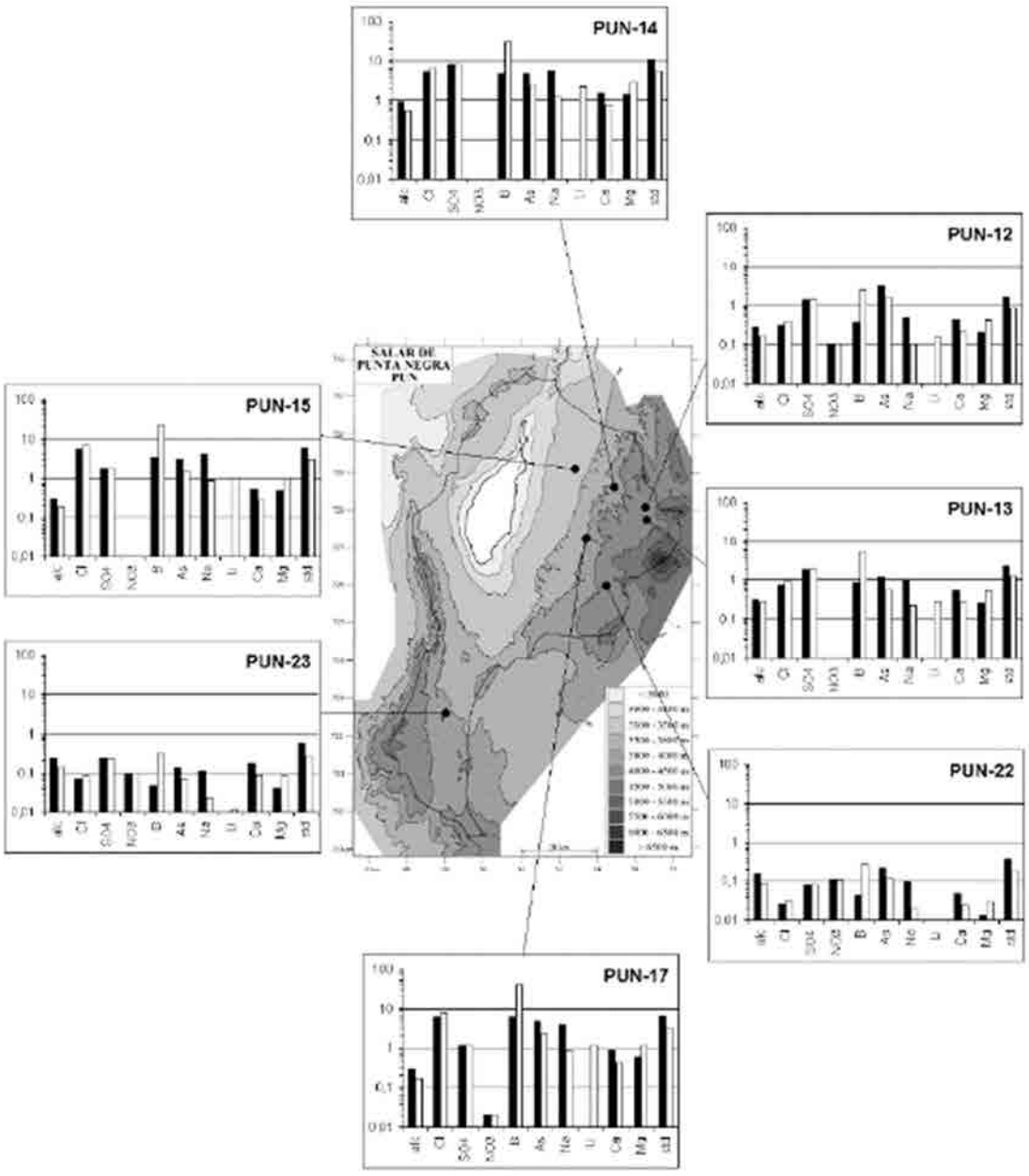


Figura 5-10. Representación de la Calidad en las zonas de aporte en el Salar de Punta Negra. Fuente: Risarcher, 1999

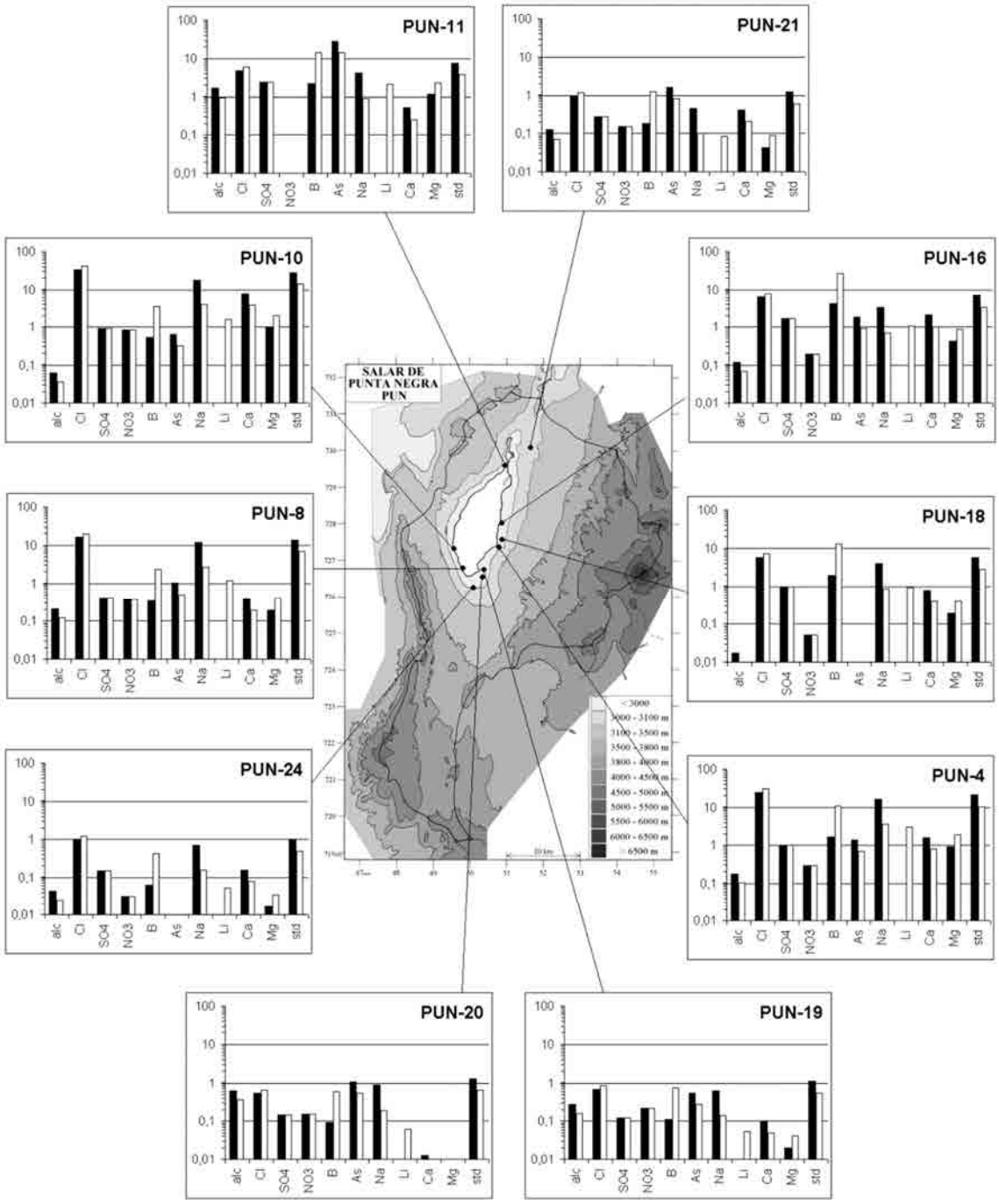


Figura 5-11. Representación de la Calidad en las zonas del salar en el Salar de Punta Negra. Fuente: Risarcher, 1999

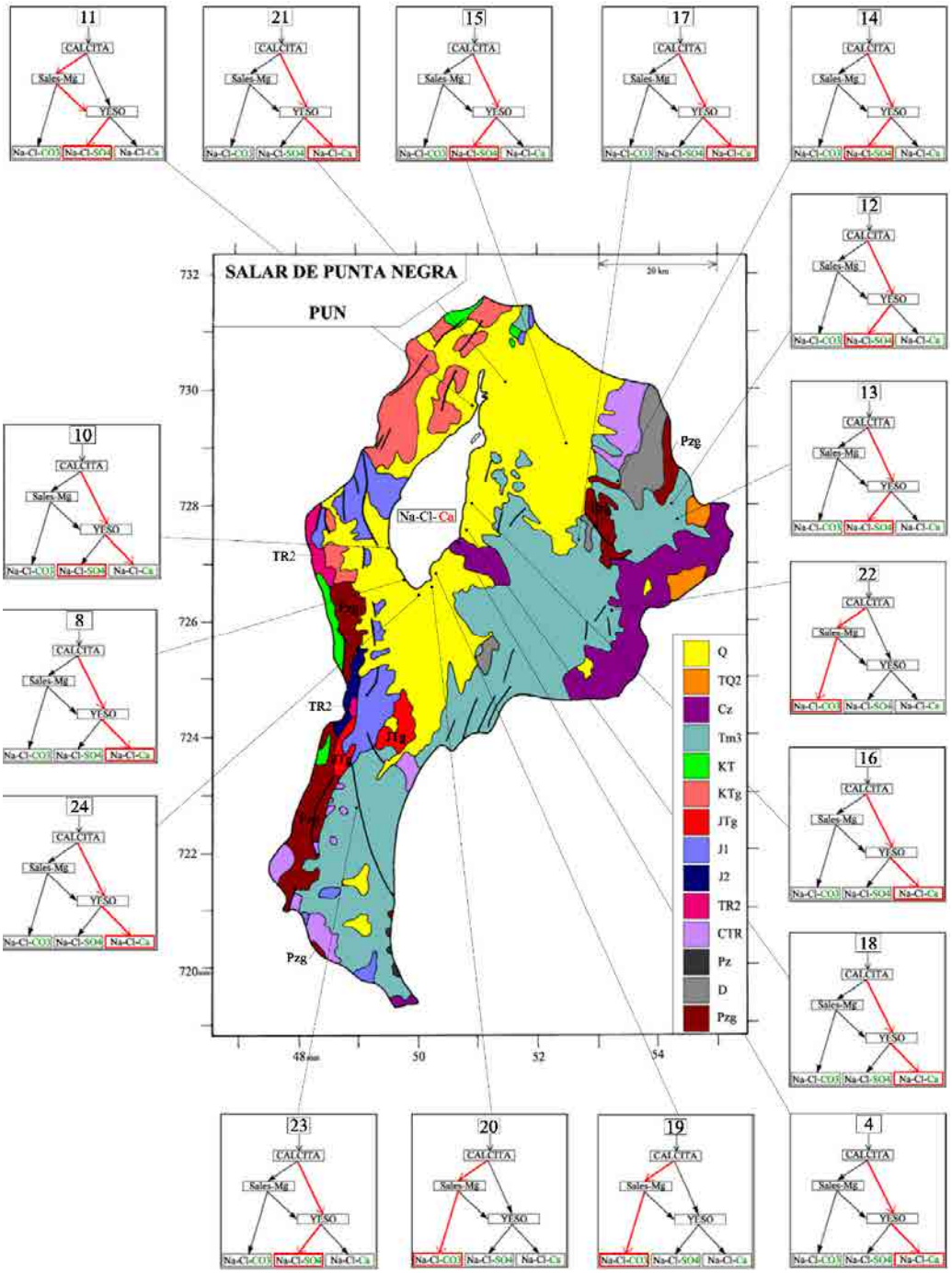


Figura 5-12. Representación de las vías evolutivas y geología en el Salar de Punta Negra. Fuente: Risarcher, 1999

En conclusión, este documento define la procedencia de las aguas de aporte de la cuenca del salar de Punta Negra por la particularidad de sufrir una doble salinización por antiguas salmueras o por sales evaporíticas. Las napas más altas en la cuenca disuelven sulfato y cloruro de sodio y evolucionan hacia la vía sulfatada, mientras que las napas más cercanas al salar disuelven cloruro de sodio y de calcio y evolucionan hacia la vía cálcica.

Cuando las aguas de aporte no han sido contaminadas por agentes geológicos, tienden a evolucionar hacia la vía carbonatada, reflejando el origen de sus componentes por alteración de rocas volcánicas, o hacia la vía sulfatada cuando drenan terrenos sedimentarios (Río Frío).

5. ***CEDREM. Anexo C: Caracterización del Medio Ambiente. Declaración de impacto Ambiental para el Proyecto de Prospección Minera OGA, II Región de Antofagasta. 2003.***

En este documento se presenta la caracterización de diferentes variables ambientales, entre ellas la Geología, Geomorfología y la Hidrogeología, del área de influencia de las concesiones mineras de la *Compañía Minera Nittetsu Chile Ltda.*, cuyos límites se localizan al sudeste de la Compañía Minera La Escondida y en el sector noroeste del Salar de Punta Negra, sobre un pedimento o glacis de denudación.

Geología

Las principales características de las variables de geología y geomorfología en el área, se concentran en el Salar de Punta Negra.

Este salar es de tipo pre andino, situado en la prolongación estructural del salar de Atacama. La cuenca es una depresión de origen tectónico rodeado por la cordillera de Domeyko y la cordillera de los Andes, definiéndose alrededor del salar de Punta Negra una planicie casi horizontal de estratos de arcilla y arenas irregularmente depositadas. La cuenca está controlada por fallas normales de dirección preferencial N – S, con componentes secundarios SE - NO. En el sector norte del salar afloran rocas paleozoicas volcanoclásticas y depósitos coluviales y aluviales antiguos, intercalados con afloramientos graníticos terciarios.

La zona del salar propiamente tal, se encuentra rellena de sedimentos terciarios y cuaternarios incluyendo los depósitos de sulfatos y cloruros de su interior, que se espacializan como sedimentos muy finos mezclados con capas salinas, en general sin material grueso excepto algunas lenguas de conglomerados con materiales clásticos gruesos. Al este de la cuenca, existen rocas efusivas y al oeste sedimentos, rocas ígneas y volcánicas pre-terciarias.

Específicamente, en el área de estudio se reconocen las siguientes unidades:

Granitoides (Pzgd)

Asignados al Carbonífero Superior – Pérmico, estos granitoides incluyen granodioritas, dioritas, granitos y gabros con variedades porfídicas dioríticas y graníticas; incluye también variedades melanocráticas a leucocráticas; localmente muestran inclusiones básicas oscura de granulometría fina. Se encuentran cortados por filones aplíticos rosados a verdosos y andesíticos dacíticos grises oscuros a verdosos. Hospeda yacimientos de cobre vetiformes y de chimenea o brechas en la cordillera de Domeyko. Se han datado edades para este intrusivo (K-Ar en biotita) de 279 ± 7 Ma y en moscovita de 598 ± 7 Ma. Se dispone en la sección central de área de estudio, intruyendo a la formación La Tabla.

Formación La Tabla (Pzlt)

Asignada al Carbonífero Superior – Pérmico, esta formación se sitúa en el sector central del área de estudio y está rodeando al intrusivo detallado con anterioridad, además de ser la causante de los únicos relieves positivos al norte del área de estudio (como el cerro del Muerto) por sobre los rellenos terciarios.

Está formada por una secuencia continental volcanoclástica integrada, predominantemente, por rocas volcánicas silíceas, donde en una relación de engrane, se reconocen facies de lavas, brechas y aglomerados andesíticos a basálticos, con intercalaciones de tobas y volcarenitas. Presenta escasa intercalaciones de calizas y tobas soldadas riodacíticas, predominando en la base de la Sierra de Almeyda.

Depósitos Aluviales y Coluviales Antiguos (Tal)

Datados en el Mioceno Superior – Plioceno, se conforman por gravas mal estratificadas con lentes de arena y limos e intercalaciones de cenizas volcánicas, formando depósitos aterrazados, de pie de monte, glacis y corrientes de barro. Se encuentran mal consolidados y disectados por la erosión actual. En zonas de falla se encuentran localmente cementadas por carbonatos y presentan niveles de travertino. Al este y sur del área, en los contornos del salar, presentan facies de limos con abundante yeso y escasa intercalaciones de gravas con clastos angulosos.

Depósitos Salinos (Qal)

Corresponde al salar y está formado por depósitos de poco espesor en fondos planos, conformados por cloruros en costra dura y seca (en el Norte del Salar); en cambio, en la zona central y sur, los depósitos del salar se definen por sulfatos y cloruros.

La costra salina del salar se puede dividir en una aureola media formada por una costra limosa blanda con eflorescencias salinas blancas (NaCl), frágiles de pequeño espesor sobre un estrato de yeso granular y una aureola interna, formada con una costra gruesa de tipo "coliflor" de cloruros y pocos sulfatos, de color blanco y terrones irregulares, bastante duros en superficie y más blandos y húmedos a algunos centímetros de profundidad, separada del núcleo por un canal de circulación de salmueras saturadas en cloruro de sodio.

Por último, existe un núcleo, formado en general por una costra gruesa pardo grisáceo, en donde la superficie se observa como un campo labrado con terrones grandes, en algunas zonas de cerca de un metro de altura, con distribuciones irregulares y chimeneas tubulares de evaporación de 4 a 20 centímetros de diámetro que alcanzan la superficie de la napa freática estimada a unos 75 a 100 cm bajo la superficie.

La aureola media tiene un ancho de 200 m a 4 kilómetros al sur oeste del salar (fuera del área de estudio) y va disminuyendo hacia el oeste hasta desaparecer en el borde occidental donde el núcleo está en contacto con el borde. En el lado oriental y norte, la aureola mide de 500 a 2.000 metros de ancho, mientras la aureola externa es muy delgada en el borde oriental, menor de 100 metros, desapareciendo en algunas zonas donde el borde está en contacto con la aureola media. En el lado occidental no existe, sólo en el norte y en el sur, donde su ancho promedio no supera los 5 kilómetros.

Hidrología e Hidrogeología

El salar es alimentado por las aguas de fusión de las nieves que caen sobre las cadenas montañosas y el altiplano. En la zona oriental las precipitaciones son más altas. Las **principales quebradas** del lado oriental son de norte a sur; Guanaqueros, de las Zorras, de las Zorritas, de Llullaillaco y Tocomar. En el lado oriental y sur existen numerosas quebradas provenientes de la cordillera de Domeyko cuyo aporte hidrológico es temporal y limitado. La quebrada más importante en el sur del salar es la de Río Frío que drena una superficie de unos 60 km^2.

El Departamento de Recursos Hidráulicos de CORFO, y posteriormente la Organización de Naciones Unidas, perforaron pozos en los bordes del salar detectando un gradiente hidráulico promedio de aproximadamente 0.004 hacia el salar, potencia del acuífero libre en 50 m y una conductividad hidráulica de 10 m/día, obteniendo una transmisibilidad de 500 m^2/día. Para obtener la recarga natural se supuso un largo de la sección de flujo de 35 kilómetros con lo que se obtiene una recarga de 810 L/s. Se observó en el marco de este estudio un nivel freático poco profundo, aumentando la distancia en la medida en que se aleja del salar en forma radial. Desde el punto de vista hidrogeológico, el salar de Punta Negra se define como un salar activo, con presencia de canales de circulación que realizan el drenaje de la aureola blanca, en la cual, según las variaciones freáticas por las precipitaciones anuales y la salinidad del agua, la cristalización de la sal cambia.

El área de estudio no presenta drenes de importancia y sólo se observó la presencia de dos paleoquebradas, que no tienen materiales indicativos de activación en los últimos tiempos. Por otro lado y como se desarrolló en los párrafos anteriores, el salar presenta sus sectores de alimentación por su lado este y desde la zona de la cordillera de los Andes, descartándose un aporte hidrológico o hidrogeológico de importancia que emane desde el cordón montañosos situado al oeste, lo que se ratifica por ser una microcuenca limitada en este sector por relieves positivos de poca altura y pequeña cuenca hídrica, que se manifiesta específicamente en lo reducido de las cuencas de aporte de las dos quebradas identificadas.

6. ***DGA. Actualización delimitación de acuíferos alimentadores de vegas y bofedales, II Región. S.I.T. N° 98. Chile. 2004.***

En este informe, se presenta la caracterización de los diferentes humedales, funcionamiento y distribución a lo largo de la II Región (**Figura 5-13**). Además se describen las principales características geológicas, hidrogeológicas y geográficas que definen a los salares.

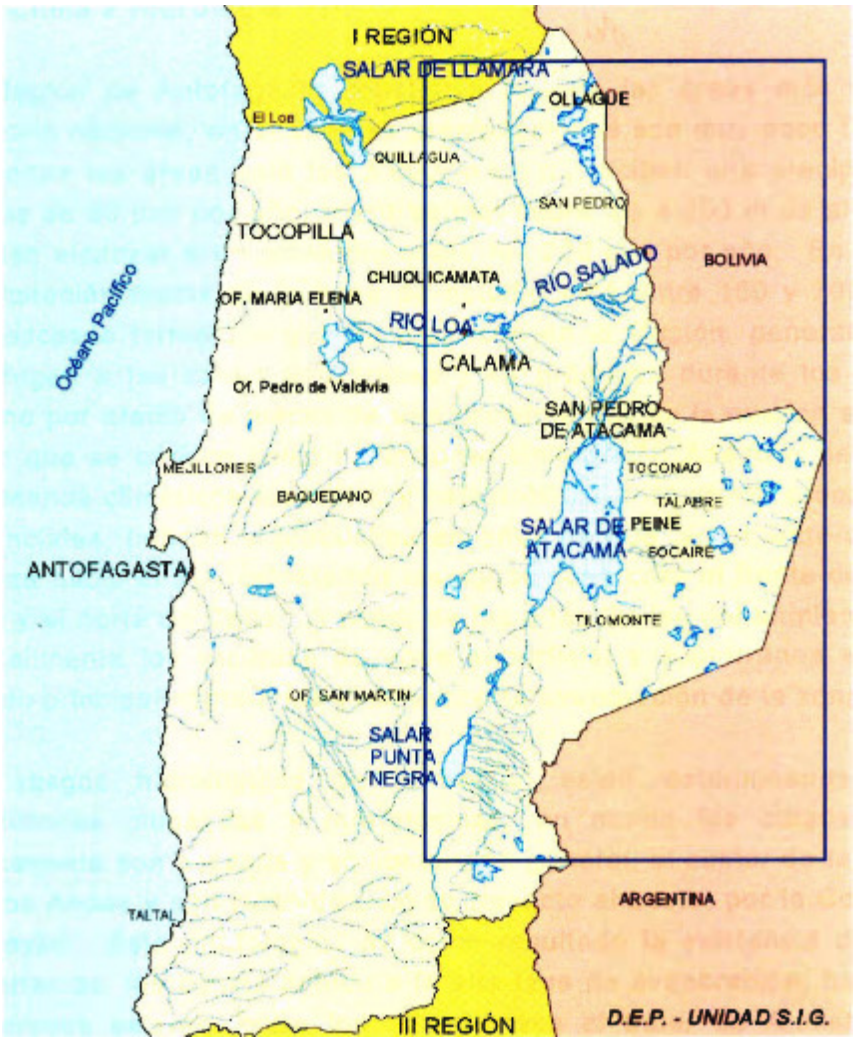


Figura 5-13. Ubicación del área de estudio del S.I.T. N°98. Fuente: DGA, 2004

Se describe el acuífero aluvial del salar de Punta Negra como uno de los más grandes de la Región, con espesores entre **50 a 200 m**. Los acuíferos en esta zona se alimentan por agua de lluvia, escorrentía superficial continua o esporádica y escorrentía subterránea que fluye a través de las rocas fracturadas que conforman los bordes de la cuenca. La descarga se

produce principalmente por evaporación o por extracción de pozos. Los pozos suelen presentar productividades muy elevadas con valores superiores a los **10 m^3/hr/m**.

El informe no presenta ningún mapa con la ubicación de las unidades hidrogeológicas de las cuencas del salar de Punta Negra y salar de Imilac. A continuación en la se presenta un mapa con las vegas alimentadas por acuíferos o escurrimientos superficiales (**Figura 5-14**).

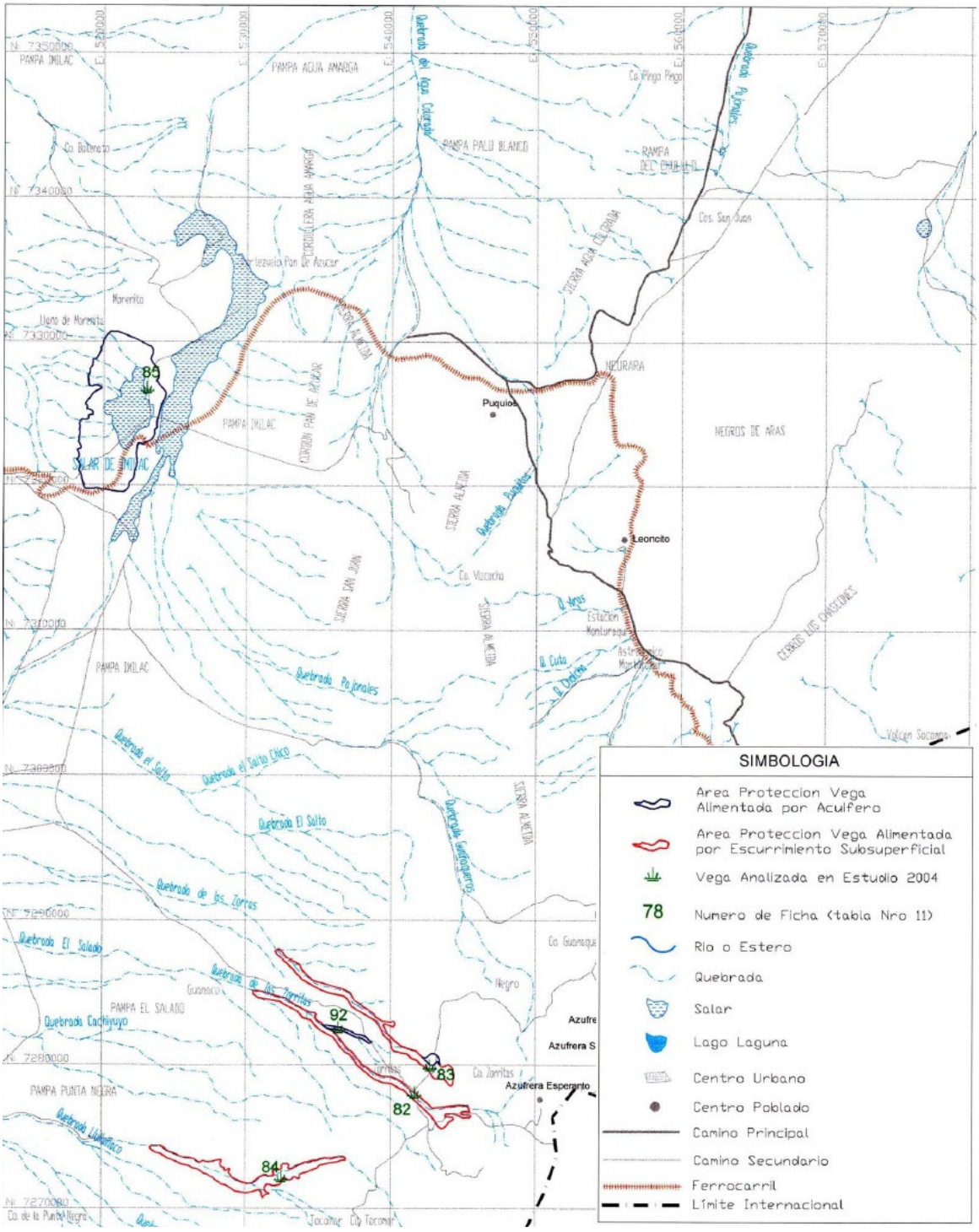


Figura 5-14. Mapa con la ubicación de las vegas alimentadas por acuíferos o escurrimientos superficiales en la cuenca del salar de Punta Negra y salar de Imilac. Fuente: modificado de DGA, 2004.

7. CENTRO DE ESTUDIOS DE HUMEDALES. Análisis multitemporal de Cuencas de los Humedales Alto Andinos Prioritarios de Chile. Informe Final. Septiembre 2010.

En este estudio se pretendió implementar un inventario de 14 humedales, considerados prioritarios por su alto valor ambiental para el Norte de Chile, incluyendo un análisis multitemporal de algunos parámetros ambientales mediante el procesamiento de imágenes satelitales del sensor Landsat TM. En particular, aparece el Salar de Punta Negra (II Región) dónde se analizó 6 imágenes Landsat TM (entre el año 1991 y 2009) para evaluar la evolución de los espejos de agua. Como conclusiones de este documento se define una muy escasa aparición de espejos de agua asociados a su dinámica hídrica. Al interior de la cuenca, los cuerpos de agua corresponden solo a pequeños espejos lacustres localizados en el área del salar, al norte de la cuenca. En cuanto a la evolución temporal de estos espejos de agua se destaca su variabilidad areal; si bien, los cuerpos de agua del salar nunca superan los 0.4 km^2 totales, estos presentan pequeños aumentos y retrocesos areales, no mayores a su 50%; sin embargo, dada esta característica, la tendencia general es en aumento, aumentó su área de los 0.17 km^2 en 1991 a 0.263 km^2 en el año 2009. El año de mayor tamaño fue el 2006 con 0.35 km^2 totales (**Figura 5-15**).

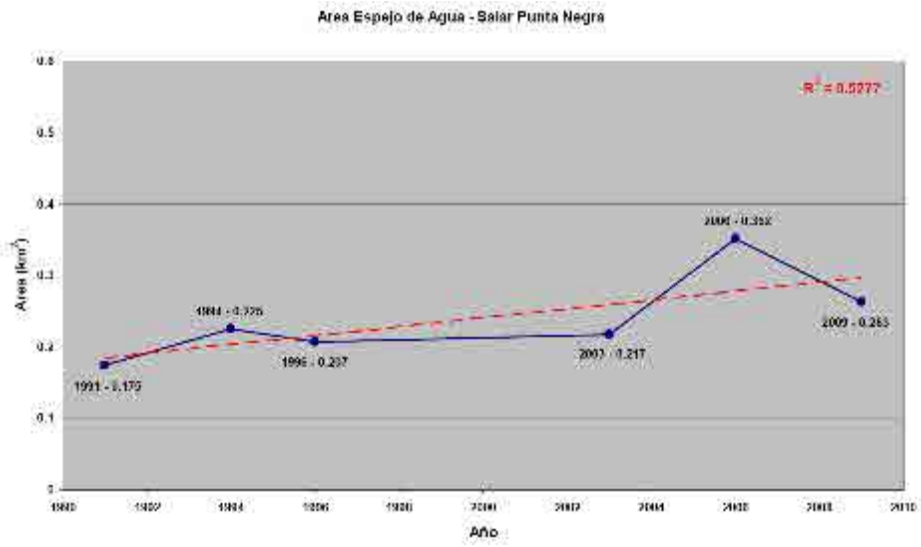


Figura 5-15. Evolución Areal del espejo de Agua del Salar de Punta Negra (Centro de Estudios de Humedales, 2010)

8. ***Proyecto CIREN-INNOVA de CORFO. Caracterización Base de Vegas y Bofedales Alto Andinos para una gestión sostenible de los recursos hídricos. Primera Parte: Región de Antofagasta. Código: 08CM01-23. 2010.***

En este documento se presenta la descripción de cada una de las sub-subcuencas, subcuenca y Comuna a la que pertenece, comunidades indígenas, número de humedales y área de desarrollo indígena presente en la sub-subcuenca de toda la Región de Antofagasta. En detalle, para el sector del Salar de Punta Negra, describe lo siguiente en la **Tabla 5-8.**

Sub-Subcuenca :	Salar Punta Negra (2650)	
Subcuenca	Subcuenca Hidrográfica Salar Punta Negra	
Comuna :	Antofagasta	
Comunidades Indígenas:	*N. de Humedales*	*Área de desarrollo Indígena (ADI)*
No hay comunidades	10	

Tabla 5-8. Definición de las características de la Sub-Subcuenca Salar de Punta Negra (CORFO,2010)

9. ***ARRAU INGENIERÍA. Diagnóstico Plan Estratégico para la Gestión de los Recursos Hídricos, Región de Antofagasta. informe final. S.I.T. Nº 291. Santiago, 2012.***

Este informe presenta como objetivo específico un diagnóstico del conocimiento del recurso hídrico, del uso del agua y del estado de las fuentes, a través de una revisión, actualización y sistematización de la información existente. Con esto se elabora un diagnóstico de los aspectos de cantidad y calidad del recurso hídrico, incluyendo diagnóstico de la infraestructura y servicios relacionados; como también en materia ambiental y funcional respecto del desempeño institucional (público y privado) en materia de gestión en escenarios medios y en condiciones extremas (sequías o inundaciones).

Según este informe, el salar de Punta Negra ocupa el fondo de una fosa prealtiplánica longitudinal flanqueada por la Cordillera de los Andes al Este y la Cordillera de Domeyko al Oeste. En la ladera oriental del salar de Punta Negra y a los pies del Volcán Llullaillaco, una serie de surgencias de agua dulce originan vegas que desaguan en lagunas a través de sendos canales. Estos **sistemas vega-canal-laguna** concentran la mayor diversidad y

abundancia de especies vegetales y animales, y están sometidos a una dinámica natural compleja y fluctuante (Contreras, 2005) seriamente afectada por la extracción de agua para la actividad minera.

El Salar de Punta Negra es monitoreado como parte del Plan de Alerta Temprana de Monturaqui – Negrillar – Tilopozo de Minera Escondida, el cual indica que las extracciones realizadas no han afectado el salar. Sin embargo existen antecedentes de que el salar ha sido afectado por las extracciones de Minera Escondida donde se indica que Minera Escondida Ltda. secó el salar de punta Negra (Minería Chilena, 2011) y provoco daños ambientales en el salar agudizando el proceso de desecamiento y de reducción de nivel de las napas (Yáñez, 2008).

10.Dirección General de Aguas, Balance hídrico de Chile, 1988

En este documento se realiza en balance hídrico de todas las cuencas de Chile, presentando tablas con los valores de entradas y salidas del balance para el salar de Punta Negra, el extracto de la tabla general del documento para el salar de Punta Negra se puede observar en la **Tabla 5-9.**

Cuenca	Superficie (Km^2)	Precipitación (mm/año)	Escorrentía (mm/año)	Evapotranspiración real (mm/año)
Salar de Punta Negra	4882	91,7	0	86,6

Tabla 5-9. Balance hídrico salar de Punta Negra. Fuente: DGA 1988

Tal y como se muestra en la tabla la precipitación promedio en la cuenca es de 91.7 mm/año y la evapotranspiración real es de 86,6 mm/año, lo que quiere decir que se evapotranspira un 94,4 % de la precipitación total.

Así mismo, el documento presenta mapas de isoyetas, isotermas y líneas de isoevaporación y evapotranspiración. Las líneas isoyetas muestran que la precipitación aumenta con la altura, encontrándose la isoyeta de 50 mm alrededor de la plana del salar, las líneas isotermas por el contrario muestran que la temperatura disminuye con la altura. Dichos mapas, extraídos del documento original se muestran en la **Figura 5-16** y la **Figura 5-17.**

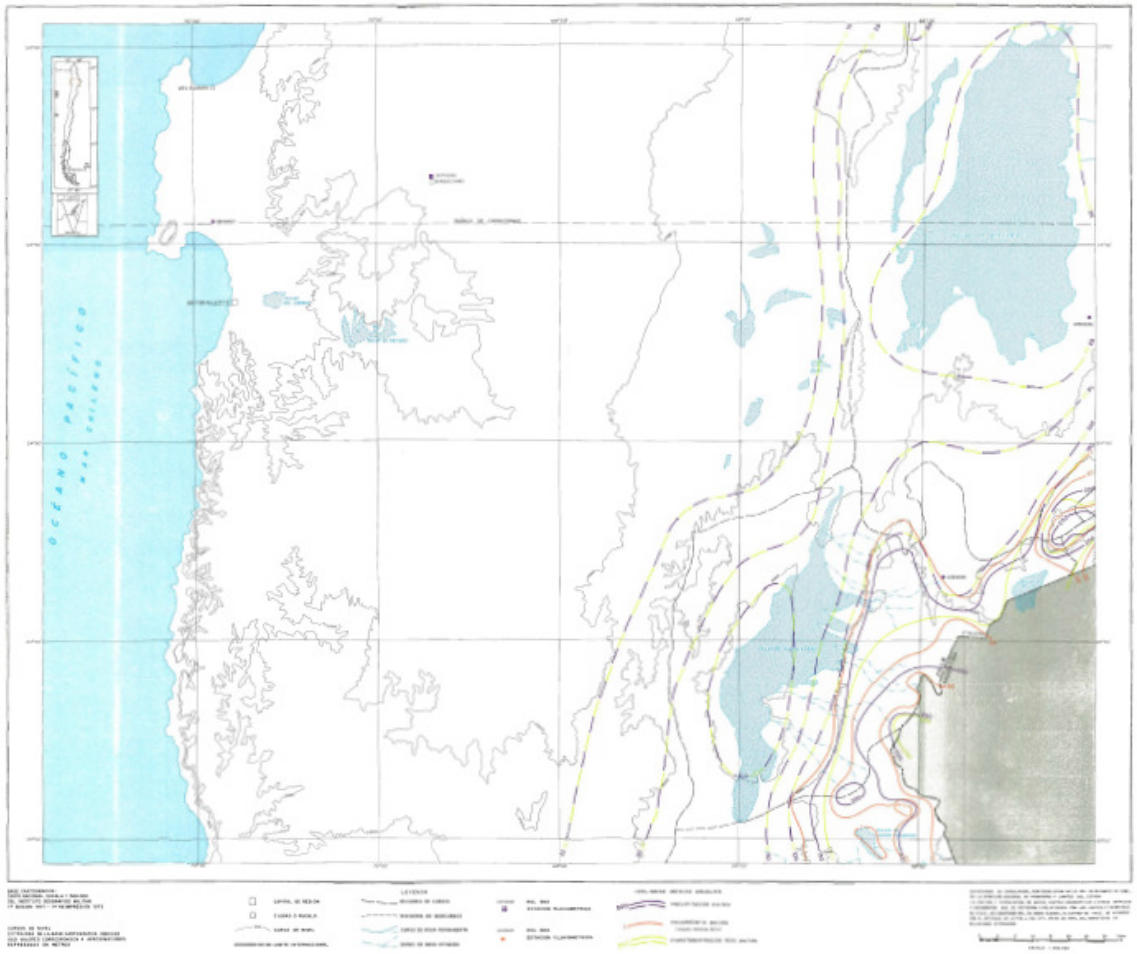


Figura 5-16. Mapa de isoyetas, escorrentía y evapotranspiración real II Región. Fuente: DGA 1988.



Figura 5-17. Líneas de isotemperatura e isoevaporación II Región. Fuente: DGA 1988.

11. Dirección General de Aguas. Levantamiento hidrogeológico para el desarrollo de nuevas fuentes de agua en áreas prioritarias de la zona norte del Chile, Regiones XV, I, II y III. Etapa 1. Informe final parte II. Hidrología Regional del Altiplano de Chile. S.I.T. N° 157. DICTUC, 2008.

El presente proyecto tiene como objetivo general el levantamiento y análisis de información hidrogeológica para avanzar en el estudio de los recursos hídricos del sector chileno del Altiplano. En concreto se desarrolló un estudio hidrológico a nivel regional en las cuencas endorreicas del altiplano de las Regiones XV, I, II y III.

El estudio contempló el análisis a nivel mensual y anual de variables meteorológicas como precipitación escurrimiento, temperatura y evaporación de tanque. Las variables hidrológicas se analizaron para determinar su variación espacial y temporal a nivel mensual y anual. Además presentan un estudio de sequías meteorológica e hidrológica con los registros de precipitaciones y escurrimientos, respectivamente. A continuación en la se muestra el mapa de precipitación que se realizó para toda la región, no exclusivamente para la zona altiplánica.

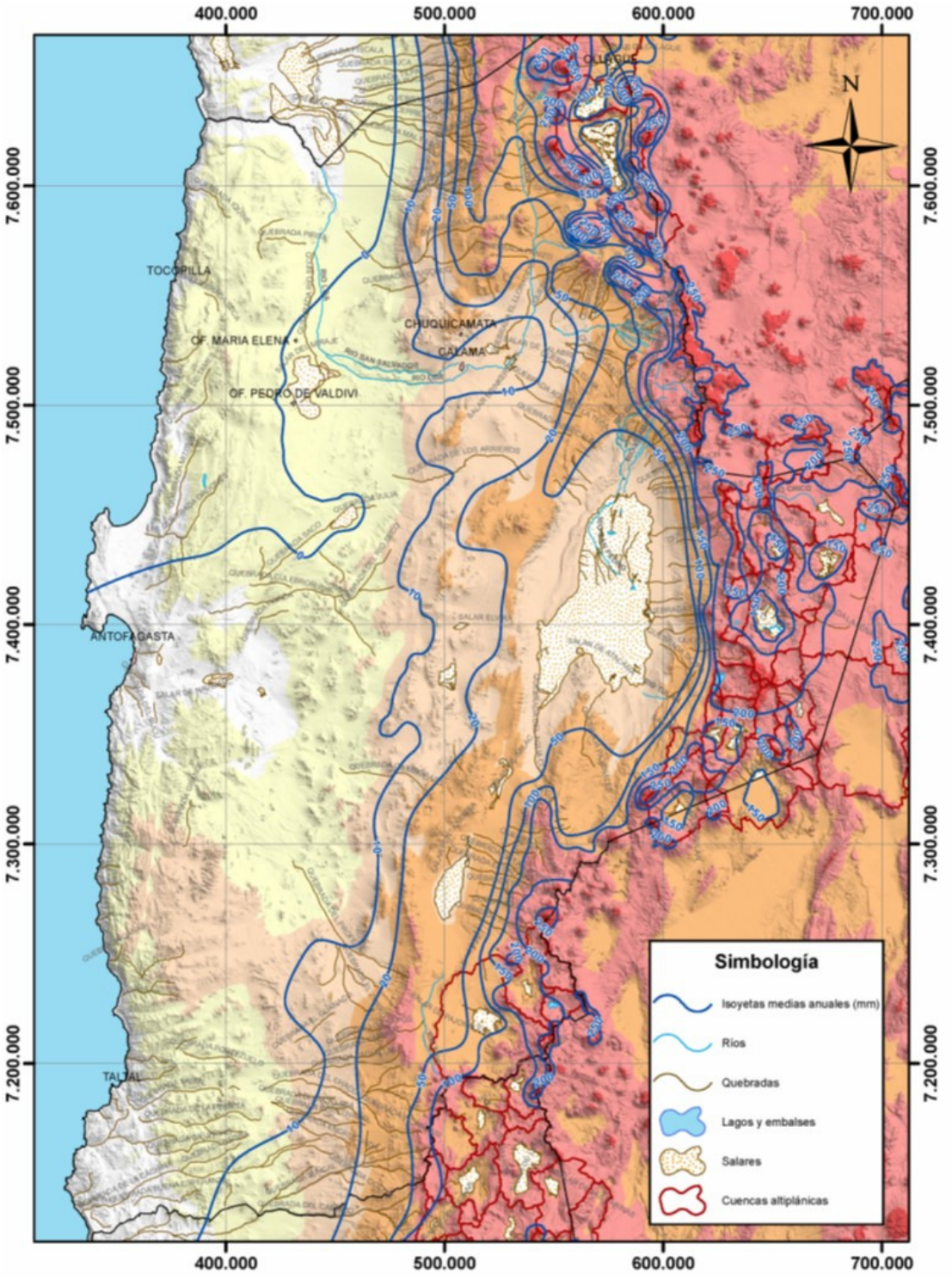


Figura 5-18. Mapa de precipitaciones de la II Región de Chile que incluye el salar de Punta negra y salar de Imilac. Fuente: DGA, 2009.

12. Dirección General de Aguas. Levantamiento hidrogeológico para el desarrollo de nuevas fuentes de agua en áreas prioritarias de la zona norte del Chile, Regiones XV, I, II y III. Etapa 2. Informe final parte VII. Medición de la evaporación mediante el método del "Domo". S.I.T. N° 195. DICTUC, 2009.

El presente proyecto tiene como objetivo general el levantamiento y análisis de información hidrogeológica para avanzar en el estudio de los recursos hídricos del sector chileno del Altiplano.

El estudio se centra en el análisis de la evaporación y los principales métodos de estimación.

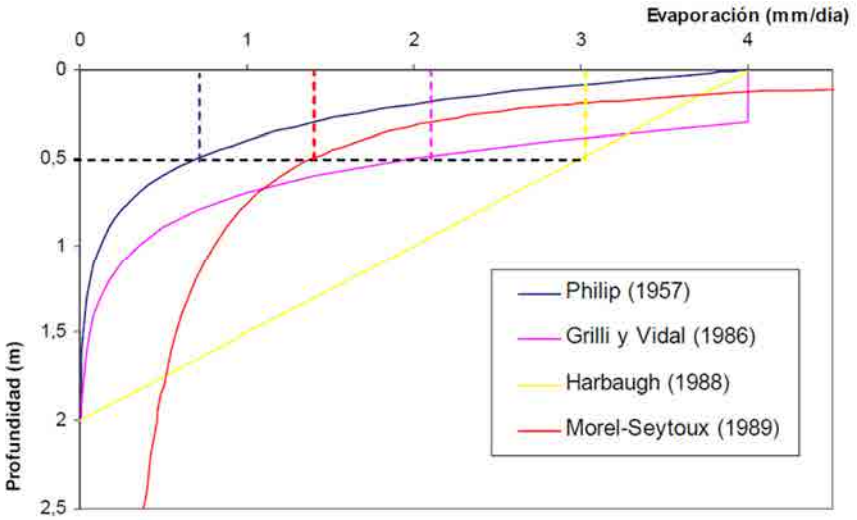


Figura 5-19. Curvas de evaporación vs profundidad definidas por diferentes autores. Fuente: DGA, 2009.

Se obtuvo estimaciones de evaporación desde aguas subterráneas someras en más de 45 puntos agrupados en 12 zonas representativas del área de estudio. Adicionalmente se realizaron análisis de laboratorio a los suelos de las zonas de medición y se determinó en terreno la tasa de evaporación desde superficies libres mediante la implementación de tanques evaporímetros estándar y otros construidos en terreno.

La metodología empleada para determinar los flujos de evaporación desde napas freáticas fue la propuesta por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS), denominada metodología del Domo. Esta herramienta permite medir descargas desde el acuífero de forma directa sobre la superficie del terreno. También se presentan otras metodologías como la medición de la evaporación mediante lisímetros.

13. Flux et évolution des solutions salines dans les systemèmes hydrologiques des salars d'Ascotal et d'Atacama. Thèse doctorate en sciencies de la terre. Mardones, 1998.

La tesis doctoral que presentó Leonardo Mardones en 1998, se conoce principalmente por el balance realizado en el salar de Atacama dada la importancia socioeconómica de esta cuenca. Según indica en la tesis doctoral se calcularon las tasas de evaporación en diferentes sectores del salar mediante la instalación de lisímetros. No, se especifica el diseño ni la ubicación de los lisímetros, únicamente el valor de tasa de evaporación correspondiente a cada sector del salar. Además del análisis de la evaporación y el balance, se realiza un análisis químico e isotópico de las aguas donde se define la vía evolutiva de las aguas tanto del salar de Atacama como del salar de Ascotán.

14. Evaporación desde salares: Metodología para evaluar los recursos hídricos renovables. Aplicación en las regiones I y II. Trabajo aplicado a la Revista de la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica (vol. I, año I. N°2) Grilli y Vidal, 1986.

Grilli y Vidal junto con otros autores como Harbaugh et al. (1998), Philip (1957), Morel-Seytoux et al. (1989) y Gardeweg et al. (1993) han realizado diferentes ajustes para estimar como evoluciona la tasa de evaporación con la profundidad del nivel freático. En este informe se muestra una metodología para la estimación de la evaporación tanto desde lámina libre como desde agua subterránea y como ésta se incluye dentro de un balance hídrico. Los cálculos se realizan para los salares de Atacama, Bellavista y Pintados.

15. Estudio hidrogeológico y modelo numérico sector sur del salar de Atacama. Anexo 1 del Estudio de Impacto Ambiental presentado por la empresa Rockwood Lithium. SGA, 2015.

En el marco del Estudio de Impacto Ambiental realizado por la empresa SGA para la minera Rockwood Lithium, se realizó un estudio hidrogeológico del salar de Atacama. En el estudio se analiza toda la cuenca aunque se centra en la zona sur al encontrarse en esta zona las faenas de Rockwood Lithium. En el marco del estudio se presentó un modelo conceptual de la cuenca que sirvió para definir los diferentes componentes del balance hídrico. El cálculo de las salidas por evaporación se estimó en base a las mediciones realizadas con domos en diferentes épocas del año. Estas mediciones entregaron diferentes curvas de tasa de evaporación vs profundidad para cada una de las zonas del salar. Hasta el momento únicamente se conocían los valores de tasa de evaporación presentados por Mardones en 1998. Por otro lado destacar que para el

cálculo del balance, se estimó un valor de infiltración a partir de un balance de cloruros. Con ello estimaron una infiltración de entre el 3,5 y 4,5 % de la precipitación total.

5.2 CATASTRO DE CAPTACIONES Y MEDICIÓN DE NIVELES

Este numeral corresponde a la evaluación y análisis de las captaciones de agua subterránea existentes y puntos de observación en el sector de la cuenca del Salar de Imilac-Punta Negra. Como parte de una de las actividades establecidas para la **Etapa I** del *Diagnóstico de Aguas Subterráneas en Acuíferos de la II y IV Región*, el análisis de las captaciones existentes se realiza a partir del **catastro público de aguas (CPA)**, base de datos disponible en el portal de la Dirección General de Aguas con información sobre los derechos de aprovechamiento de aguas a lo largo de Chile.

El CPA es un **registro público** que contiene la información de todos los derechos de aprovechamientos constituidos o reconocidos en conformidad a la ley. En este Registro, se anotan las transferencias de los derechos de aprovechamiento; los derechos reales constituidos sobre éstos y en general, toda aquella información relativa al ejercicio de los derechos de aprovechamientos de aguas, tanto superficiales como subterráneas.

Inicialmente, se ha evaluado los **antecedentes de los derechos existentes** en el CPA para la II región, concretamente en el sector de las cuencas del Salar de Imilac y del Salar de Punta Negra. Al mismo tiempo, se ha evaluado los derechos de aprovechamiento pendientes de resolver y los denegados.

5.2.1 REVISIÓN DEL CATASTRO PÚBLICO DE DERECHOS DE LA II REGIÓN

En la **Figura 5-20** se presenta la localización de todos los derechos (Aprobados, Denegados y En Trámite) en el sector de la cuenca del Salar de Imilac-Punta Negra. Como se puede observar, la gran mayoría de derechos se localizan en el sector oriental del salar de Punta Negra y se reparten, de forma heterogénea, hacia el salar de Imilac dónde disminuye la densidad. Los expedientes de las solicitudes de derechos (Aprobados, Denegados y En Trámite) relacionados con el catastro público se presentan en el **Anexo 1**.

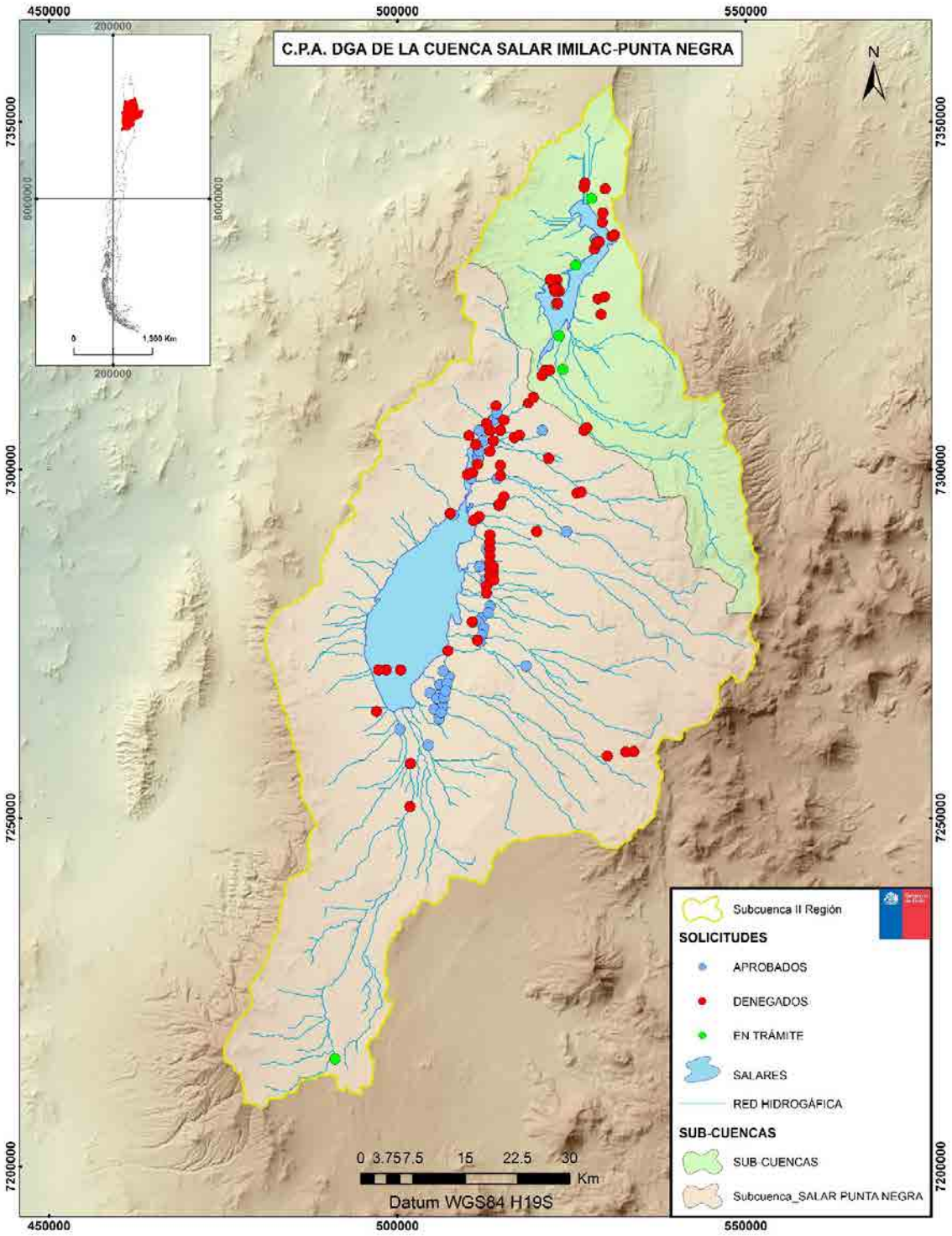


Figura 5-20. Captaciones existentes en el CPA de la DGA en la cuenca del salar de Imilac-Punta Negra. Fuente: Dirección General de Aguas.

En la revisión del CPA existente en la cuenca salar de Imilac-Punta Negra se ha podido definir la existencia de 144 solicitudes correspondientes a 25 expedientes para el sector del Salar de Punta Negra y 43 solicitudes correspondientes a 8 expedientes para el salar de Imilac, las cuales se han clasificado entre solicitudes denegadas, aprobadas y en trámite (**Tabla 5-10**).

Subcuenca	Solicitados		Denegados		Aprobados		Pendientes	
	Solicitudes	Q(L/s)	Solicitudes	Q(L/s)	Solicitudes	Q(L/s)	Solicitudes	Q(L/s)
Salar de Punta Negra	**144**	**3.585**	65	1.288	78	1.543	1	32,70
Salar de Imilac	**43**	**443**	37	335	2	23	4	80,30
TOTALES	**187**	**4.028**	**102**	**1.623**	**80**	**1.566**	**5**	**113**

Tabla 5-10. Derechos de aprovechamiento del CPA en la cuenca salar de Imilac-Punta Negra. Fuente: Dirección General de Aguas.

En total, entre el acuífero del salar de Punta Negra y el acuífero del salar de Imilac, se ha solicitado históricamente un caudal de 4.028 L/s correspondiente a un volumen 126.007.259 m^3/año, aunque de estos, solo se han aprobado u otorgado su explotación 1.566 L/s correspondientes a 49.380.330 m^3/año. En trámite, quedan pendientes por resolver 113 L/s (correspondientes a **3.563.568 m^3/año**).

En relación al tipo de uso de los derechos otorgados existentes en el sector Imilac-Punta Negra, el único uso es minero, monopolizado por la compañía Minera Escondida (**Tabla 5-11**).

Usos de los Derechos Aprobados (L/s)				
Subcuenca	**Agua Potable**	**Riego**	**Industria**	**Minería**
Salar de Punta Negra	-	-	-	1.543
Salar de Imilac	-	-	-	23
SUB-TOTALES	**0**	**0**	**0**	**1.566**
TOTALES	**1.566**			

Tabla 5-11. Uso de los derechos de aprovechamiento del CPA en la cuenca salar de Imilac-Punta Negra. Fuente: Dirección General de Aguas.

5.2.2 REVISIÓN DE EXPEDIENTES DE SOLICITUDES OTORGADAS EN LA II REGIÓN

Código	Nombre pozo	Zona	Coordenadas (WGS 1984 Huso 19S)			Descripción pozo	Ensayo bombeo	Columna litológica
			Norte (m)	Este (m)	Elev.(msnm)			
ND-0203-188	ES-46	Salar Punta Negra	7.258.160,36	502.104,11	3.088,58	SI	SI	SI
	ES-36	Salar Punta Negra	7.265.658,57	457.223,93	3.024,66	SI	SI	SI
	ES-19	Salar Imilac	7.340.768,78	530.044,95	3.095,33	SI	SI	SI
	ES-17	Salar Imilac	7.337.338,57	529.702,61	3.035,80	SI	SI	SI
	ES-14	Salar Imilac	7.326.062,59	523.449,97	2.971,42	SI	SI	SI
	ES-13	Salar Imilac	7.335.966,66	529.619,59	3.003,87	SI	SI	SI
	ES-11	Salar Imilac	7.327.733,79	523.096,09	2.983,85	SI	SI	SI
	ES-9	Salar Punta Negra	7.275.867,44	511.719,70	3.067,94	SI	SI	SI
	ES-7	Salar Punta Negra	7.291.502,42	520.200,02	3.294,62	SI	SI	SI
	ES-4	Salar Punta Negra	7.293.634,73	511.958,75	2.983,47	SI	SI	SI
ND-0203-604	SX-9	Salar Punta Negra	7.265.527,00	506.506,00	Sin datos	SI	SI	SI
ND-0203-694	PC-2	Salar Punta Negra	7.301.996,00	521.934,00	Sin datos	SI	SI	SI
ND-0203-695	PC-1	Salar Punta Negra	7.314.777,00	522.086,00	Sin datos	SI	SI	SI
ND-0203-2386	PC-2	Salar Punta Negra	7.252.000,00	502.000,00	3.260,00	SI	SI	SI
ND-0203-245	PH-2	Salar Punta Negra	7.307.127,27	513.815,49	Sin datos	NO	NO	NO
	PH-4	Salar Punta Negra	7.305.627,29	511.815,50	Sin datos	NO	NO	NO
	PH-5	Salar Punta Negra	7.305.627,29	513.315,49	Sin datos	NO	NO	NO
	PH-6	Salar Punta Negra	7.305.627,29	514.815,48	Sin datos	NO	NO	NO

Código	Nombre pozo	Zona	Coordenadas (WGS 1984 Huso 19S)			Descripción pozo	Ensayo bombeo	Columna litológica
			Norte (m)	Este (m)	Elev.(msnm)			
	PH-7	Salar Punta Negra	7.304.127,30	512.315,50	Sin datos	NO	NO	NO
	PH-8	Salar Punta Negra	7.304.127,30	513.815,49	Sin datos	NO	NO	NO
	PH-9	Salar Punta Negra	7.302.627,31	511.815,50	Sin datos	NO	NO	NO
	PH-10	Salar Punta Negra	7.302.627,31	513.315,49	Sin datos	NO	NO	NO
ND-0203-280	PH-2	Salar Punta Negra	7.307.127,27	513.815,49	Sin datos	NO	NO	NO
	PH-5	Salar Punta Negra	7.305.627,29	513.315,49	Sin datos	NO	NO	NO
	PH-12	Salar Punta Negra	7.300.624,33	514.815,48	Sin datos	NO	NO	NO
	PH-26	Salar Punta Negra	7.308.128,26	514.314,48	Sin datos	NO	NO	NO
ND-0203-293	PH-4	Salar Punta Negra	7.305.627,29	511.815,50	Sin datos	NO	NO	NO
	PH-7	Salar Punta Negra	7.304.127,30	512.315,50	Sin datos	NO	NO	NO
	PH-9	Salar Punta Negra	7.302.627,31	511.815,50	Sin datos	NO	NO	NO
	PH-18	Salar Punta Negra	7.288.627,43	512.815,49	Sin datos	NO	NO	NO
ND-0203-317	PH-3	Salar Punta Negra	7.307.127,27	515.315,47	Sin datos	NO	NO	NO
	PH-6	Salar Punta Negra	7.305.627,29	514.815,48	Sin datos	NO	NO	NO
	PH-8	Salar Punta Negra	7.304.127,30	513.815,49	Sin datos	NO	NO	NO
	PH-10	Salar Punta Negra	7.302.627,31	513.315,49	Sin datos	NO	NO	NO
	PH-13	Salar Punta Negra	7.299.127,34	514.815,48	Sin datos	NO	NO	NO
	PH-17	Salar Punta Negra	7.295.133,38	514.811,48	Sin datos	NO	NO	NO
	PH-18	Salar Punta Negra	7.288.627,43	513.315,49	Sin datos	NO	NO	NO

Código	Nombre pozo	Zona	Coordenadas (WGS 1984 Huso 19S)			Descripción pozo	Ensayo bombeo	Columna litológica
			Norte (m)	Este (m)	Elev.(msnm)			
	PH-19	Salar Punta Negra	7.287.629,44	513.318,49	Sin datos	NO	NO	NO
	PH-20	Salar Punta Negra	7.286.627,45	513.315,49	Sin datos	NO	NO	NO
	PH-21	Salar Punta Negra	7.285.629,46	513.315,49	Sin datos	NO	NO	NO
	PH-22	Salar Punta Negra	7.284.627,47	513.315,49	Sin datos	NO	NO	NO
	PH-24	Salar Punta Negra	7.285.127,46	513.815,48	Sin datos	NO	NO	NO
	PH-27	Salar Punta Negra	7.306.628,28	512.813,50	Sin datos	NO	NO	NO
	PH-34	Salar Punta Negra	7.284.157,47	513.841,48	Sin datos	NO	NO	NO
	PH-40	Salar Punta Negra	7.289.627,42	513.315,49	Sin datos	NO	NO	NO
	PH-41	Salar Punta Negra	7.290.627,42	513.315,49	Sin datos	NO	NO	NO
	PH-42	Salar Punta Negra	7.283.327,48	512.815,49	Sin datos	NO	NO	NO
	PH-43	Salar Punta Negra	7.282.327,49	512.816,49	Sin datos	NO	NO	NO
	PH-46	Salar Punta Negra	7.303.606,30	511.303,51	Sin datos	NO	NO	NO
	PH-48	Salar Punta Negra	7.286.087,45	513.821,48	Sin datos	NO	NO	NO
	PH-37	Salar Punta Negra	7.304.884,29	510.336,52	Sin datos	NO	NO	NO
	PH-38	Salar Punta Negra	7.300.777,33	511.515,51	Sin datos	NO	NO	NO
	PH-39	Salar Punta Negra	7.299.594,34	510.791,51	Sin datos	NO	NO	NO
ND-0203-332	VS-1	Salar Punta Negra	7.307.127,27	515.315,47	Sin datos	NO	NO	NO
	VS-2	Salar Punta Negra	7.306.127,28	514.815,48	Sin datos	NO	NO	NO
	VS-3	Salar Punta Negra	7.304.127,30	513.815,49	Sin datos	NO	NO	NO

Código	Nombre pozo	Zona	Coordenadas (WGS 1984 Huso 19S)			Descripción pozo	Ensayo bombeo	Columna litológica
			Norte (m)	Este (m)	Elev.(msnm)			
	VS-4	Salar Punta Negra	7.302.627,31	513.315,49	Sin datos	NO	NO	NO
	VS-5	Salar Punta Negra	7.299.127,34	514.815,48	Sin datos	NO	NO	NO
	VS-6	Salar Punta Negra	7.295.133,38	514.811,48	Sin datos	NO	NO	NO
	VS-7	Salar Punta Negra	7.296.128,37	515.315,47	Sin datos	NO	NO	NO
	VS-8	Salar Punta Negra	7.288.627,43	513.315,49	Sin datos	NO	NO	NO
	VS-9	Salar Punta Negra	7.287.629,44	513.318,49	Sin datos	NO	NO	NO
	VS-10	Salar Punta Negra	7.286.627,45	513.315,49	Sin datos	NO	NO	NO
	VS-11	Salar Punta Negra	7.285.629,46	513.315,49	Sin datos	NO	NO	NO
	VS-12	Salar Punta Negra	7.284.627,47	513.315,49	Sin datos	NO	NO	NO
	VS-13	Salar Punta Negra	7.285.127,46	513.815,48	Sin datos	NO	NO	NO
	VS-14	Salar Punta Negra	7.309.230,26	514.167,48	Sin datos	NO	NO	NO
	VS-15	Salar Punta Negra	7.306.628,28	512.813,50	Sin datos	NO	NO	NO
	VS-16	Salar Punta Negra	7.284.157,47	513.841,48	Sin datos	NO	NO	NO
	VS-17	Salar Punta Negra	7.304.884,29	510.336,52	Sin datos	NO	NO	NO
	VS-18	Salar Punta Negra	7.300.777,33	511.515,51	Sin datos	NO	NO	NO
	VS-19	Salar Punta Negra	7.299.594,34	510.791,51	Sin datos	NO	NO	NO
	VS-20	Salar Punta Negra	7.289.627,42	513.315,49	Sin datos	NO	NO	NO
	VS-21	Salar Punta Negra	7.290.627,42	513.315,49	Sin datos	NO	NO	NO
	VS-22	Salar Punta Negra	7.283.327,48	512.815,49	Sin datos	NO	NO	NO

Código	Nombre pozo	Zona	Coordenadas (WGS 1984 Huso 19S)			Descripción pozo	Ensayo bombeo	Columna litológica
			Norte (m)	Este (m)	Elev.(msnm)			
	VS-23	Salar Punta Negra	7.282.327,49	512.816,49	Sin datos	NO	NO	NO
	VS-24	Salar Punta Negra	7.303.606,30	511.303,51	Sin datos	NO	NO	NO
	VS-25	Salar Punta Negra	7.286.087,45	513.821,48	Sin datos	NO	NO	NO
ND-0203-524	EX-2	Salar Punta Negra	7.280.404,50	513.347,49	Sin datos	NO	NO	NO
	EX-3	Salar Punta Negra	7.279.443,51	513.079,49	Sin datos	NO	NO	NO
	EX-5	Salar Punta Negra	7.277.239,53	512.439,50	Sin datos	NO	NO	NO
	EX-6	Salar Punta Negra	7.276.277,54	512.166,50	Sin datos	NO	NO	NO
	EX-7	Salar Punta Negra	7.275.284,55	511.904,50	Sin datos	NO	NO	NO
	SX-2	Salar Punta Negra	7.271.072,59	506.578,55	Sin datos	NO	NO	NO
	SX-4	Salar Punta Negra	7.269.121,60	506.149,55	Sin datos	NO	NO	NO
	SX-5	Salar Punta Negra	7.267.164,62	505.703,55	Sin datos	NO	NO	NO
	SX-6	Salar Punta Negra	7.269.273,60	507.178,54	Sin datos	NO	NO	NO
	SX-7	Salar Punta Negra	7.267.242,62	506.764,54	Sin datos	NO	NO	NO
	SX-8	Salar Punta Negra	7.265.585,64	505.320,56	Sin datos	NO	NO	NO
	SX-9	Salar Punta Negra	7.265.154,64	506.321,55	Sin datos	NO	NO	NO
	EP-9	Salar Punta Negra	7.268.250,61	506.960,54	Sin datos	NO	NO	NO
ND-0203-556	SCE-1	Salar Punta Negra	7.258.877,69	530.165,33	Sin datos	NO	NO	NO
	SCE-2	Salar Punta Negra	7.259.477,69	532.815,31	Sin datos	NO	NO	NO
	SCE-3	Salar Punta Negra	7.259.527,69	533.965,30	Sin datos	NO	NO	NO

Código	Nombre pozo	Zona	Coordenadas (WGS 1984 Huso 19S)			Descripción pozo	Ensayo bombeo	Columna litológica
			Norte (m)	Este (m)	Elev.(msnm)			
ND-0203-628	sondaje 8	Salar Punta Negra	7.271.260,23	500.487,26	Sin datos	NO	SI	SI
	sondaje 10	Salar Punta Negra	7.271.261,11	498.426,21	Sin datos	NO	SI	SI
	sondaje 11	Salar Punta Negra	7.271.262,39	497.336,45	Sin datos	NO	SI	SI
ND-0203-708	SPN-4	Salar Punta Negra	7.273.992,36	507.289,11	Sin datos	NO	NO	NO
	SPN-11	Salar Punta Negra	7.292.702,63	511.003,87	Sin datos	NO	NO	NO

Tabla 5-12. Listado de los expedientes encontrados en la zona de estudio y descripción de la información que contienen. Fuente: elaboración propia.

Se registra un total de 14 expedientes en la zona de estudio (**Tabla 5-12**), los cuales se han analizado y extraído la información que pudiera ser de utilidad para el proyecto. De los 14 expedientes, cinco contienen información relevante para el proyecto donde se muestra la descripción de catorce pozos construidos entre la cuenca del salar de Punta Negra y salar de Imilac. La descripción incluye ensayos de bombeo, columna litológica y perfil del pozo. La información descrita anteriormente se encuentra en el **Anexo 3.1**.

5.2.3 CAMPAÑA DE MEDICIÓN DE NIVELES

En los alcances de la **Etapa I** del este proyecto se comprometió la realización de una campaña de terreno con el objetivo de realizar un primer levantamiento de los valores de las profundidades de los niveles en diferentes puntos de observación de agua subterránea existentes en el sector de la cuenca del salar de Imilac-Punta negra. Entre el mes **Noviembre y Diciembre de 2015**, se realizó la campaña de terreno para evaluar el estado de los niveles piezométricos y las características de las captaciones existentes en los diferentes puntos a lo largo de todo el ámbito de la cuenca del Salar de Imilac- Punta Negra.

En esta campaña de terreno se caracterizaron puntos de observación, existentes y accesibles, con el objetivo de tener un marco referencial para la generación del Modelo Conceptual Hidrogeológico en las posteriores etapas del informe.

Como contexto, se presenta la **Figura 5-21** dónde se puede observar la ubicación de todos los puntos visitados durante la campaña de terreno. La campaña de terreno se realizó en base al análisis de la información existente en los expedientes encontrados. De los puntos visitados algunos corresponden a los expedientes existentes, aunque otros pozos se levantaron por encontrarse en la zona de estudio, con el objetivo de mejorar el conocimiento respecto a la información histórica. Se debe destacar que los puntos encontrados en terreno y sin expediente, se desconocen las características constructivas de cada uno de los sondajes. En el **Anexo 2.1** se presenta la correlación de la información existente (expedientes encontrados) respecto a los puntos visitados durante la campaña de terreno.

Además, con los datos levantados en terreno se aprovechó para realizar fichas técnicas descriptivas de cada uno de los puntos visitados, las cuales se adjuntan como catastro de puntos de observación en el **Anexo 2.2.**

En la **Tabla 5-13** se presentan las características de todos los puntos visitados y encontrados. Como se ha comentado, estos puntos de observación son propiedad de la compañía Minera Escondida y por lo tanto, solo se pudo acceder a los puntos decididos por la minera.

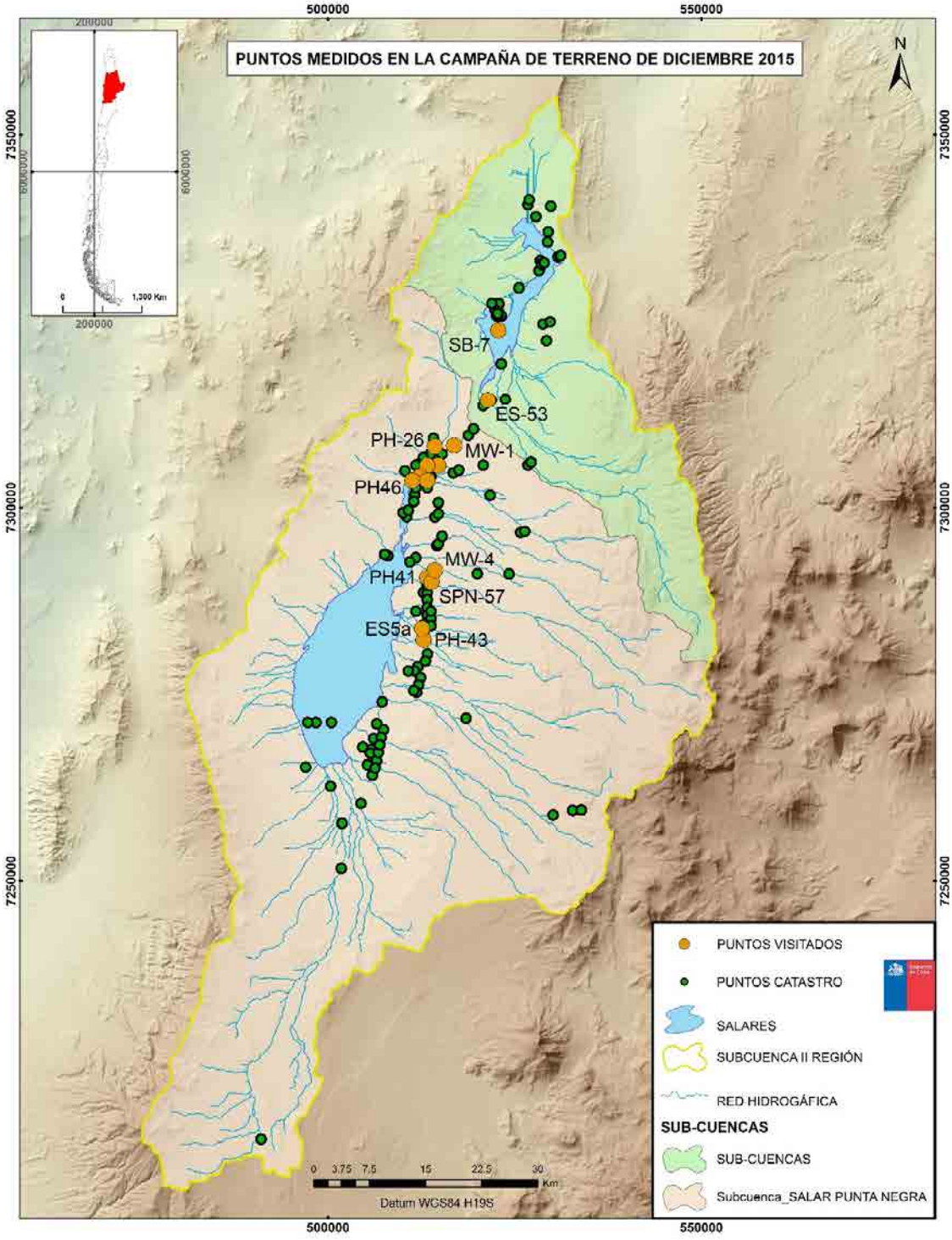


Figura 5-21. Puntos Visitados en la Campaña de Terreno de Dic-2015. Fuente: elaboración propia.

En esta primera campaña de terreno realizada en la cuenca Salar de Imilac-Punta Negra se levantó la información de 14 puntos, de un total de 80, dónde se midió los niveles piezométricos en casi todos ellos (**Tabla 5-13**). No se pudo acceder a más puntos ya que son propiedad de Minera Escondida y ésta impuso una serie de restricciones. Como ya se ha comentado, las características constructivas de los sondajes como la habilitación, profundidad de la perforación y otros datos relacionados tampoco se obtuvieron al estar en propiedad de la compañía Minera Escondida, quien no permitió el acceso a la información. En el **Anexo 2** se presenta las fichas de terreno dónde con las características que se pudieron obtener en terreno.

N°	Coordenada UTM Este_WGS84(m)	Coordenada UTM Norte_WGS84(m)	Cota (msnm)	Nombre	Fecha	Prof_Nivel(m)	Nivel_Piez(msnm)
1	522.813,21	7.323.809,22	2.970,13	SB-7	01-12-2015	-	2970,13
2	514.319,88	7.308.139,15	3.029,44	PH-26	01-12-2015	114,30	2915,14
3	514.788,87	7.305.605,67	3.019,41	PH-6	01-12-2015	114,43	2904,98
4	513.302,51	7.305.593,43	3.004,75	PH-5	01-12-2015	304,00	2700,75
5	512.297,46	7.304.132,03	2.990,71	PH7	01-12-2015	98,70	2892,01
6	511.305,36	7.303.602,57	2.986,20	PH46	01-12-2015	95,30	2890,90
7	512.811,45	7.282.304,67	3.043,70	PH-43	03-12-2015	94,82	2948,88
8	512.602,28	7.283.833,36	3.028,97	ES5a	03-12-2015	81,38	2947,59
9	513.305,85	7.303.602,57	2.986,20	PH-18	03-12-2015	70,76	2915,44
10	513.311,14	7.290.615,63	3.019,49	PH41	03-12-2015	67,45	2952,04
11	513.867,39	7.290.064,65	3.035,43	SPN-57	03-12-2015	73,70	2961,73
12	514.322,54	7.291.619,33	3.048,32	MW-4	03-12-2015	79,85	2968,47
13	516.911,62	7.308.280,61	3.058,06	MW-1	03-12-2015	69,64	2988,42
14	521.403,30	7.314.390,00	3.069,77	ES-53	01-12-2015	-	-

Tabla 5-13 Ubicación de pozos y niveles medidos en la campaña de terreno de Noviembre y Diciembre 2015. Fuente: elaboración propia.

La información levantada en terreno se cruzó con la información registrada en el Catastro Público de Aguas con el objetivo de realizar una comparativa del caudal otorgado *vs* caudal medido. Dada la escasa información levantada en terreno debido a las restricciones impuestas por Minera Escondida Ltda. no se ha podido realizar un análisis de los resultados.

Por otro lado se ha realizado un análisis del Informe de control de extracciones que Minera Escondida Ltda. presenta a la Dirección General de Aguas. A continuación en la **Tabla 5-14** se muestran los resultados del control de extracciones del 2015.

Nombre	Tipo Derecho	Q otorgado (L/s)	Volumen Anual otorgado (m^3)	Caudal (L/s)	Núm. Resolución	Fecha Resolución
ES-3A	Consuntivo	17	536.112	3,7	194	09-10-1996
ES-28B	Consuntivo	37	1.166.832	13,6	194	09-10-1996
ES-49A	Consuntivo	19	599.184	4,9	194	09-10-1996
ES-50A	Consuntivo	26	819.936	8,4	194	09-10-1996
ES-54B	Consuntivo	20	630.720	2,8	194	09-10-1996
EX-1A	Consuntivo	34	1.072.224	9,0	194	09-10-1996
EX-2A	Consuntivo	25	788.400	4,9	194	09-10-1996
EX-3A	Consuntivo	26	819.936	6,5	194	09-10-1996
EX-6A	Consuntivo	17	536.112	5,9	194	09-10-1996
EX-7	Consuntivo	21	662.256	10,7	539	12-11-1992
PH-2A	Consuntivo	17	536.112	2,7	194	09-10-1996
PH-6	Consuntivo	17	536.112	1,5	141 y 143	21-02-1990
PH-7	Consuntivo	37	1166.832	14,9	140 y 143	21-02-1990
PH-8	Consuntivo	18	570.801,6	3,8	141 y 143	21-02-1990
PH-9	Consuntivo	80	2.522.880	8,3	143 y 140	21-02-1990
PH-10	Consuntivo	20	630.720	6,3	141 y 143	21-02-1990
PH-12	Consuntivo	26	826.243,2	9,0	142	21-02-1990
PH-13	Consuntivo	19	599.184	7,7	141	21-02-1990

PH-17	Consuntivo	21	662.256	10,2	141	21-02-1990
PH-18	Consuntivo	34	1.072.224	9,1	140 y 141	21-02-1990
PH-19	Consuntivo	34	1.072.224	0,0	141	21-02-1990
PH-20A	Consuntivo	18	567.648	5,3	194	09-10-1996
PH-21	Consuntivo	37	1.173.139,2	7,2	141	21-02-1990
PH-22	Consuntivo	31	977.616	11,7	141	21-02-1990
PH-24A	Consuntivo	34	1.072.224	10,9	194	09-10-1996
PH-26	Consuntivo	28	883.008	0,5	194	09-10-1996
PH-27	Consuntivo	19,5	614.952	0,3	141	21-02-1990
PH-34A	Consuntivo	38	1198.368	12,5	194	09-10-1996
PH-40	Consuntivo	21,5	678.024	4,5	141	21-02-1990
PH-41	Consuntivo	12,5	394.200	4,3	141	21-02-1990
PH-43	Consuntivo	33,1	1.043.841,6	0,0	141	21-02-1990
PH-46	Consuntivo	65,3	2.059.300,8	8,2	141	21-02-1990
PH-48	Consuntivo	26	819.936	8,7	141	21-02-1990
PH-53	Consuntivo	37	1.166.832	5,8	194	09-10-1996
PH-54	Consuntivo	29	914.544	6,0	194	09-10-1996
PH-55	Consuntivo	32	1.009.152	6,6	194	09-10-1996
PH-56	Consuntivo	40	1.261.440	7,0	194	09-10-1996
PH-57	Consuntivo	24	756.864	0,0	194	09-10-1996
PH-58	Consuntivo	39	1.229.904	9,6	194	09-10-1996
PH-59	Consuntivo	31	977.616	7,0	194	09-10-1996
PH-60	Consuntivo	29	914.544	5,6	194	09-10-1996
PH-61	Consuntivo	22	693.792	7,7	194	09-10-1996
PH-62	Consuntivo	35	1.103.760	14,0	194	09-10-1996
T-1A	Consuntivo	27	851.472	0,0	194	09-10-1996

T-3A	Consuntivo	40	1.261.440	1,8	194	09-10-1996
T-4A	Consuntivo	23	725.328	4,3	194	09-10-1996
SUMA		**1.336,9**		**293,3**		

Tabla 5-14. Tabla resumen caudal otorgado pozos Minera Escondida Ltda. vs caudal explotado según el Informe de control de extracciones. Fuente: Minera Escondida Ltda.

Minera Escondida tiene un total de derechos otorgados de 80 que equivalen a 1.566 L/s. Según el Control de extracciones que presenta cada año Minera Escondida Ltda. a la Dirección General de Aguas, en el año 2015 operaban 46 pozos con una producción total de 293,3 L/s.

5.3 CARACTERIZACIÓN GEOMORFOLÓGICA

5.3.1 DESCRIPCIÓN GENERAL

La Región de Antofagasta está ubicada en la región septentrional de las pampas desérticas y cordilleras pre-altiplánicas, cuyos relieves se muestran en la **Figura 5-22**. Esta Región presenta rasgos macro-estructurales semejantes a los de sus Regiones vecinas de Tarapacá y de Atacama, compuestas por diversas unidades morfoestructurales producto de fenómenos modeladores del relieve que han tenido lugar desde el Paleógeno, siendo la de mayor relevancia el Altiplano chileno (DICTUC, 2009).

Esta macrounidad del relieve, presenta una variedad de unidades morfotectónicas, producto de cambios fisiográficos tanto en sentido norte sur como este oeste. Las rupturas separan niveles que corresponden a unidades micro-regionales, como las que se mencionan a continuación.

1. Farellón costero
2. Planicie litoral
3. Cordillera de la Costa y sus depresiones internas
4. Desierto de Atacama
5. Pediplanos y sistemas de glacis o pediment
6. Precordillera de Domeyko
7. La gran fosa de los salares prealtiplánicos
8. Cordones prealtiplánicos meridionales
9. Depresión salares cautivos pre-altiplánicos
10. Altiplano chileno

En particular, el **Sector Hidrogeológico de Aprovechamiento Común del Salar de Imilac-Punta Negra** se emplaza en la cuenca salar de Punta Negra, constituyendo una cuenca endorreica perteneciente a la definición como Cuencas Endorreicas-Salar de Atacama-Vertiente Pacífico realizada por de la Dirección General de Aguas. Este sector se localiza en una depresión tectónica entre la Cordillera Domeyko y la Cordillera de los Andes,

al sur del salar de Atacama. Su cuenca se caracteriza por grandes variaciones morfológicas, climatológicas y geológicas, dónde el imponente volcán Llullaillaico, que cierra la cuenca al este, culmina a casi 6800 msnm, es decir 4000 m más alto que el salar.

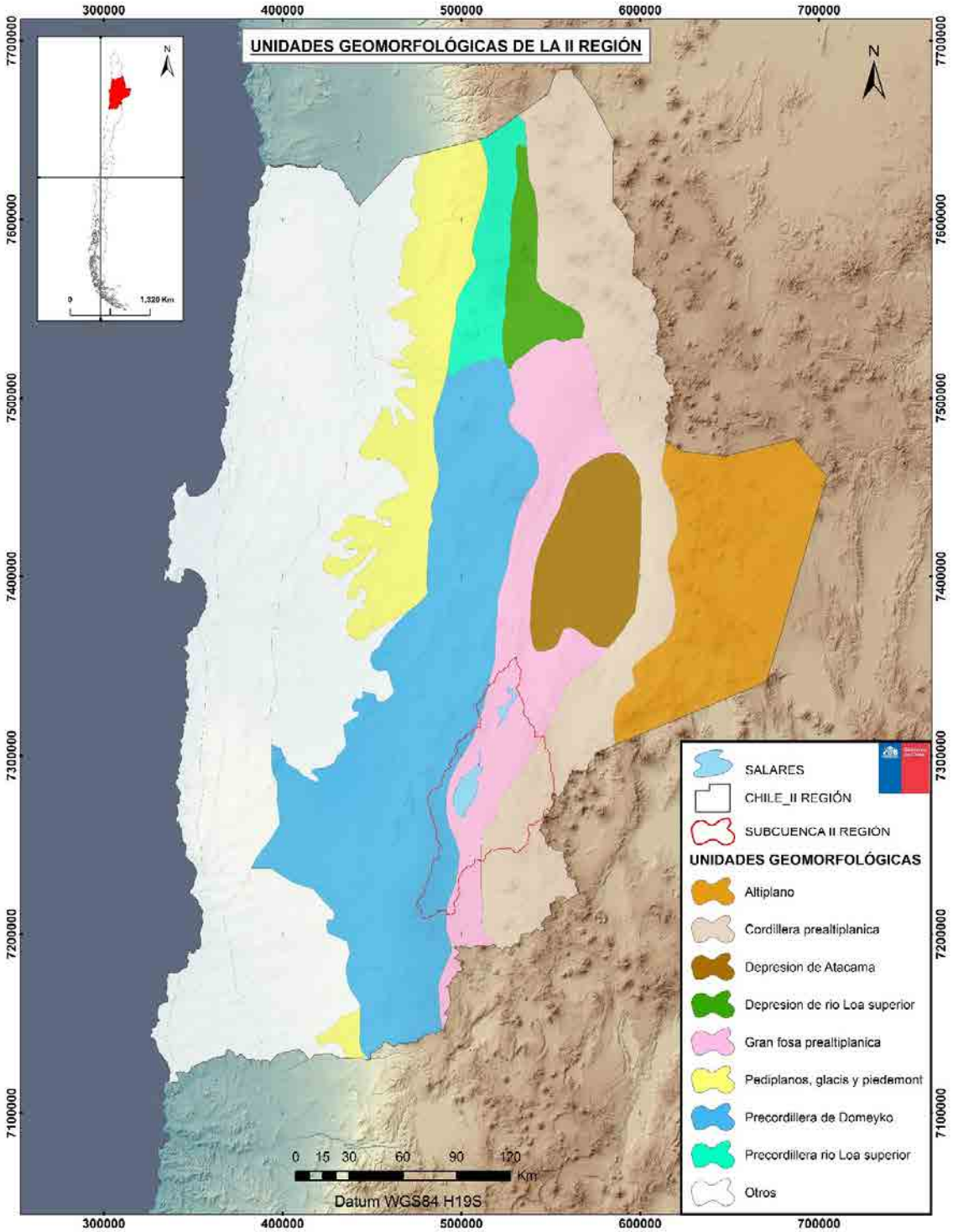


Figura 5-22. Principales Unidades Geomorfológicas definidas en la Región de Antofagasta. Fuente: Ministerio de Obras Públicas, 2015

5.3.2 DELIMITACIÓN CUENCAS Y SUBCUENCAS

En este numeral se detalla la metodología y se explica el proceso llevado a cabo para la **delimitación** de cuencas para obtener la geometría específica de la cuenca hidrográfica del Salar de Imilac-Punta Negra, obteniendo sus respectivas áreas y la longitud de los drenajes y quebradas principales mediante un sistema de información geográfica.

A partir de un modelo digital de elevaciones (DEM) con un tamaño de pixel de 30 m perteneciente a la Región de Antofagasta, obtenido desde el servicio ASTER GDEM del METI y la NASA, se han aplicado diferentes tratamientos matemáticos para la obtención de la red de drenaje principal de toda la región. Depurando las imperfecciones existentes del propio modelo digital de elevaciones, en primera instancia, se definen las principales direcciones de flujo del ámbito de estudio. En la **Figura 5-23** se presenta el DEM cuyas características se describen en la **Tabla 5-15**.

Coordenadas UTM WGS84 Huso 19S			
Área del DEM para la Región de Antofagasta (90 m de pixel)		**Área del DEM para la Cuenca Salar Imilac-Punta Negra (30 m de pixel)**	
Límite Norte	UTM Norte: 7.685.558,50	Límite Norte	UTM Norte: 7.441.243,52
Límite Sur	UTM Norte: 7.115.103,50	Límite Sur	UTM Norte: 7.070.080,64
Límite Este	UTM Este: 712.700,50	Límite Este	UTM Este: 692.977,99
Límite Oeste	UTM Este: 318.789,20	Límite Oeste	UTM Este: 396.012,13

Tabla 5-15 Coordenadas del DEM utilizado para la Región de Antofagasta y para la cuenca Salar de Imilac-Punta Negra. Fuente: elaboración propia

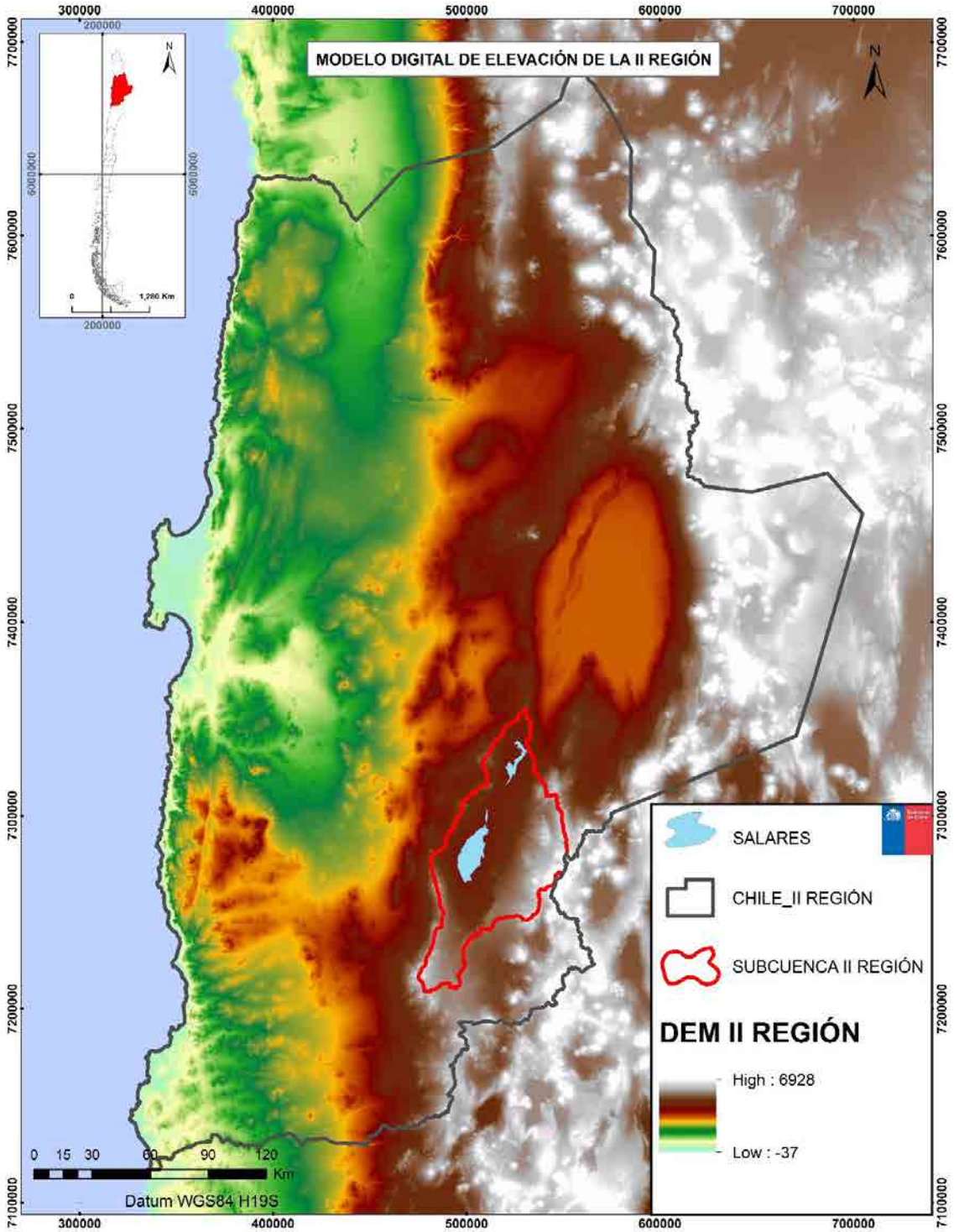


Figura 5-23. DEM descargado de ASTER GDEM. Fuente: METI y NASA.

La depuración del Modelo Digital de Elevación permite determinar el número de celdas aguas arriba vertientes sobre cada una de las celdas inmediatamente aguas abajo. Este análisis genera la diferenciación de celdas de acumulación con las cuales se caracteriza la red de drenaje de la cuenca de estudio. En la **Figura 5-24** se muestra un detalle ejemplo de la red de drenaje obtenida a partir del DEM para el sector del salar de Punta Negra.

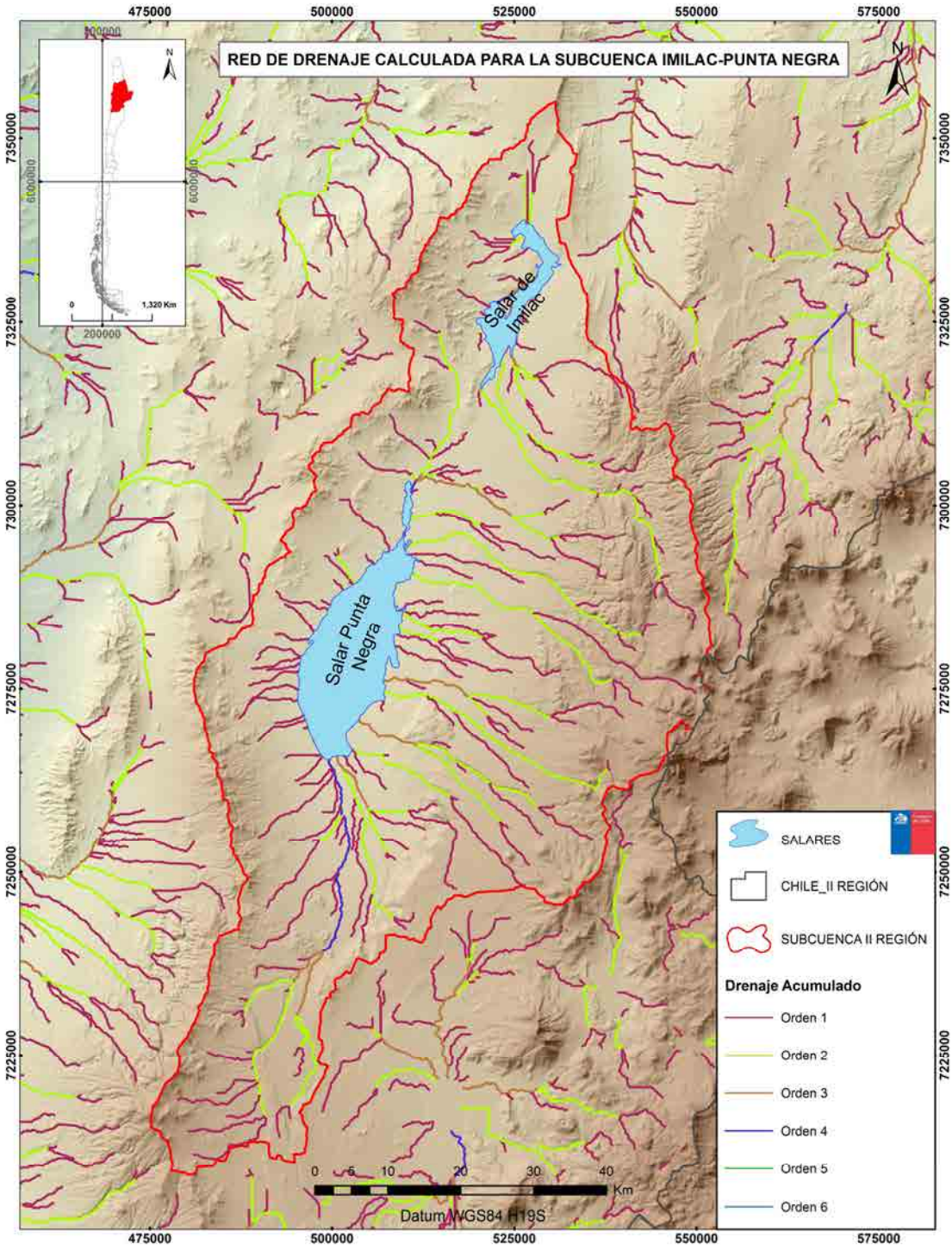


Figura 5-24. Red de drenaje generada a partir del DEM de la Cuencas del salar de Imilac-Punta Negra. elaboración Propia

La definición de la red de drenaje permite realizar la delimitación automática de cuencas hidrográficas, o dicho de otra forma, definir las áreas relacionadas con drenajes de diferentes órdenes asignando un orden numérico a los enlaces de la red (343 áreas). Con esta definición, se han generado las sub-subcuencas del salar Imilac y salar de Punta Negra las cuales se presentan en la **Figura 5-25.**

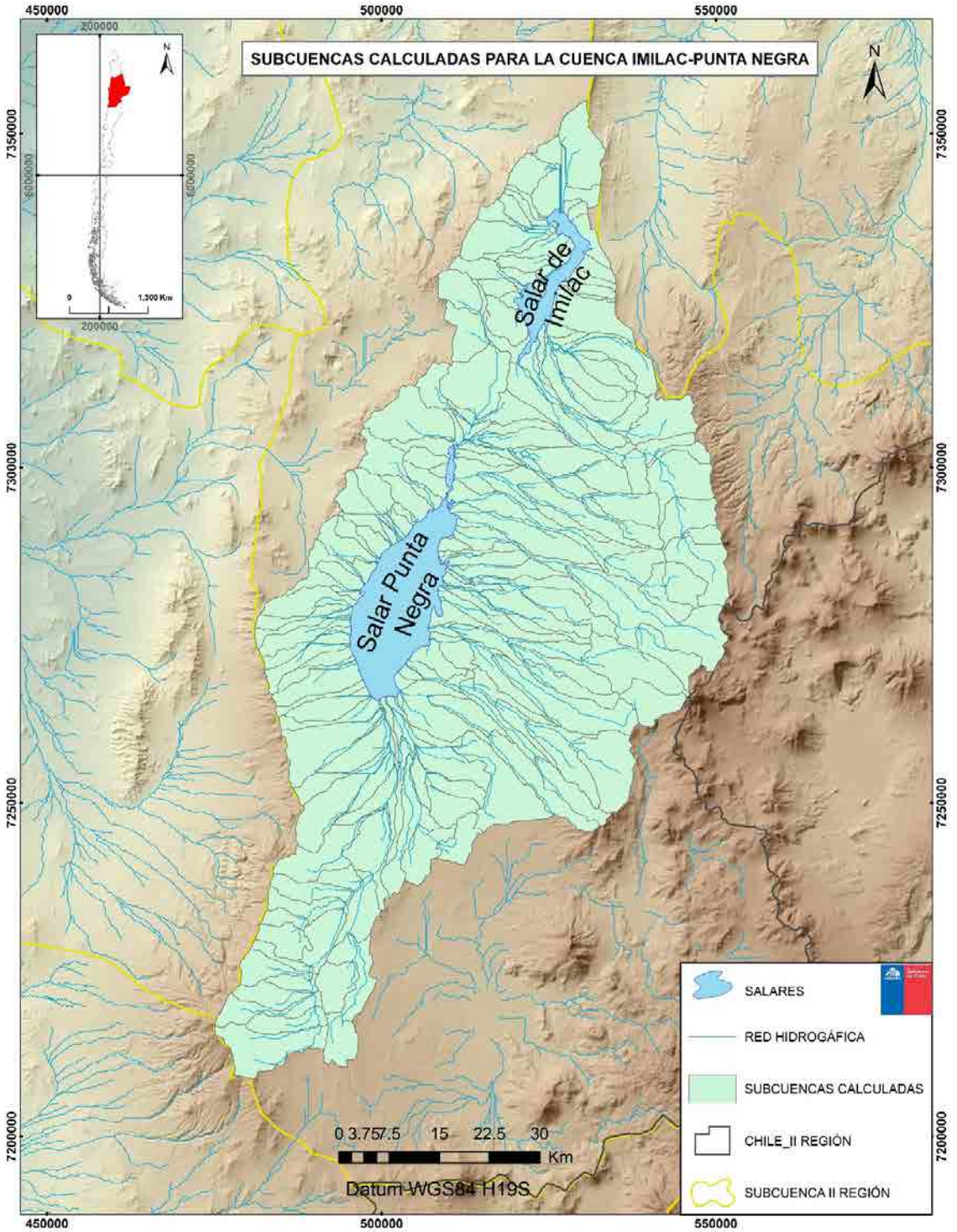


Figura 5-25. Sub-Subcuencas generadas para la cuenca hidrológica del salar de Imilac-Punta Negra. elaboración Propia

5.3.3 DEFINICIÓN DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA

La generación de las sub-subcuencas del sector definido por la cuenca del Salar de Imilac-Punta Negra ha permitido definir dos subcuencas discretizadas para cada uno de los salares, características de las cuales se presentan en la **Tabla 5-16**.

CUENCA	CÓDIGO CUENCA	CÓDIGO SUBCUENCA	ÁREA CUENCA HISTÓRICA (Km^2)	SUBCUENCA	ÁREA SUBCUENCA PROPUESTA (Km^2)
Salar de Punta Negra	026	0265	5.233	Salar de Punta Negra	4.193
				Salar de Imilac	1.115
				Total Cuenca Propuesta	5.308

Tabla 5-16. Definición de las cuencas del salar de Imilac-Punta Negra. Fuente: elaboración Propia

Con el análisis geomorfológico realizado, se ha redefinido los límites respecto a la cuenca existente histórica. En la **Figura 5-26** se muestra la redefinición de la cuenca hidrográfica del sector de los salares de Imilac-Punta Negra, donde el borde verde representa el límite obtenido (delimitación propuesta) y el borde negro representa el límite antiguo histórico existente en la base de datos de la DGA.

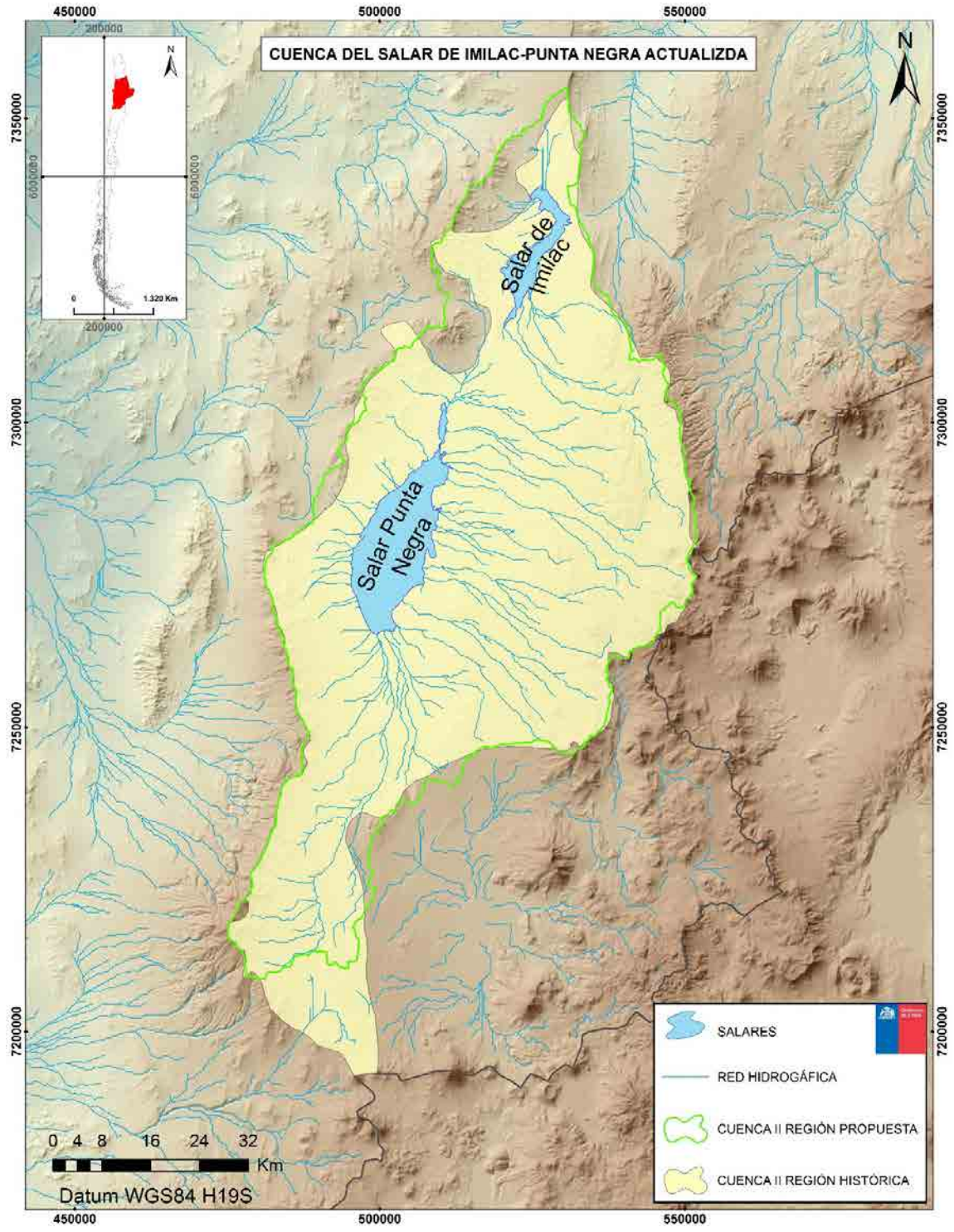


Figura 5-26.Redefinición del límite de la cuenca Salar de Imilac-Punta Negra. Fuente: elaboración Propia

5.4 ANÁLISIS DE VARIABLES HIDROMETEOROLÓGICAS

En este numeral del documento se presenta la información disponible de las variables hidrometeorológicas: precipitación, temperatura y evaporación disponibles en la red de monitoreo hidrometeorológico de la Dirección General de Aguas. No existen datos sobre estaciones fluviométricas por lo que el análisis de los caudales no se ha realizado. En cada subcapítulo se describen detalles de estas variables, de acuerdo al registro de un listado de estaciones de monitoreo seleccionadas en función de características geográficas y de calidad de datos. Estas estaciones se ubican tanto dentro de la cuenca del Salar de Imilac-Punta Negra como fuera de su ámbito. Las estaciones meteorológicas de las cuales se han obtenido los datos, se han seleccionado en función de características geográficas y de la cantidad y calidad de datos disponibles. Todas las estaciones utilizadas se encuentran dentro de la cuenca del Salar de Atacama, las cuales se describirán en los numerales posteriores.

A modo de resumen, se puede comentar lo siguiente sobre cada variable:

- **Precipitación:** De la observación de los promedios mensuales de las series, se desprende, que estos muestran una marcada estacionalidad. En el caso de la precipitación, los máximos ocurren en verano (enero - marzo) y los mínimos, casi cero, ocurren en el periodo abril – diciembre (**Figura 5-28**).

  El valor medio anual de la precipitación en toda el área varía entre 20 y 65,6 mm, el gradiente de precipitación con la altura varía 4,025 mm cada 100 m de altitud.

- **Temperatura:** La temperatura media anual disminuye con la altura, en un gradiente de -0,81°C por cada 100 m de altitud, esto hace que las mayores temperaturas se encuentren en el área del salar de Punta Negra (En torno a 12°C) y las menores temperaturas en las cimas de las montañas de la cordillera de los Andes, con mínimos de -13°C en la cima del volcán LLullaillaco.

  Con respecto a la variación temporal, las temperaturas muestran un comportamiento bastante similar a las precipitaciones, con máximos en los meses de verano (diciembre – febrero) y mínimos en invierno (junio - agosto).

- **Evaporación:** La evaporación en el área de estudio se produce desde superficies libres (lagunas) y aguas subterráneas (Nivel freático) y su tasa de evaporación

depende principalmente de las condiciones meteorológicas, salinidad del agua y la profundidad del nivel freático.

Tal y como se explica en el **numeral 5.4.3**, la evaporación total es de 236 L/s. La principal evaporación se produce desde agua subterránea con un total evaporado en el salar de Punta Negra de 209.5 L/s y 5.4 L/s en el salar de Imilac. La superficie de evaporación desde lámina libre a pesar de tener tasas de evaporación mayores, del orden de 5,5 mm/d, ocupa un área menor liberando un total evaporado de 21.2 L/s.

Es importante destacar que en la cuenca del salar de Imilac-Punta Negra no existen datos sobre estaciones fluviométricas, ni tampoco existen cauces permanentes, por lo que el análisis de los caudales no se ha realizado.

5.4.1 PRECIPITACIONES

A la hora de realizar el análisis de precipitaciones, se comenzó evaluando los datos de precipitaciones disponibles en el área de estudio, seleccionando aquellos datos que eran los más representativos. En los siguientes párrafos se presentan las estaciones utilizadas en el análisis, así como los criterios de selección de estaciones utilizados.

Es importante destacar que la zona de estudio cuenta con muy pocos datos públicos de variables hidrometeorológicas en el interior de la cuenca. Únicamente la estación de Imilac se encuentra en su interior, esta cuenta con un registro temporal muy corto (5 años), por lo que fue descartada para ser utilizada en el análisis de precipitaciones. La estación más cercana a la cuenca, aunque ya fuera de ella, es la estación de Monturaqui, la cual también fue descartada del estudio por presentar una serie de registro de muy corta duración.

Hacía el sur de la cuenca objeto de estudio, se encuentra la estación de Vaquillas, la cual cuenta únicamente con dos años de registro, dentro de los cuales se encuentran algunas interrupciones en el registro, por lo que tampoco fue utilizada en el análisis de precipitaciones. Así mismo, hacia el sur-oeste, a 53 km de la costa, se encuentra la estación de Aguas Verdes, la cual está instalada a 1.560 m de altitud, por lo que también fue descartada por encontrarse muy alejada del rango altitudinal del área de estudio.

Por lo tanto, para realizar el análisis de precipitaciones, se han seleccionado los datos disponibles de las estaciones más cercanas a la cuenca, que se encuentran dentro del mismo rango altitudinal y que cuentan con un registro de precipitación mensual suficientemente extenso y actualizado para ser utilizado en el análisis de precipitaciones, estas estaciones son Socaire, Talabre, Peine y Camar, todas ellas se encuentran al norte de la zona de estudio, en la vecina cuenca del Salar de Atacama.

En la **Tabla 5-17** se muestran la serie temporal de registro de cada estación, así como el tipo de dato de precipitación disponible.

	Fechas de registro		Tipo de dato	
Nombre estación	**Inicio**	**Final**	**PP. Mensual (mm)**	**PP. Diaria (mm)**
Imilac	nov-72	abr-77	Sí	Sí
Monturaqui	nov-74	dic-79	Sí	Sí
Vaquillas	nov-1896	feb-88	Sí	Sí
Camar	ene-79	V	Sí	Sí
Peine	nov-74	V	Sí	Sí
Socaire	ago-74	V	Sí	Sí
Talabre	ago-95	V	Sí	Sí

V: vigente * WGS84, Huso 19S

Tabla 5-17. Estaciones meteorológicas con información de precipitación en el área de estudio y zonas aledañas. Fuente: Dirección General de Aguas.

En la **Tabla 5-18** se representa gráficamente los periodos de registro de las estaciones evaluadas.

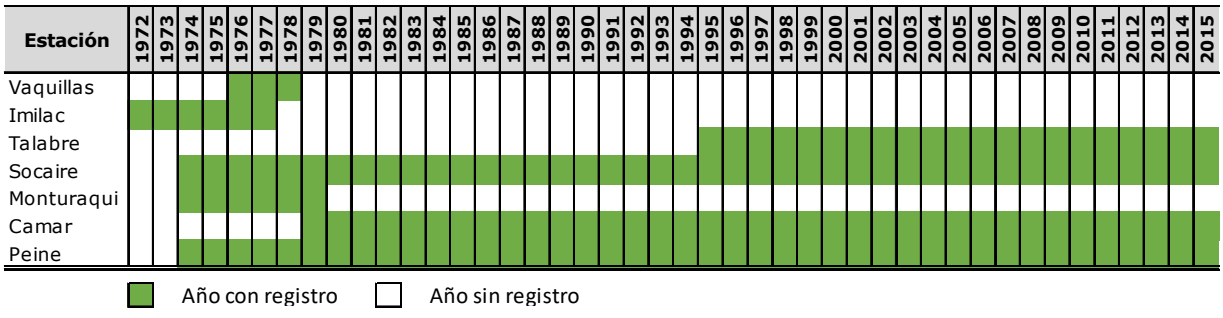


Tabla 5-18. Años de registro en estaciones evaluadas. Fuente: Dirección General de Agua.

Con respecto a su distribución geográfica (**Figura 5-27)** y altitudinal de las estaciones, todas se encuentran en un rango de cotas entre 2.460 msnm y 3.430 msnm, tal y como se indica en la **Tabla 5-19.**

Nombre estación	UTM* Este (m)	UTM* Norte (m)	Elevación (msnm)
Camar	605.954	7.411.015	2.700
Peine	596.045	7.380.388	2.460
Socaire	613.011	7.391.031	3.251
Talabre	613.727	7.421.415	3.300

* WGS84, Huso 19S

Tabla 5-19. Coordenadas estaciones meteorológicas DGA. Fuente: Dirección General de Aguas.

En el año 2010, se publicó el estudio *'Actualización de la evaluación de la disponibilidad de recursos hídricos para constituir derechos de aprovechamiento en las subcuencas afluentes al salar de atacama. II Región'*, el cual presenta un análisis de series de precipitación y temperatura para la cuenca del salar de Atacama, en las cuales se completó las series de las estaciones de Peine, Socaire y Camar, entre el año 1974 y Marzo de 2009. Dichos datos completados han sido los utilizados en el presente estudio.

Los valores de precipitación de la estación de Talabre en todo su periodo de registro, y de las estaciones de Peine, Socaire y Camar desde marzo de 2009 hasta Diciembre de 2015, fueron obtenidos a través de la Dirección General de Aguas.

El estudio de precipitaciones se hizo por tanto, teniendo en cuenta los datos registrados entre enero de 1974 y diciembre de 2015, por ser en este periodo en donde se encuentran la mayor parte de los datos. Los valores no completados en el estudio de la Dirección General de Aguas (2010) fueron completados mediante regresión lineal simple, tal y como se explica en los siguientes puntos.

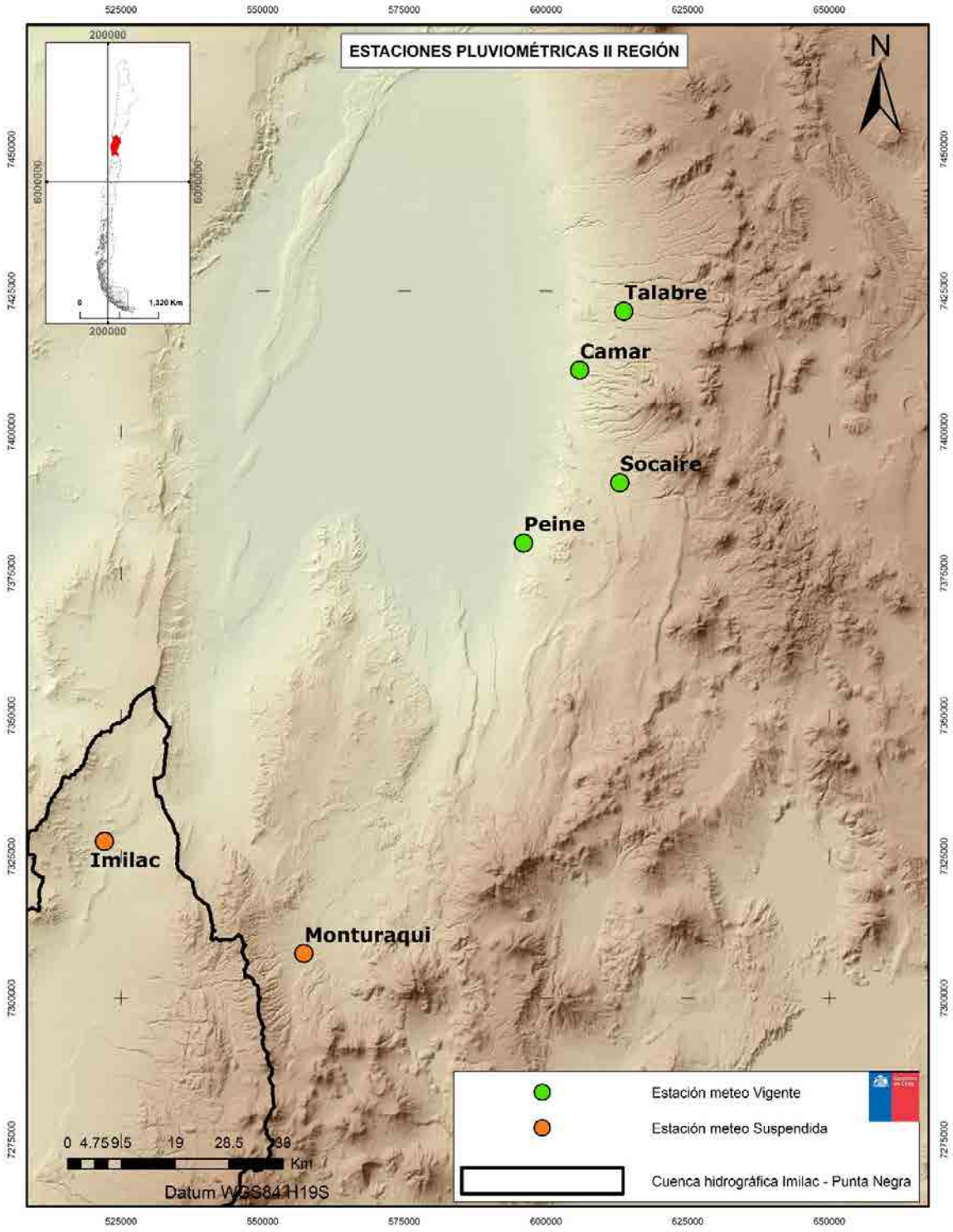


Figura 5-27. Estaciones pluviométricas II Región. Fuente: Dirección General de Aguas.

5.4.1.1 METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE CONSISTENCIA DE LOS DATOS Y COMPLETADO DE SERIES

Los datos de precipitación pueden contener errores de diversa índole, los más habituales son errores de observación de la lectura, de escritura o de cálculo. Este hecho hace necesario analizar la consistencia de los datos, antes de utilizarlos para futuros cálculos.

Una de las técnicas para analizar la consistencia de los datos es la conocida como el análisis de doble masa, este método considera que las estaciones cercanas y dentro de un área de precipitación homogénea han de tener un comportamiento similar.

El método consiste en comparar los datos acumulados de cada estación con los datos acumulados de una estación base, formada a partir de las medias aritméticas de tres estaciones fiables o con mayor número de medidas. Los datos de esta estación base y de la estación a comparar se representan en un gráfico, representando las precipitaciones acumuladas de la estación base en el eje horizontal (Abscisas) y las de la estación a comparar en el eje vertical (Ordenadas).

Si los datos se alinean en una recta sin cambios de pendiente y sin puntos que se desvíen considerablemente, es un indicativo de que los valores de la estación base y la estación a comparar son proporcionales entre sí, lo cual es esperable para una misma área, por lo tanto, la consistencia de los datos es adecuada y se consideran datos fiables.

En los casos en los que se detecta algún dato que se encuentra fuera de la recta, indica que se ha producido un error accidental puntual. En ese caso, el dato no se tendrá en cuenta o será corregido estimándolo a partir de la recta.

Los cambios de pendiente de la recta, indican la existencia de un error sistemático a partir de la fecha de dicho cambio de pendiente.

En el caso de la II Región, todas las estaciones representadas en el gráfico de comparación muestran que los datos se alinean en torno a una línea recta, sin puntos que se alejen sustancialmente de la línea y sin cambios de pendiente, lo cual es un indicativo de que todas las estaciones contienen datos fiables y por tanto todas las series pueden utilizarse para cálculos posteriores.

Los gráficos de comparación se encuentran recogidos en el **Anexo 4 Variables Hidrometeorológicas**.

Las series consultadas presentaban vacíos de información, este es un problema habitual en todo estudio de variables hidrometeorológicas. Con el objetivo de utilizar un periodo homogéneo de tiempo en todas las estaciones y poder rellenar los espacios en blanco de los periodos registrados, se decidió completar los vacíos de las series utilizando el método de completado mediante regresión lineal simple.

Este método consiste en completar los datos ausentes de una serie, mediante la ecuación de la recta de regresión de la serie incompleta con otra serie de la misma naturaleza y comportamiento y que contenga ese dato. Este modelo es el más utilizado para transferir información entre estaciones, pero es importante destacar que este método presenta la limitación de que el registro completado presenta una varianza menor de la que debiera, de manera que la estimación de este parámetro es estadísticamente peor ya que queda sesgada (Fernández, B., & Salas, J. (1995)).

La ecuación de la recta de regresión es la siguiente:

$$y = bx + a$$

Donde:

y- Valor de dato a completar
b- Pendiente de la recta de regresión
a - Termino independiente
x- Valor existente en la serie de referencia

Para seleccionar la serie de referencia, se calculó el coeficiente de regresión entre todas las series, una vez calculado, se seleccionó para el completado aquella serie cuyo coeficiente de regresión era mayor.

El coeficiente de regresión se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$r = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_X \, \sigma_Y}$$

Donde:

r - Coeficiente de regresión.

σ_{xy}- Covarianza de las series

σ_X- Desviación típica de referencia.

σ_Y- Desviación típica de la serie a completar

Los valores del coeficiente de regresión obtenidos, así como los valores completados de todas las series de precipitación se encuentran recogidos en el **Anexo 4 Variables Hidrometeorológicas**.

Es importante mencionar, que para el caso de las precipitaciones, la ecuación de la recta de regresión se aplicó sin el término independiente, esto con el fin de evitar que se obtuvieran valores negativos, los cuales no son posibles.

5.4.1.2 PROMEDIOS MENSUALES Y ESTACIONALIDAD

En toda el área de estudio y zonas aledañas, la precipitación presenta una marcada estacionalidad, caracterizada por presentar máximos en el periodo enero - marzo, y mínimos (prácticamente cero) en el periodo abril – diciembre. Los valores de precipitación promedio mensual pueden observarse en la **Tabla 5-20**.

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Camar (mm)	6,45	12,57	9,16	0,12	1,03	2,72	0,22	0,79	0,44	0,05	0,18	0,60
Peine (mm)	2,25	6,28	6,17	0,50	1,42	1,59	0,46	0,57	0,45	0,07	0,02	0,23
Socaire (mm)	10,60	13,37	7,74	1,10	2,48	2,49	0,86	0,83	0,82	0,24	0,28	0,73
Talabre (mm)	12,95	23,63	15,74	1,13	2,10	4,89	1,15	1,88	0,75	0,02	0,30	1,08

Tabla 5-20. Precipitación media mensual en estaciones meteorológicas del área de estudio y zonas aledañas para el periodo 1974-2015. Fuente: Dirección General de Aguas.

En la **Figura 5-28**, se representan en un gráfico de línea los datos de precipitación promedio mensual, en donde se aprecia de manera visual el brusco cambio entre los periodos de máximas y mínimas precipitaciones.

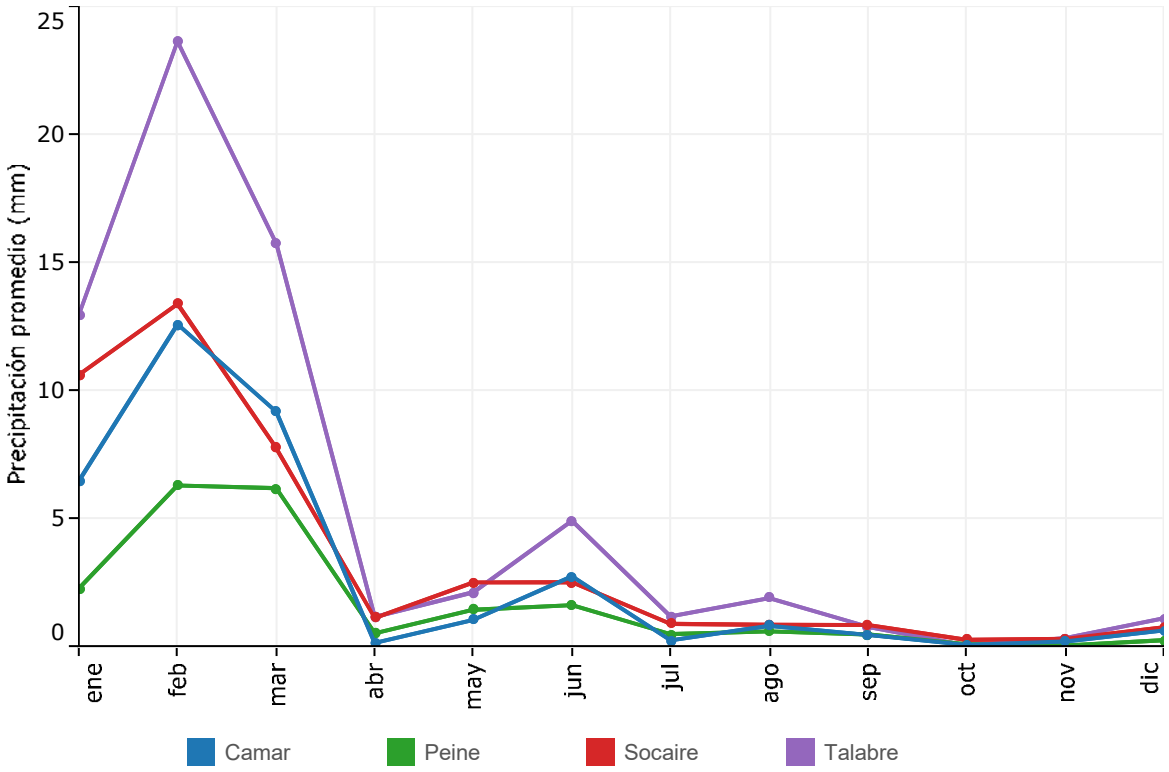


Figura 5-28. Precipitación media mensual en estaciones alrededor de la cuenca de estudio para el periodo 1974-2015. Fuente: modificado Dirección General de Aguas.

5.4.1.3 EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE PRECIPITACIONES

El estudio de la serie de precipitaciones anuales acumuladas permite determinar cuál es la precipitación promedio de toda la serie, así como las secuencias de años húmedos y secos.

Los valores de precipitación acumulada anual para cada una de las estaciones se muestran en el **Anexo 4 Variables Hidrometeorológicas**.

La evolución de la precipitación acumulada anual en el periodo estudiado se muestra en la **Figura 5-29.**

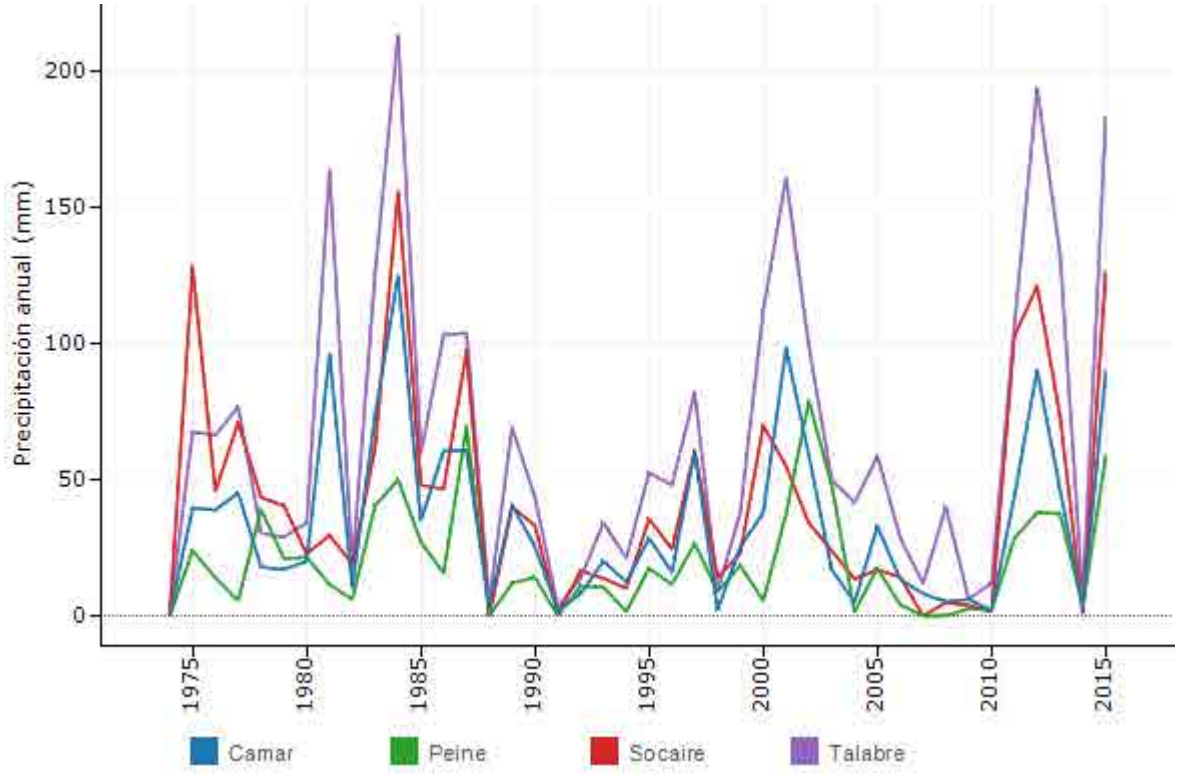


Figura 5-29. Evolución precipitación acumulada anual II Región. Fuente: Dirección General de Aguas.

Para determinar el valor promedio de precipitación anual, se realizó la media aritmética de precipitación anual acumulada de las estaciones, a partir de dichos promedios anuales se calculó el promedio de precipitaciones la serie completa (1974 y 2015). Este promedio de precipitaciones para toda la serie es de 40,4 mm/año.

Según (Martínez , Martínez, & Castaño, 2006), la comparación del promedio de cada año con el promedio de toda la serie nos permite determinar las secuencias de años secos y años húmedos. Basándonos en la metodología explicada en el citado libro, se determinó la diferencia acumulada del promedio de precipitaciones anuales de cada año respecto al promedio de precipitaciones anuales de toda la serie.

La representación de la diferencia acumulada versus el tiempo nos permite identificar secuencias secas y húmedas, siendo secuencias secas aquellos en que la curva tiene una pendiente negativa y secuencias húmedas aquellos en la que curva tienen una pendiente positiva.



Figura 5-30. Series húmedas y secas de precipitación en II Región. Fuente: Dirección General de Aguas.

Como se observa en la **Figura 5-30**, existe una alternancia de series medias, húmedas y secas, estas secuencias han sido identificadas y se representan en la **Tabla 5-21,** dichas secuencias tienen una duración promedio de 6,8 años y muestran que en el año 2015 nos encontramos dentro de una secuencia húmeda.

Secuencia	Año de inicio	Año de fin	Duración (años)
Media	1974	1983	9
Húmeda	1983	1990	7
Seca	1990	1999	9
Húmeda	1999	2002	3
Seca	2002	2010	8
Húmeda	2010	2015	5
Promedio duración de secuencias			6,8

Tabla 5-21. Secuencias de precipitación II Región. Fuente: Dirección General de Aguas.

5.4.1.4 PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL Y GRADIENTE ALTITUDINAL

La precipitación media anual se calculó como el promedio de las precipitaciones totales anuales de cada estación, obtenidas a su vez, a partir de la sumatoria de las precipitaciones totales mensuales.

Los valores de precipitación promedio anual se muestran en la **Tabla 5-22.**

Estación	Precipitación promedio anual (mm)	Elevación (msnm)
Talabre	65,6	3.300
Socaire	41,5	3.251
Camar	34,3	2.700
Peine	20,0	2.460
Promedio estaciones	40,4	

Tabla 5-22. Precipitación media anual en las estaciones del área de estudio y zonas aledañas para el periodo 1974-2015. Fuente: Dirección General de Aguas.

De la comparación entre la cota y el valor de precipitación media anual de las estaciones, se observa que existe un gradiente altitudinal en la zona, este gradiente de precipitación tienen un valor de 4,025 mm cada 100 m de altitud.

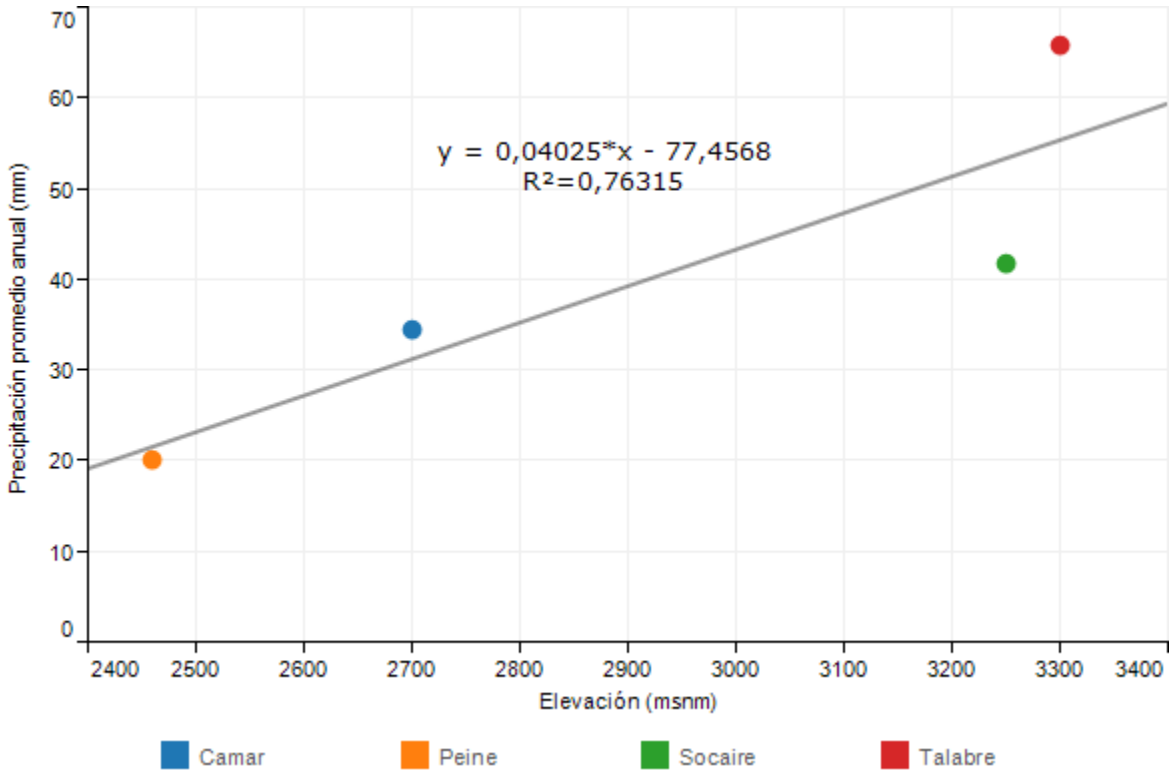


Figura 5-31. Gradiente altitudinal de precipitaciones II Región. Fuente: Dirección General de Aguas.

5.4.1.5 CÁLCULO DE PRECIPITACIONES SOBRE LA CUENCA

Para el cálculo de precipitaciones caídas en la cuenca objeto de estudio, se realizó un mapa de isoyetas, las cuales fueron obtenidas a través de la aplicación al modelo digital del terreno del gradiente altitudinal explicado en la sección anterior.

La falta de datos de registro de precipitaciones dentro del área de estudio, motivó la utilización del método de isoyetas en lugar de otros métodos de cálculo de precipitación, los cuales, necesitan contar con datos de precipitación en el interior de la cuenca, tal y como es el caso de los Polígonos de Thiessen.

A continuación se realizó una división de la cuenca en bandas de precipitación, las cuales se encuentran limitadas por las isoyetas. A cada una de esas bandas, se le asignó el valor promedio de precipitación correspondiente al punto medio entre las isoyetas superior e inferior que limitan la banda (**Figura 5-32**). La precipitación total anual sobre la cuenca se obtuvo multiplicando el área de cada banda por la precipitación promedio asignada,

mediante este método la precipitación total obtenida para un periodo de un año en toda la cuenca es de 350 hm^3, equivalente a 11.098 L/s.

Publicaciones anteriores sobre el salar de Punta Negra, cifran la precipitación total con valores bastante similares al obtenido en este estudio, tal es el caso de Orellana y Ramírez (DGA, 1972), los cuales obtienen un valor de 335 hm^3 para el salar de Punta Negra, así como en Balance hídrico de Chile (DGA, 1988) que cuantifica la precipitación en la cuenca de Punta Negra en 447 hm^3 por año.

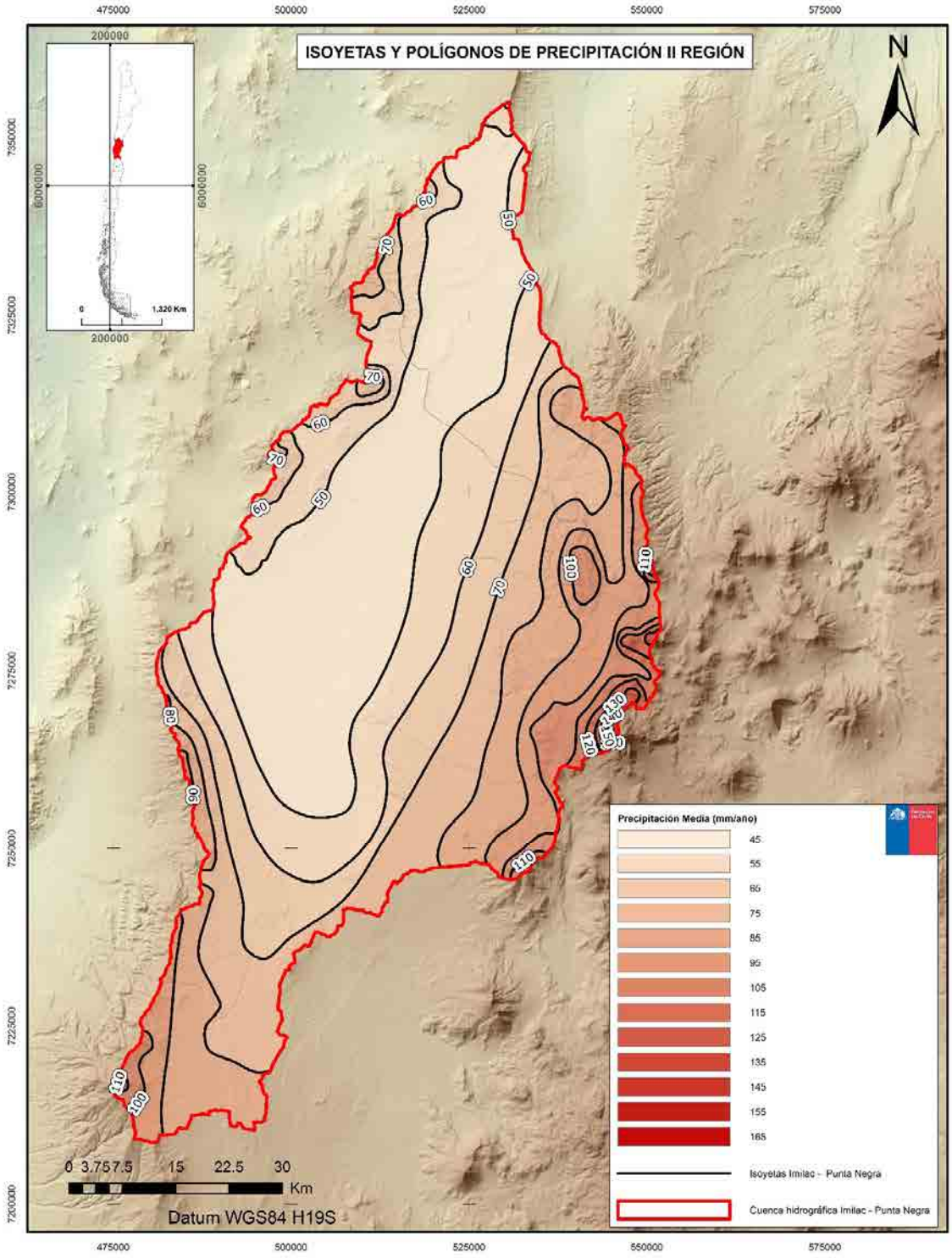


Figura 5-32. Isoyetas y bandas de precipitación II Región. Fuente: elaboración propia.

5.4.2 TEMPERATURA

Al igual que en caso de las precipitaciones, la zona de estudio cuenta con muy pocos datos públicos de temperaturas. Inicialmente se evaluaron los registros de 7 estaciones, de las cuales únicamente se utilizaron 3 de ellas para hacer el análisis de temperaturas.

Las estaciones fueron seleccionadas en base a los periodos de registro de datos disponibles y a su ubicación geográfica.

Los periodos de registro y el tipo de información registrada en cada estación evaluada se resumen en la se encuentran en la **Tabla 5-23**.

Estación	Inicio de registro	Fin de registro	T° media mensual
Imilac	-	-	No
Monturaqui	nov-74	jun-80	Sí
Camar	-	-	No
Peine	nov-74	V	Sí
Socaire	ago-74	nov-98	Sí
Vaquillas	nov-86	feb-88	Sí
Talabre	-	-	No

V- Vigente

Tabla 5-23. Periodos de registro de las estaciones evaluadas. Fuente: Dirección General de Aguas.

La estación con un mayor periodo de registro es 'Peine', que opera desde noviembre de 1974 hasta la actualidad, el registro de temperaturas del resto de las estaciones fue interrumpido años atrás.

Debido a que la mayoría de las estaciones cuentan con datos a partir de finales del año 1974, se decidió realizar el análisis de temperaturas en el periodo 1975 - 2015.

Los datos de las estaciones utilizadas en el análisis de temperaturas, fueron sometidos a análisis de consistencia de los datos mediante el método de dobles masas, así mismo, los datos faltantes dentro de las series fueron completados mediante regresión lineal simple, tal y como se explica en el **numeral 5.4.1.1**. El análisis de dobles masas para este caso muestra que los datos de todas las estaciones se alinean en una recta sin cambios de

pendiente, lo cual indica que los datos mantienen la proporcionalidad a lo largo del tiempo y por tanto se consideraron fiables.

La serie de datos utilizada para cada estación se muestra en el **Anexo 4 Variables Hidrometeorológicas**.

Con respecto a su ubicación geográfica, las 3 estaciones utilizadas para el análisis se encuentran fuera de la cuenca objeto de estudio, la más cercana a la cuenca es la estación de 'Monturaqui', la cual se encuentra en la pampa de Socompa, en la vecina cuenca del salar de Atacama. Las otras dos estaciones (Peine y Socaire) se encuentran más alejadas en dirección norte y también dentro de la cuenca del salar de Atacama. La estación de Vaquillas, la cual se encuentra el sur de la cuenca objeto de estudio, no se tuvo en cuenta en el análisis de temperaturas por presentar un registro temporal muy corto (2 años).

Las coordenadas de cada estación se muestran en la **Tabla 5-24.**

Estación	UTM* Este (m)	UTM* Norte (m)	Elevación (msnm)
Monturaqui	557.288	7.307.823	3.430
Peine	596.045	7.380.388	2.460
Socaire	613.011	7.391.031	3.251

*WGS1984

Tabla 5-24. Coordenadas estaciones meteorológica utilizadas en el análisis de temperaturas . Fuente: Dirección General de Aguas.

En la **Figura 5-33** se muestra la ubicación geográfica de las estaciones utilizadas.

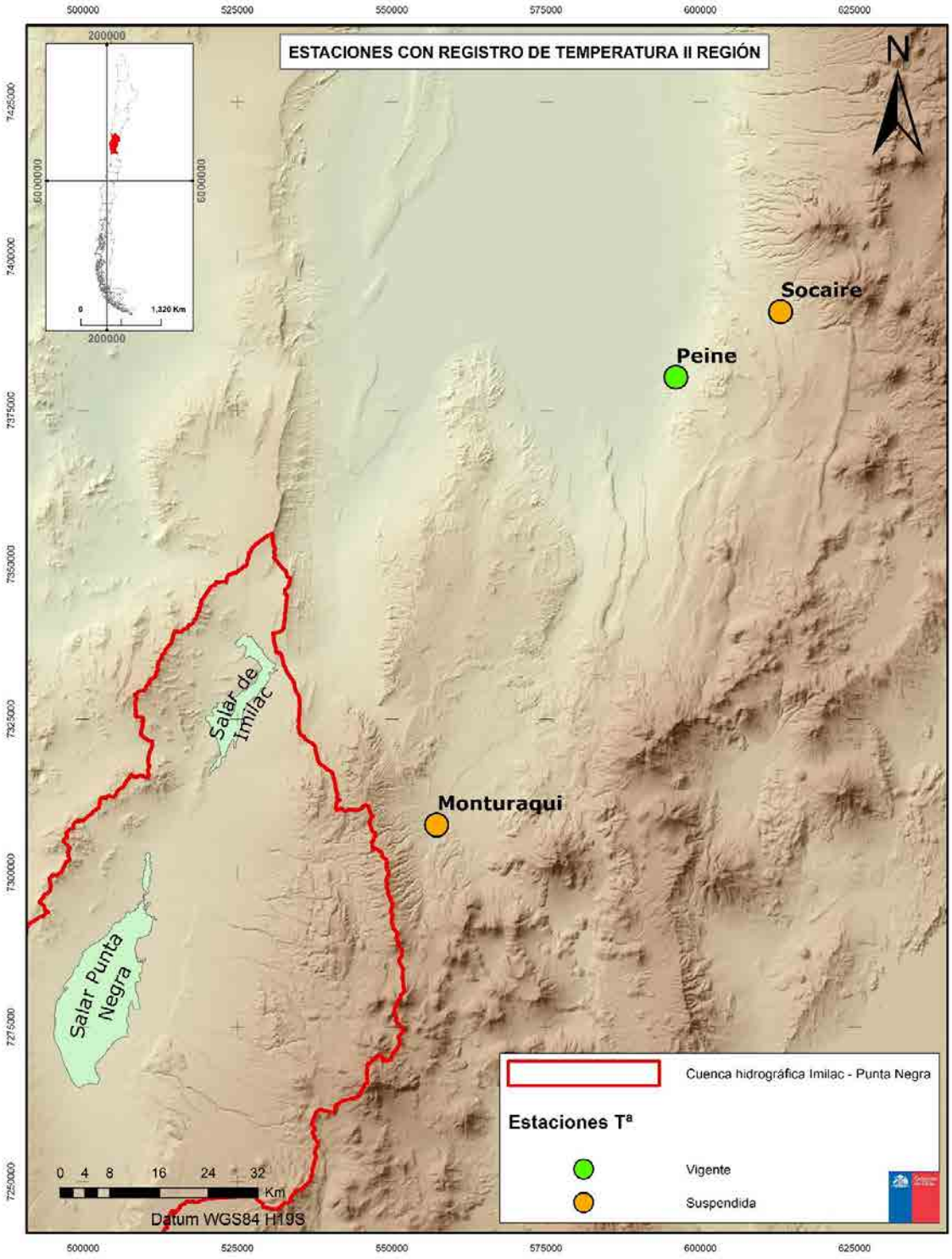


Figura 5-33. Estaciones meteorológicas con registro de temperatura. Fuente: Dirección General de Aguas.

5.4.2.1 PROMEDIOS MENSUALES Y ESTACIONALIDAD

La temperatura, al igual que la precipitación, presenta una marcada estacionalidad, con máximos en los meses de verano (diciembre – febrero) y mínimos en invierno (junio - agosto) tal y como se puede observar en la **Figura 5-34**.

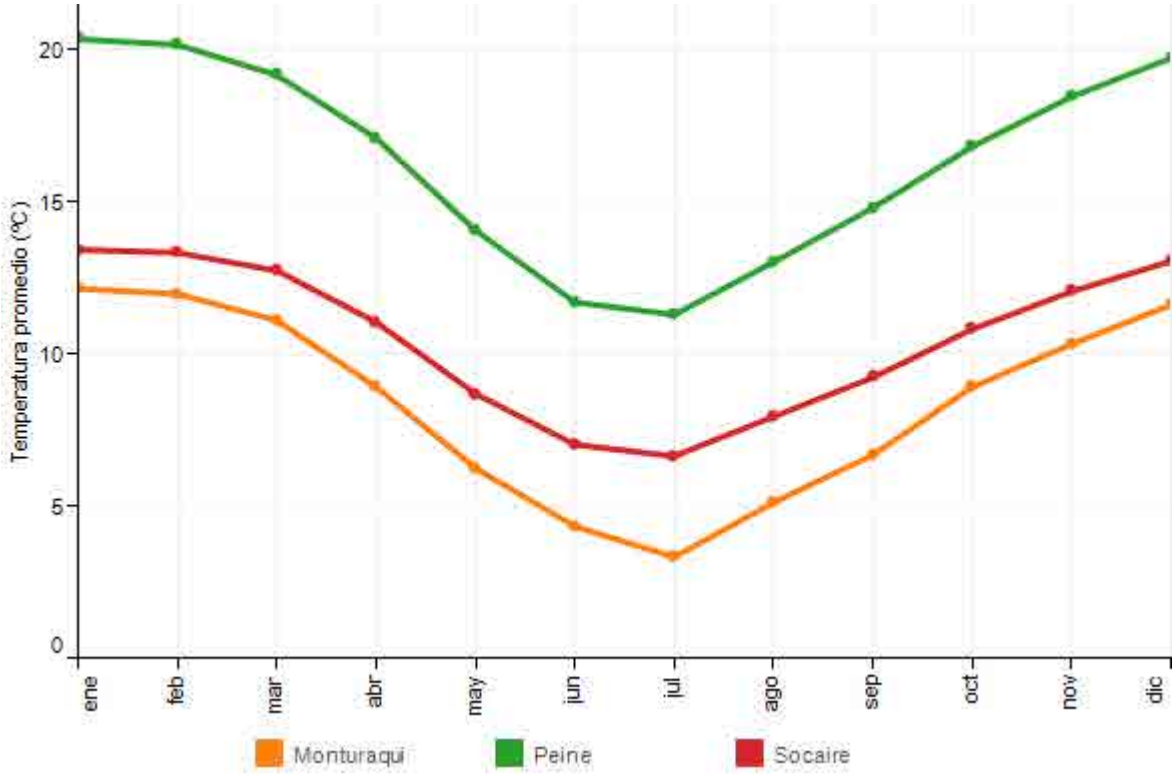


Figura 5-34. Variación de la temperatura media mensual en las estaciones localizadas alrededor del área de estudio y zonas aledañas. Fuente: Dirección General de Aguas.

En la **Tabla 5-25,** se muestran los datos de temperatura media mensual**,** la temperatura media máxima registrada en un mes es de 20,33°C en la estación 'Peine', para el mes de enero, siendo esta la estación a menor altitud geográfica (2.460 msnm), por otra parte, la mínima temperatura media mensual es de 3,32 °C y se identifica en la estación 'Monturaqui' la cual se encuentra a mayor altitud (3.430 msnm).

	Temperatura (°C)		
Mes	**Monturaqui**	**Peine**	**Socaire**
Enero	12,14	20,33	13,42
Febrero	11,96	20,15	13,32
Marzo	11,09	19,15	12,73
Abril	8,90	17,08	11,03
Mayo	6,24	14,05	8,68
Junio	4,32	11,69	7,01
Julio	3,32	11,28	6,63
Agosto	5,11	13,01	7,93
Septiembre	6,67	14,79	9,22
Octubre	8,91	16,81	10,81
Noviembre	10,32	18,45	12,05
Diciembre	11,60	19,71	13,04

Tabla 5-25. Temperatura media mensual en estaciones meteorológicas del área de estudio y zonas aledañas. Fuente: Dirección General de Aguas.

5.4.2.2 TEMPERATURA MEDIA ANUAL Y GRADIENTE ALTITUDINAL

La temperatura media anual se calculó como un promedio de las temperaturas medias mensuales, el promedio para toda la serie de datos utilizada (1974-2015) para cada estación se muestra en la **Tabla 5-26.**

Estación	Temperatura anual media °C	Elevación (msnm)
Monturaqui	8,38	3.430
Peine	16,51	2.460
Socaire	10,60	3.251

Tabla 5-26. Temperatura media anual en las estaciones del área de estudio y zonas aledañas. Dirección General de Aguas.

Como se observa en la **Tabla 5-26**, la estación que se encuentra a mayor altitud (Monturaqui) es la que tiene el menor valor de temperatura media anual (8,38°C), así mismo la estación que se encuentra a menor altitud (Peine) es la presenta el mayor valor

de temperatura media anual (16,51°C). Esto es debido a que existe un gradiente altitudinal de temperaturas, según el cual, la temperaturas disminuye 0,81°C por cada 100 m de altitud. La recta de ajuste utilizada para obtener este gradiente se muestra en la **Figura 5-35.**

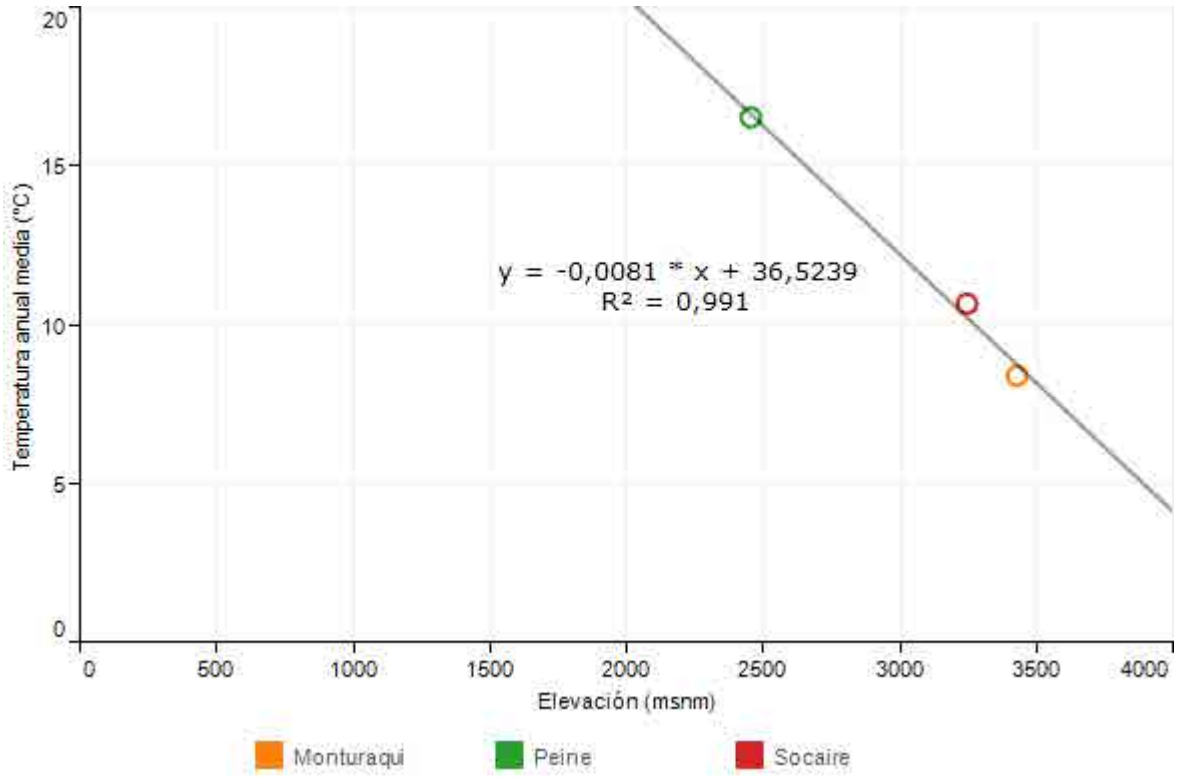


Figura 5-35. Gradiente altitudinal de temperaturas salar de Imilac - Punta Negra. Fuente: Dirección General de Aguas.

A diferencia de las precipitaciones, la evolución de la temperatura media anual en el periodo analizado, muestra que las temperaturas son bastante estables, mostrando desviaciones en años especialmente cálidos o fríos, las máximas desviaciones encontradas con respecto al promedio corresponden al año 1989, -1,61°C para la estación de 'Monturaqui', -1,29°C para 'Peine' y -1,09°C para 'Socaire', en la **Figura 5-36** se representa la evolución de la temperatura media anual en el periodo de estudio (1975-2015).

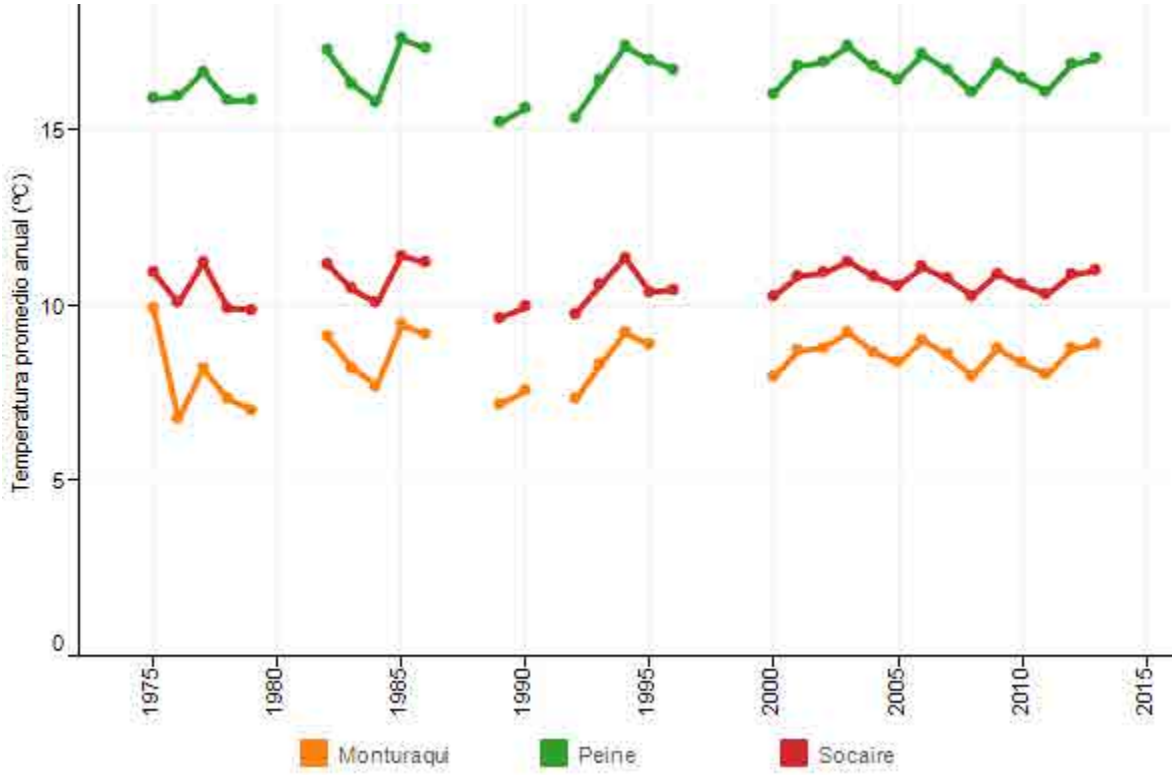


Figura 5-36. Evolución de temperaturas medias anuales. Fuente: Dirección General de Aguas.

5.4.2.3 CARACTERIZACIÓN ESPACIAL, ISOTERMAS

La caracterización espacial de temperaturas se realizó mediante la herramienta ARCGIS, aplicando el gradiente altitudinal obtenido en el numeral anterior al modelo digital del terreno, de esta forma se obtuvo un modelo digital de temperaturas sobre el cual se trazaron líneas isotermas cada 2°C. De esta manera se generó el mapa de isotermas y polígonos de temperatura que se muestra en la **Figura 5-37,** dichos polígonos de temperatura, se encuentran limitados por las líneas isotermas y representan áreas cuya temperatura promedio se muestra en la leyenda del mapa.

En la **Figura 5-37,** se observa que las mayores temperaturas se obtienen en la zona de los salares y las partes bajas del acuífero aluvial, disminuyendo hacia la cordillera y alcanzando mínimos de temperatura en el volcán Llullaillaco, cuya cumbre se encuentra dentro del polígono de -13°C a más de 6.000 metros de altitud.

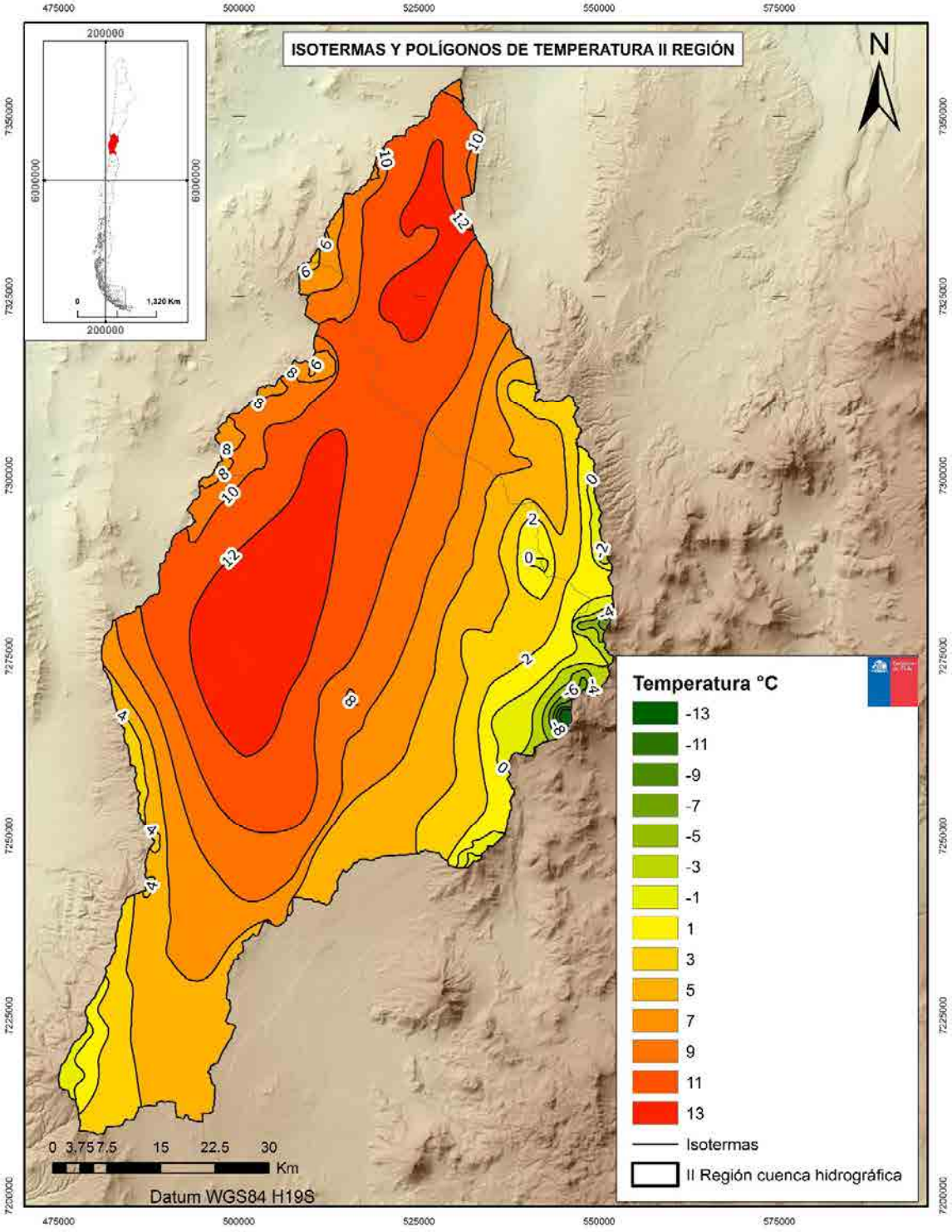


Figura 5-37. Mapa de Isotermas y polígonos de temperaturas salar de Imilac-Punta Negra. Fuente: elaboración propia.

5.4.3 EVAPORACIÓN

En la cuenca del salar de Imilac y salar de Punta Negra se estima que la evaporación se produce mayormente desde superficies libres (lagunas) y aguas subterráneas (Nivel freático). Si bien existen en las zonas altas de la cuenca algunos bofedales, según la experiencia del consultor, se considera que por su reducido tamaño no tendrían efecto en el cálculo total de la evaporación. Se han analizado imágenes espectrales LANDSAT 8 (Mayo, 2016) para observar el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y no se ha observado vegetación significativa.

La evaporación tanto desde lámina libre como desde agua subterránea depende principalmente de las condiciones meteorológicas tales como radiación solar, temperatura, humedad relativa y ventilación. Estos factores, combinados con la salinidad del agua y la profundidad del nivel freático en el caso de la evaporación desde aguas subterráneas, condicionan la tasa de evaporación.

La expresión utilizada para obtener la descarga total en una cuenca corresponde a la **Ecuación 5-1**. En los siguientes puntos de este numeral se detalla cómo ha sido calculado cada uno de los términos (CAZALAC-RODHOS, 2006.).

$$Descarga\ total = E_L + ET + E_N \qquad \textbf{Ecuación 5-1}$$

Donde,

$Descarga\ total$: es la salida del balance hídrico por evapotranspiración [L3/T]

E_L: evaporación de lámina libre [L3/T]

ET: evapotranspiración desde vegetación [L3/T]

E_N: evaporación desde napas [L3/T]

5.4.3.1 EVAPORACIÓN DESDE LÁMINA LIBRE (LAGUNAS)

Se entiende como evaporación desde lámina libre, toda evaporación que se produce desde lagunas o cuerpos de agua expuestos de forma directa a la radiación solar.

La evaporación desde lámina libre se calcula a partir de multiplicar la evaporación potencial (EP) por el coeficiente de reducción por salinidad (K_s) y por la superficie de lámina libre, es decir por el área de cada laguna.

El caudal que evapora desde la superficie de las lagunas fue estimado de acuerdo a la metodología empleada por Mardones (Mardones, 1998) y por DICTUC (DICTUC, 2004) mediante la **Ecuación 5-2**:

$$E_L = EP \cdot k_s \cdot A_L \qquad \textbf{Ecuación 5-2}$$

Donde,

E_L: *evaporación desde lámina libre [L3/T]*

EP: *evaporación potencial [L/T]*

k_s: *coeficiente de reducción por salinidad [1]*

A_L: *área de la superficie en lámina libre [L2]*

Los datos de evaporación potencial (EP) se calcularon a partir de los datos de Evaporación potencial de referencia (EP_0) extraídos del informe de (DGA, 2009)y se ajustaron con un coeficiente de embalse (k_e) de 0,7 (DGA, 2009).

Se revisaron tambien los datos de evaporación de las estaciones de Minera Escondida Ltda. pero dado el escaso registro (5 años) y la falta de datos en algunos meses durante este periodo, se decidió utilizar los datos presentados en el informe de (DGA, 2009). (Ide, 1978)

A continuación en la **Tabla 5-27** se muestran los datos utilizados para el cálculo de la evaporación potencial de referencia (EP_0).

Código BNA	Nombre Estación	UTM (PSAD56)		Altitud (m.s.n.m)	Estado	Años registro	Evap. Media anual (mm/año)
		Este	Norte				
02500016-1	Toconao Experimental	602.581	7.435.191	2.430	V	33	296,46
02500019-6	Socaire	613.485	7.391.129	3.251	S	25	264,21
02500020-K	Peine	595.346	7.381.030	2.480	V	34	282,03
02510006-9	San Pedro de Atacama	582.197	7.466.520	2.450	S	27	251,76

Tabla 5-27. Datos de evaporación potencial de referencia (EP0) utilizados para el cálculo de la evaporación desde lámina libre. Fuente: DGA 2009.

A partir de los datos de EP_0 presentados en la **Tabla 5-27** se calculó un valor medio de 9,1 mm/d el cual después de corregirse por el coeficiente de embalse (k_e) y el coeficiente de reducción por salinidad (K_s) se multiplicó por el área de las lagunas.

El coeficiente de reducción por salinidad varía en función de la densidad del agua de las lagunas. Las cantidades de sólidos disueltos presentes en el agua actúan reduciendo la tasa de evaporación, debido a la mayor fuerza iónica. Ide (Ide, 1978) realizó pruebas experimentales para determinar la relación entre la densidad de la salmuera y el valor de K_s en el salar de Atacama.

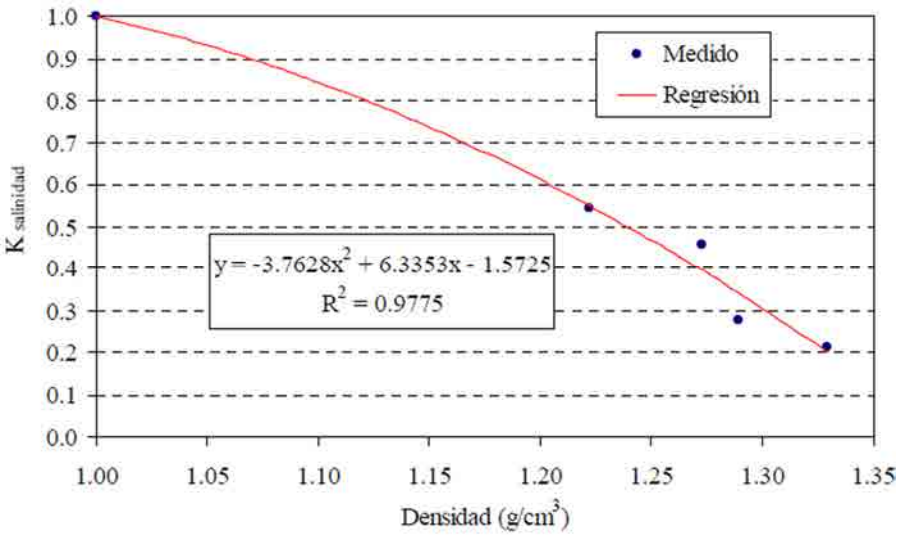


Figura 5-38. Reducción por salinidad vs densidad del agua en el salar de Atacama. Fuente DGA 2009.

A partir de los análisis químicos realizados en los sectores VCL2 y VCL3 por Minera Escondida Ltda. (MEL), se obtuvo que la densidad media de las lagunas era de 1,077 g/cm^3 por lo que K_s tendría una valor aproximado de 0,9. Para las lagunas del salar de Imilac, al no tener información, se ocupó el mismo valor de K_s.

En cuanto a las superficies de las lagunas (Philip, 1957), en el salar de Punta Negra se midió la superficie de las lagunas en los sectores VCL2 y VCL3. No se tuvieron en cuenta los sectores VCL1 y V3 al no observarse sobre la imagen satelital cuerpos de agua. En el caso del salar de Imilac, los cuerpos de agua se sitúan en el salar ubicado al SO los cuales también fueron digitalizados. El análisis se realizó en base a la imagen de Google Earth del

día 14-01-2015 para el salar de Punta Negra y la imagen del día 29/07/2013 para el salar de Imilac.

A continuación en la **Figura 5-39** se muestra la ubicación de las lagunas y en la **Tabla 5-28** la superficie correspondiente a cada sector.

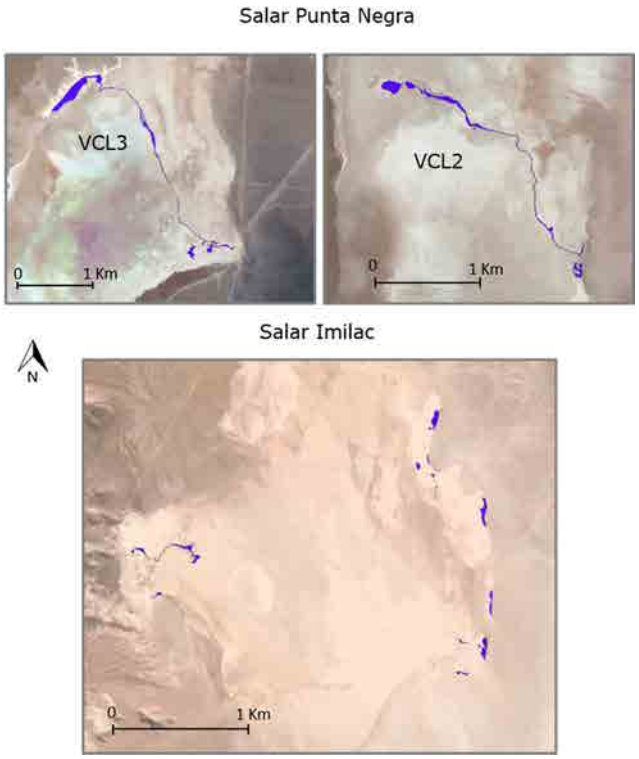


Figura 5-39. Ubicación de las lagunas en salar es de Punta Negra y salar de Imilac. Fuente: elaboración propia.

Salar	Sector	Superficie (m^2)
Salar de Imilac	Salar SO	38.627
Salar Punta Negra	VCL2	64.098
	VCL3	216.400

Tabla 5-28. Superficie de lámina libre para cada sector de lagunas. Fuente: elaboración propia.

Finalmente se cuantificó la evaporación desde aguas superficiales a partir de la multiplicación de estas variables, resumidas en la **Ecuación 5-2**.

A continuación en la **Tabla 5-29** se muestran los resultados del cálculo realizado para la estimación de la evaporación desde lámina libre de los cuerpos de agua tanto del salar de Punta Negra como del salar de Imilac. El valor total puede variar durante el año debido a las variaciones en la superficie de las lagunas. No obstante, estas variaciones, según experiencia del consultor, no tendrían un efecto muy significativo sobre el resultado total de evaporación ya que la principal salida por evaporación se da desde agua subterránea (aprox. un 90% del total evaporado).

Salar	Sector	Superficie (m^2)	Et (m^3/d)	Et (L/s)	**Total Et (L/s)**
Salar de Imilac	Salar SO	38.627	221,9	2,57	**21.22**
Salar Puna Negra	VCL2	64.098	368,3	4,26	
	VCL3	216.400	1243,4	14,39	

*Datos utilizados: Ks = 0,9; K_e= 0,7; EP_0 = 9,1 mm/d.

Tabla 5-29. Cálculo de la evaporación desde lámina libre en los salares de Punta Negra e Imilac. Fuente: elaboración propia.

5.4.3.2 EVAPORACIÓN DESDE AGUA SUBTERRÁNEA

La evaporación que se produce en cuencas endorreicas se da principalmente desde los cuerpos de agua subterránea. Este tipo de cuencas al presentar en su zona más deprimida un salar donde el nivel freático generalmente se encuentra a poca profundidad, presentan áreas muy extensas con altas tasas de evaporación. Estudios realizados en cuencas vecinas como es el caso del Salar de Atacama muestran que la evaporación es la mayor descarga que se produce en la cuenca (Mardones, 1998; SGA, 2015).

MÉTODO DE CÁLCULO

La evaporación desde el agua subterránea se calcula a partir de dos elementos. Por un lado las curvas de evaporación versus profundidad del nivel freático (N.F.) y, por otro, la distribución espacial de profundidad del nivel freático en el área de interés.

De este modo, la evaporación desde el agua subterránea se calculará como el producto de ambos elementos, como se expresa en la **Ecuación 5-3**:

$$E_N = E(z) \cdot A(z) \qquad \text{Ecuación 5-3}$$

Donde,

E_N: evaporación desde napa *[L^3/T]*

$E(z)$: evaporación en función de la profundidad del nivel freático *[L/T]*

$A(z)$: área del nivel freático a profundidad z *[L^2]*

Las curvas de evaporación versus profundidad del suelo se han construido a partir de las mediciones realizadas con el lisímetro. Los lisímetros miden la evaporación que se produce a partir del descenso que registra el transductor de presión. Asumiendo que el descenso se produce por igual tanto en el tanque de carga como en el tanque de ensayo (**Anexo 4 Variables Hidrometeorológicas**), el descenso producido será 1 por la porosidad del tanque de ensayo. El descenso depende directamente de las condiciones atmosféricas y de la profundidad del nivel freático y nos entregará un valor de tasa de evaporación que variará según ambas condiciones.

Diversos autores han descrito este mismo fenómeno como se observa en la gráfica presentada por DGA 2009.



Figura 5-40. Curvas de evaporación en función de la profundidad de extinción. Fuente: DGA 2009.

Harbaugh *et al.,* (1998) presentó un descenso lineal de la evaporación vs la profundidad mientras que el resto de autores (Philip, 1957); (Morel-Seytoux *et al.,* 1989); (Grilli & Vidal, 1986), (Gardeweg *et al.*, 1993) muestran un descenso exponencial. Algunos autores coinciden en que la profundidad de extinción, conocida como la profundidad a partir de la cual no se produce evaporación, está en torno a los 2 metros. Por contra las curvas exponenciales muestran como en los primeros 50 cm es donde se produce la mayor tasa de evaporación, la fiabilidad del ajuste dependerá de la cantidad y calidad de los datos de que se disponga. Una mayor cantidad de puntos producirá una mejor curva, no obstante, un suelo muy heterogéneo inducirá una mayor dispersión en los datos disponibles para su construcción. Por otro lado, graficar sobre la misma curva valores medidos en diferentes épocas del año nos entregará resultados erróneos. Para una misma profundidad del nivel freático, la tasa de evaporación varía durante el año debido a las condiciones climáticas y con ello la curva tasa de evaporación vs profundidad del nivel.

Hay que notar que en el cálculo de E_N (**Ecuación 5-3**) no se ha incluido expresamente el efecto de la densidad sobre la evaporación, dado que los datos tomados ya la tienen en cuenta. Es decir, los lisímetros instalados durante la ejecución del proyecto son llenados con agua de la propia zona, respetando su densidad. No obstante, si los datos extraídos del lisímetro se utilizan para calcular la evaporación en otro punto, debe ajustarse la curva para la densidad actual.

SUPERFÍCIES DE EVAPORACIÓN

Tal y como se ha explicado en el punto anterior, las tasas de evaporación calculadas deben extrapolarse a toda el área de estudio para así estimar el total evaporado en la cuenca. Dado que únicamente en los salares encontramos profundidades del nivel freático menores a la profundidad de extinción, es en estas zonas donde se ha realizado el cálculo.

Para extrapolar los datos medidos, se han zonificado los sectores de evaporación según información levantada en terreno y criterios geomorfológicos.

En el salar de Punta Negra se mide la profundidad del nivel freático a lo largo de un perfil Este-Oeste en la misma ubicación donde se encuentra actualmente el lisímetro. A partir de los datos levantados en terreno, se calculó el gradiente piezométrico y se cruzó con la topografía para estimar la profundidad del nivel freático. Este proceso se realizó en varios puntos del margen confeccionando un mapa donde se zonificaron 5 sectores con un valor de profundidad del nivel freático y densidad para cada uno. Para estimar la distribución de la densidad, se asignó un valor a cada sector teniendo en cuenta la evolución natural de las aguas que se produce desde el acuífero aluvial hasta el núcleo, pasando de 1,00 g/cm^3 a 1,23 g/cm^3 aproximadamente.

El núcleo del salar de Punta Negra se ha interpretado de forma diferente al margen. Según Mardones (1998), el núcleo del salar de Atacama está formado en su parte superior por una costra de NaCl que en cierto modo aísla parcialmente el acuífero de las condiciones atmosférica, otorgándole tasas de evaporación más pequeñas respecto al resto. La costra del margen del salar, con una composición carbonatada y sulfatada, es químicamente diferente a la del núcleo de NaCl respondiendo a una vía evolutiva definida por Risacher *et al.* (1999). Este tipo de vías evolutivas están definidas para cuencas endorreicas donde dominan los procesos de evaporación dando lugar a la formación de salares. No se conoce con certeza si el núcleo del salar de Punta Negra funcionaría del mismo modo, pero dado que tiene la misma composición química que el salar de Atacama (Costra de cloruros seca y dura según Gardeweg *et al.* (1993)) se ha atribuido el valor de tasa de evaporación que presentó la empresa Rockwood Lithium para el EIA y que fue aprobado por la Dirección General de Aguas. No se ha utilizado el valor de tasa de evaporación propuesto por Mardones (1999), al no presentar en su tesis doctoral cuál fue la metodología empleada para el cálculo de la evaporación.

A continuación en la **Figura 5-41** se muestra la distribución espacial de los sectores mencionados en el párrafo anterior y en la **Tabla 5-30** los valores de área, profundidad del nivel y densidad correspondiente a cada uno.

Sector	Tipo	Área (m^2)	Profundidad N.F. (m)	Densidad (g/cm^3)
SP_1	Margen E	27.136.270	0,50	1,18
SP_2	Margen E	22.775.420	0,70	1,15
SP_3	Margen E	15.474.992	0,85	1,10
SP_4	Margen E	21.561.166	1,10	1,05
SP_5	Margen E	3.097.781	1,85	1,00
SP_6	Núcleo	134.735.499	0.77	0,50

Tabla 5-30. Valores de área, profundidad del nivel y densidad del agua correspondiente a cada uno de los sectores del salar de Punta Negra. Fuente: elaboración propia.

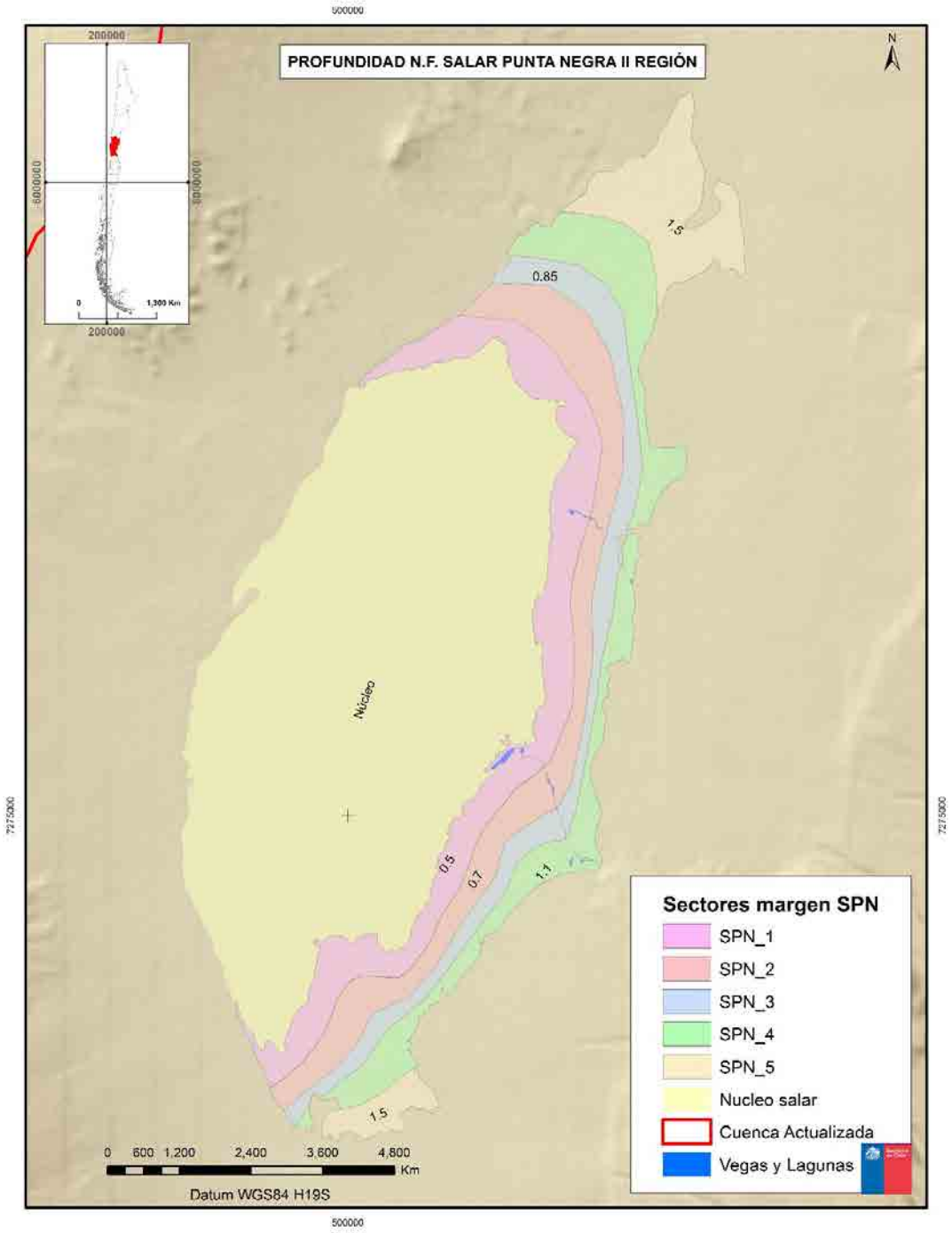


Figura 5-41. Mapa con la distribución espacial de los sectores con igual profundidad del nivel, densidad en el salar de Punta Negra. Fuente: elaboración propia.

El salar de Imilac al estar formado por tres salares, cada salar se zonificó de forma independiente. El salar SO se zonificó en base a los datos levantados en terreno durante la instalación del lisímetro dando un valor de profundidad del nivel medio de 0,7 m excepto en las zonas aledañas a las lagunas zona la profundidad del nivel media se estimó en 0,4 m. Para el caso del salar central se utilizó el mismo criterio que en el salar de Punta Negra.

A partir de datos de profundidad del nivel freático medidos en la zona norte y de los resultados obtenido del perfil de NANOTEM que cruza la parte sur del salar, se estimó un gradiente piezométrico y se cruzó con la topografía para estimar la profundidad del nivel.

Por último, dada la falta de información al noroeste del salar, se le asignó una distribución de profundidad del nivel freático según criterios geomorfológicos. En la zona más deprimida donde se observa la formación de costras de evaporación, se le otorgó un valor de profundidad del nivel de 0,7 m, mientras que al resto, un valor de 1,5 m.

A continuación en la **Figura 5-42** se muestra la distribución espacial de los sectores mencionado en el párrafo anterior y en la **Tabla 5-31** los valores de área, profundidad del nivel y densidad correspondiente a cada uno.

Salar	Sector	Área (m^2)	Profundidad N.F. (m)	Densidad (g/cm^3)
Salar SO	SI_1	902.295	0,4	1,10
	SI_2	6.740.254	0,7	1,21
Salar central	SI_3	14.379.921	2,0	1,01
	SI_4	704.058	1,7	1,03
	SI_5	468.498	1,4	1,05
	SI_6	698.993	1,0	1,12
	SI_7	732.979	0,7	1,18
Salar NO	SI_8	732.979	0,7	1,18
	SI_9	2.551.228	1,5	1,10

Tabla 5-31. Valores de área, profundidad del nivel y densidad del agua correspondiente a cada uno de los sectores en el salar de Imilac. Fuente: elaboración propia.

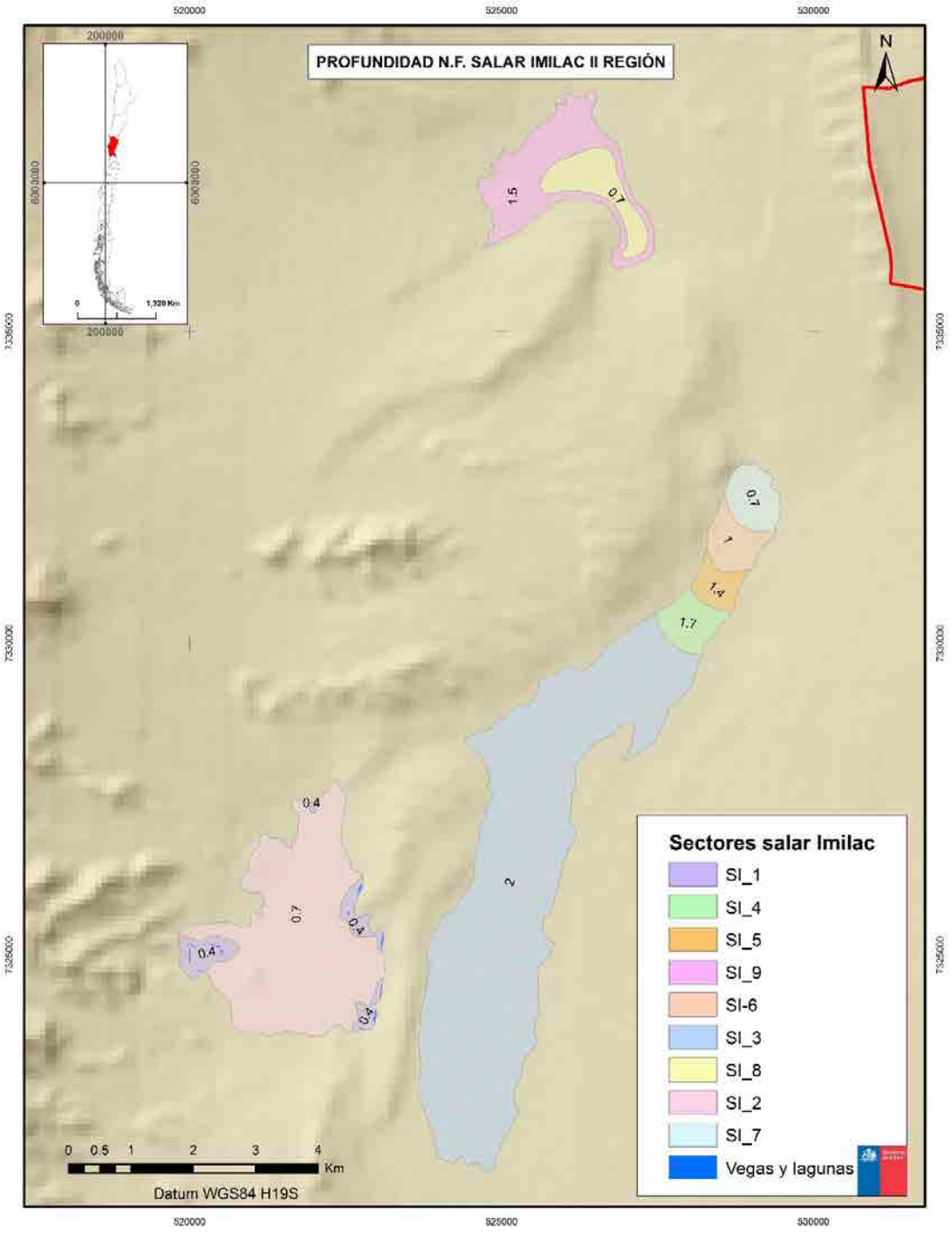


Figura 5-42. Mapa con la distribución espacial de los sectores con igual profundidad del nivel, densidad en el salar de Imilac. Fuente: elaboración propia.

CÁLCULO DE LA EVAPORACIÓN

La tasa de evaporación desde aguas subterráneas se va a medir utilizando los lisímetros instalados en terreno tanto en el salar de Punta Negra como en el salar de Imilac, su ubicación se muestra en la **Figura 5-43**. A partir de los datos proporcionados por los lisímetros se ha construido una curva para el salar de Punta Negra y otra para el salar de Imilac. A la fecha de este informe se dispone de datos de medición de evaporación correspondientes a tres meses por lo que las curvas contienen pocos puntos.

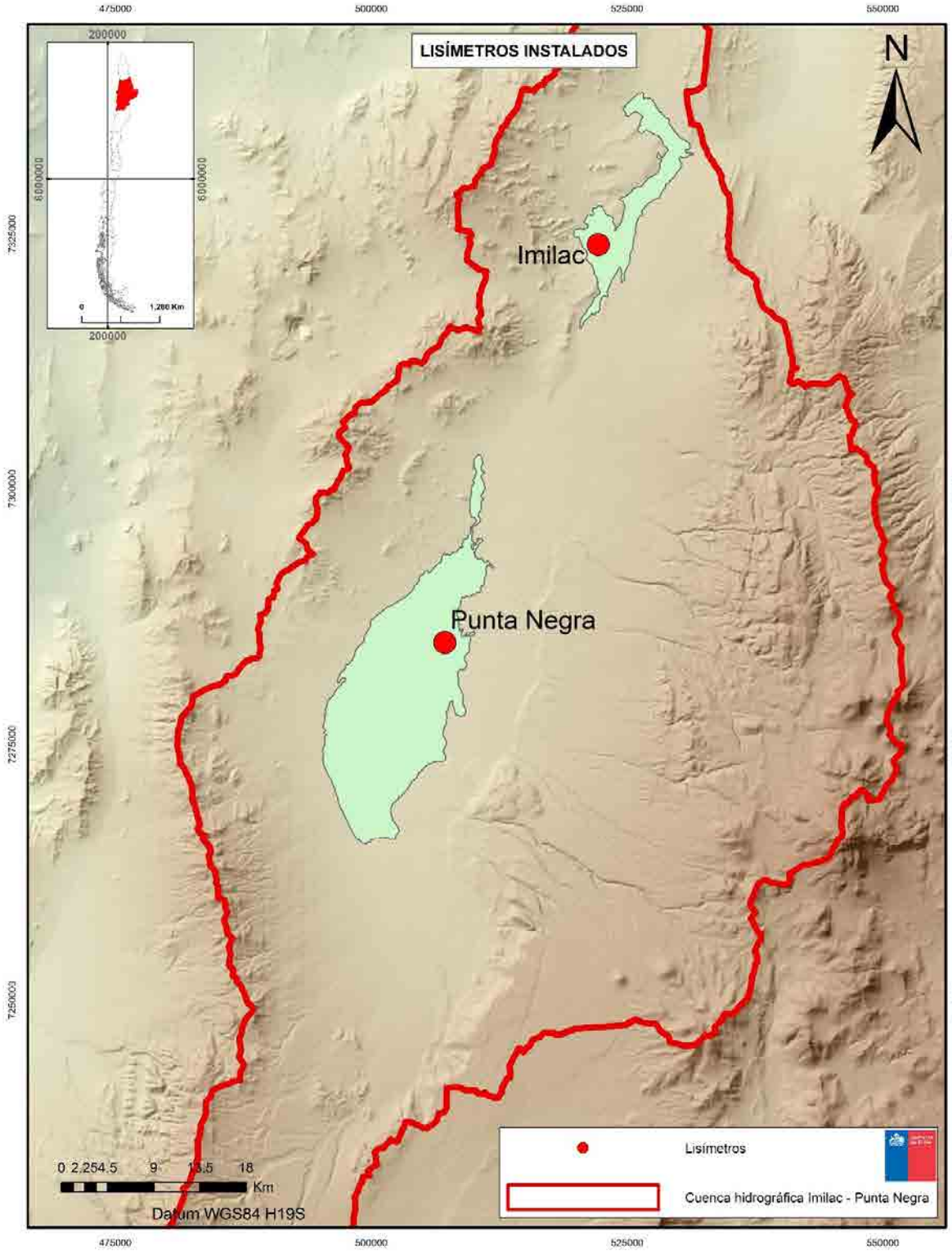


Figura 5-43. Ubicación de los lisímetros de carga variable instalados en terreno. Fuente: Elaboración Propia.

A continuación, en la **Figura 5-44** se presenta la curva de tasa de evaporación vs profundidad del nivel freático con los datos obtenidos en el lisímetro instalado en el salar de Punta Negra. La porosidad utilizada para la obtención de la tasa de evaporación es de 15%, ésta fue obtenida durante el llenado del tanque de ensayo.

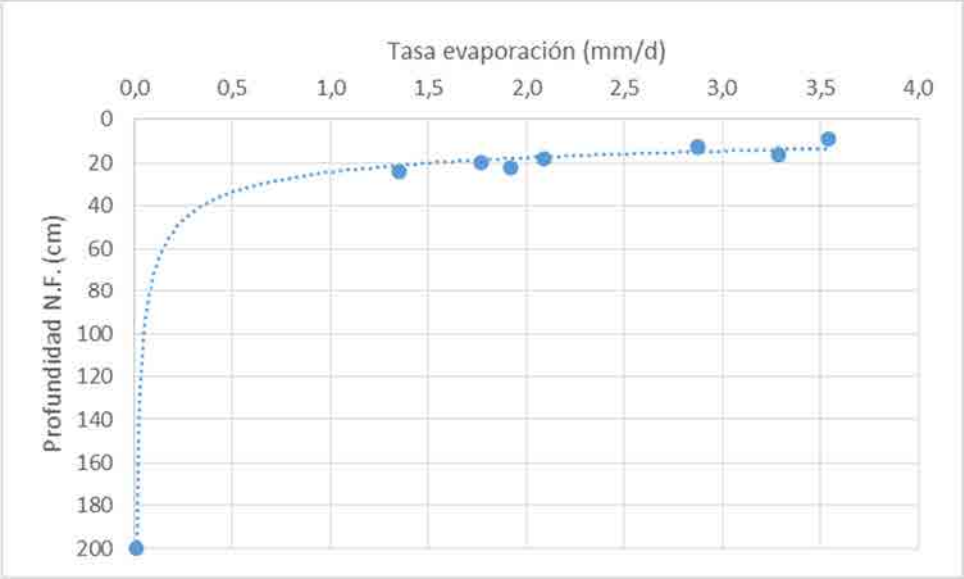


Figura 5-44. Curva realizada en base a los datos medidos con el lisímetro instalado en el salar de Punta Negra. Fuente: elaboración propia.

Esta curva muestra la tasa de evaporación vs profundidad del nivel freático para unas condiciones de densidad del agua de 1,15 g/cm^3 medidas en terreno (Anexo 4, archivos digitales). Para calcular cual sería la tasa de evaporación en los diferentes sectores del salar de Punta Negra (**Figura 5-41**) debemos corregir la curva para las diferentes densidades. Una vez corregida, se mide la tasa de evaporación para la profundidad del nivel en cada sector y se multiplica por el área correspondiente.

Del mismo modo, en el salar de Imilac se ha construido la curva de tasa de evaporación vs profundidad del nivel freático y se ha extrapolado al resto de zonas mediante la corrección por densidad. En la **Figura 5-45** se muestra la curva tipo construida a partir de los datos de terreno (Anexo 4, archivos digitales) para una densidad de 1,22 g/cm^3 medidos en campo. Ésta contiene menos puntos que la anterior puesto que el descenso producido en el lisímetro fue menor que en el salar de Punta Negra y únicamente se pudo estimar la tasa de evaporación para dos periodos de tiempo. La porosidad utilizada para la obtención de la tasa de evaporación es de 13%, ésta fue obtenida durante el llenado del tanque de ensayo.

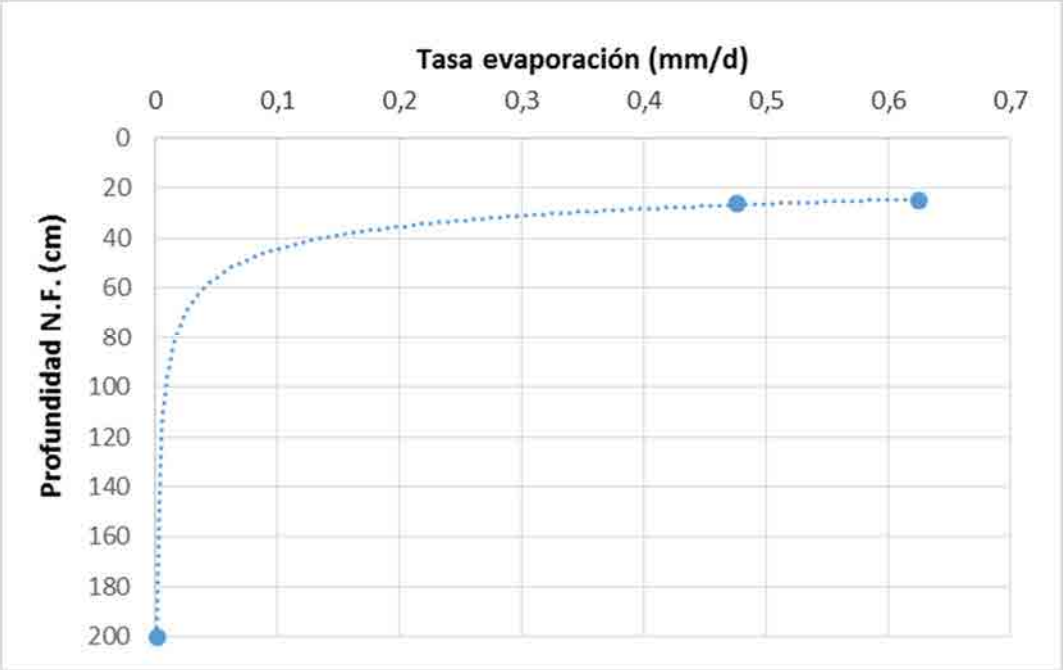


Figura 5-45. Curva realizada en base a los datos medidos con el lisímetro instalado en el salar de Imilac para una densidad de 1,22 g/cm^3. Fuente: elaboración propia.

Para el cálculo de la tasa de evaporación en el núcleo del salar de Punta Negra, se ha utilizado la tasa de evaporación propuesta por SGA (SGA, 2015) dadas las similitudes químicas de las costras salinas. La tasa de evaporación propuesta es de 0,058 mm/d. No se ha utilizado la misma metodología que para el margen ya que, como se ha comentado en el inicio del numeral, se estima que el núcleo tiene características geológicas distintas, otorgando según Mardones (Mardones, 1998) tasas de evaporación inferiores a las registradas en el margen. Se ha escogido la tasa de evaporación calculada por SGA (SGA, 2015) en vez de la presentada por Mardones (0,0055 mm/d) (Mardones, 1998), al presentar datos más recientes y argumentados en base a mediciones realizadas en terreno.

A continuación, en la **Tabla 5-32** se muestran los resultados de evaporación calculados en el salar de Punta Negra. De igual forma en la **Tabla 5-33** se muestran los resultados calculados para el salar de Imilac. Los gráficos correspondientes a los cálculos se presentan en el **Anexo 4 Variables Hidrometeorológicas**.

Sector	Tipo	Área (m^2)	Profundidad N.F. (m)	Densidad (g/cm^3)	K_s	Tasa evaporación (mm/d)	Total tasa evaporación (L/s)
SP_1	Margen E	27.136.270,1	0,50	1,18	0,65	0,20	62,8
SP_2	Margen E	22.775.420,4	0,70	1,15	0,74	0,11	29,0
SP_3	Margen E	15.474.992,0	0,85	1,10	0,85	0,08	14,3
SP_4	Margen E	21.561.166,5	1,10	1,05	0,93	0,05	12,5
SP_5	Margen E	3.097.781,7	1,85	1,00	1,00	0,02	0,7
SP_6	Núcleo	134.735.499,0	0,67	1,23	0,50	0,058	90,4
						Total (L/s)	**209,5**

Tabla 5-32. Resultados de evaporación calculados en el salar de Punta Negra. Fuente: elaboración propia.

Salar	Sector	Área (m2)	Profundidad N.F. (m)	Densidad (g/cm3)	K_s	Tasa evaporación (mm/d)	Total tasa evaporación (L/s)
Salar SO	SI_1	902294,6	0,4	1,1	0,85	0,220	2,30
	SI_2	6740253,5	0,7	1,21	0,60	0,030	2,34
Salar Central	SI_3	14379921,0	2,0	1,01	1,00	0	0
	SI_4	704057,8	1,7	1,03	0,98	0,004	0,03
	SI_5	468498,3	1,4	1,05	0,93	0,005	0,03
	SI_6	698993,0	1,0	1,12	0,80	0,012	0,10
	SI_7	732979,3	0,7	1,18	0,65	0,030	0,25
Salar NO	SI_8	732979,3	0,7	1,18	0,65	0,030	0,25
	SI_9	2551227,6	1,5	1,10	0,85	0,004	0,12
						Total (L/s)	**5,4**

Tabla 5-33. Resultados de evaporación calculados en el salar de Imilac. Fuente: elaboración propia.

Según se observa en la **Tabla 5-32** y **Tabla 5-33**, en la zona e estudio evaporaría desde el nivel freático un total de **214,9 L/s** de los cuales 209,5 L/s corresponderían al salar de Punta Negra y 5,4 L/s al salar de Imilac. Tal y como se ha comentado al principio de esta sección estos resultados son preliminares a la espera de obtener un mejor ajuste de las curvas con la llegada de nuevos datos.

Para concluir, en la **Tabla 5-34** se muestra el total evaporado en las cuencas del salar de Punta Negra y salar de Imilac resultado de la suma de la evaporación desde lámina libre y desde aguas subterráneas. La tasa de evaporación total calculada para la zona de estudio sería de **236 L/s**.

Tipo evaporación	Salar	Área (Km^2)	Total tasa evaporación (L/s)
Lámina libre	Punta Negra	0,28	18,6
	Imilac	0,04	2,5
Aguas subterráneas	Punta Negra	224,78	209,7
	Imilac	27,91	5,4
		Total (L/s)	**236**

Tabla 5-34. Total tasa de evaporación calculada para las cuencas del salar de Punta Negra y salar de Imilac. Fuente: elaboración propia.

5.5 CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA

La cuenca de estudio (Salar Imilac-Punta Negra) se compone de dos salares de similares características desde el punto de vista de la génesis, y por tanto, también desde el punto de vista geológico, no obstante, conforman geometrías y espesores acuíferos distintos.

Ambos salares, ubicados en una depresión de origen tectónico entre la cordillera Andina y la cordillera de Domeyko, se formaron a partir de los continuos procesos de evaporación que tienen lugar en la zona más deprimida de la cuenca. Dicha cuenca está controlada por fallas normales de dirección preferencial N-S, con componentes secundarios SE-NO. Alrededor del salar de Punta Negra se generó una planicie casi horizontal de estratos de arcilla y arenas irregularmente depositadas.

En el sector norte del salar afloran rocas paleozoicas volcanoclásticas y depósitos coluviales y aluviales antiguos, intercalados con afloramientos graníticos terciarios.

La zona del salar propiamente tal, se encuentra rellena de sedimentos terciarios y cuaternarios incluyendo los depósitos de sulfatos y cloruros de su interior, que se espacializan como sedimentos muy finos mezclados con capas salinas, que en general sin material grueso excepto algunas lenguas de conglomerados con materiales clásticos gruesos. Al este de la cuenca, existen rocas efusivas y al oeste sedimentos, rocas ígneas y volcánicas pre-terciarias.

Se presenta a continuación una descripción de las unidades geológicas incluidas en la cuenca salar de Imilac-Punta Negra (Gardeweg *et al.,* 1994). En la **Figura 5-46** se muestra la distribución espacial de los materiales que se describen a continuación.

5.5.1 PALEOZOICO

El Paleozoico está representado principalmente por granitos y granitoides, es decir, rocas intrusivas que conforman el basamento de los niveles acuíferos de la zona de estudio. Asimismo, las unidades correspondientes a este periodo geológico que se localizan dentro de la cuenca del Salar de Imilac-Punta Negra son las siguientes:

Granitoides (Pzgd)

Asignados al Carbonífero Superior – Pérmico, estos granitoides incluyen granodioritas, dioritas, granitos y gabros con variedades porfídicas dioríticas y graníticas; incluye también variedades melanocráticas a leucocráticas; localmente muestran inclusiones básicas oscura de granulometría fina. Se encuentran cortados por filones aplíticos rosados a verdosos y andesíticos dacíticos grises oscuros a verdosos. A esta formación se le asocian yacimientos de cobre vetiformes y de chimenea o brechas en la cordillera de Domeyko. Se han datado edades para este intrusivo (K-Ar en biotita) de 279 ± 7 Ma y en muscovita de 598 ± 7 Ma. En la zona de estudio, los vemos aflorar en la cordillera de Domeyco (al oeste del Salar de Imilac) y en la zona centro-este de la cuenca, es decir, al noreste del Salar de Punta Negra. Estos materiales intruyen a la formación La Tabla (Pzlt).

Formación La Tabla (Pzlt)

Asignada al Carbonífero Superior – Pérmico, esta formación se sitúa en el sector central del área de estudio y está rodeando al intrusivo detallado con anterioridad, además de ser la causante de los únicos relieves positivos al norte del área de estudio (como el cerro del Muerto) por sobre los rellenos terciarios.

Está formada por una secuencia continental volcanoclástica integrada predominante-mente por rocas volcánicas silícea, donde en una relación de engrane, se reconocen facies de lavas, brechas y aglomerados andesíticos a basálticos, con intercalaciones de tobas y volcarenitas. Presenta escasa intercalaciones de calizas y tobas soldadas riodacíticas, predominando en la base de la Sierra de Almeyda.

Pórfidos riolíticos (Pzrr-Pzrv)

Intrusivo hipabisal del Carbonífero-Pérmico, compuesto por pórfidos riolíticos rojos, algunos con biotita (Pzrr) y pórfidos riolíticos a dacíticos de biotita, gris verdosos (Pzrv). Afloran en la zona sur y suroeste de la cuenca de estudio.

Formación Zorritas (Pzz)

Perteneciente al Devónico-Carbonífero inferior. Se trata de una secuencia fosilífera marina, bien estratificada, constituida por una alternancia de cuarzoarenitas, arenitas y limolitas cuarzomicáceas con cemento silíceo y con algunos niveles con estratificación cruzada y figuras de carga. Escasas intercalaciones de conglomerados con fragmentos de volcanitas,

metasedimentitas, cuarzo y otros. Contiene braquiópodos, trazas fósiles, conularios, bivalvos, gasterópodos y equinodermos.

5.5.2 MESOZOICO

Pertenecientes al mesozoico se encuentran materiales triásicos, esencialmente volcánicos con intercalaciones continentales subordinadas y granitoides; jurásicos en menor medida, con facies marinas y sedimentarias continentales; y cretácicos, con facies marinas, en su parte inferior, para luego transformarse en un ambiente volcánico-continental que resulta similar al que se desarrolla durante el Terciario y Cuaternario. Las formaciones mesozoicas que constituyen la zona de estudio son las siguientes:

Estratos Cerro Guanaco (Trcg)

Lavas y brechas andesíticas y dacíticas de color verdoso. Triásico.

Granitoides (Trmd)

Granitoides del Triásico superior, correspondientes a micromonzodioritas con fenocristales de anfibolita y, en menor proporción, granodioritas y localmente, tonalitas y monzogranitos, surcados por filones riolíticos. Aflora exclusivamente en Sierra de Imilac.

Formación El Profeta (Tr-Jp)

Calizas, areniscas y lutitas calcáreas, con niveles yesíferos; abundante fauna fósil marina (Triásico Superior-Jurásico Superior). Conglomerados, brechas sedimentarias, areniscas y lutitas, con flora fósil y fauna fósil marina (Triásico Superior-Jurásico inferior).

Formación Santa Ana (Ksa)

Areniscas y lutitas pardo-rojizas, verdes, pardas claras, con escasa flora fósil y fauna fósil marina. En el extremo norte y oeste de la Cordillera de Domeyko, conglomerados areniscas, tobas, lavas y escasas intercalaciones calcáreas (Jurásico Superior- Neocomiano).

Grupo Purilactis (K-Tp)

Secuencia sedimentaria clástica continental del Cretácico superior-Eoceno, de color beige, gris y rojizo; formado por una alternancia de conglomerados gruesos a finos y gravas polimicticas que incluyen fragmentos de calizas fosilíferas del Jurásico, medianamente

consolidadas, con areniscas y lentes de limolita; base mejor consolidada de areniscas rojas con lentes de limolita y conglomerados.

5.5.3 CENOZOICO

En el cenozoico se encuentran principalmente rocas sedimentarias consolidadas y no consolidadas, así como depósitos de lavas y piroclastos e ignimbritas.

Formación Pampa de Mulas (Tpm)

Oligoceno superior-Mioceno inferior. Compuesto por gravas, paraconglomerados y areniscas, débilmente consolidadas, de mala estratificación, con intercalaciones de ceniza volcánica e ignimbritas.

Ignimbritas de Quebrada de Las Zorras y Tocomar (Tzt)

Del Oligoceno superior-Mioceno inferior, se trata de una secuencia de cinco depósitos de flujos piroclásticos débil a medianamente soldados, de pequeño volumen, con intercalaciones de gravas cuya potencia aumenta hacia el oeste (Tpm); ignimbritas dacíticas a riolíticas con lentes de grandes pómez, que ocasionalmente muestran notables lentes de biotita.

Ignimbritas de Rio Frío (Trf)

Flujos de tobas soldadas de cristales de color rosado (Mioceno inferior).

Cerros altos de Tocomar (Mimv)

Remanente de centro volcánico de superficies redondeadas, formadas por dacitas sin rasgos de coladas, truncado al E por Falla Qda. Aguas Calientes y parcialmente cubierto por depósitos de avalancha del volcán Llullaillaco.

Ignimbritas de Quebrada Guanaqueros (Msg)

Mioceno superior. Flujos piroclásticos débilmente a no consolidados, de pequeño volumen asociados al volcán Cerro Guanaqueros; incluye intercalaciones métricas de gravas cuya potencia aumenta hacia el norte (Tal); ignimbritas dacíticas ricas en pómez, comúnmente concentradas en lentes y en el techo de los flujos y , con líticos polimícticos; un depósito de lapilli de caída y escasos depósitos de bloques y cenizas.

Volcanes del Mioceno superior (Msv)

Conos volcánicos de características morfológicas variables en función del volcán, compuestos por lavas, dacitas, andesitas, etc.

Depósitos aluviales y coluviales antiguos (Tal)

Mioceno superior-Plioceno. Gravas mal estratificadas con lentes de arena y limos e intercalaciones de ceniza volcánica. Forman depósitos aterrazados, de pie de monte y corrientes de barro, mal consolidados, disecados por la erosión actual. En zonas de falla, localmente, están cementadas por carbonatos y presentan niveles de travertino; en Quebrada Guanaqueros incluyen intercalaciones de ignimbritas (Msg).

Volcanes Pliocenos (Plv)

Conos volcánicos de características morfológicas variables según el volcán.

5.5.4 CUATERNARIO

El cuaternario presenta depósitos aluviales y coluviales, volcánicos y materiales salinos procedentes de la evaporación en la parte baja de la cuenca (sulfatos, cloruros, etc.).

Volcán Llullaillaco (Qv)

Estrato-volcán mixto y compuesto constituido por una unidad antigua, medianamente erosionada, truncada en el flanco SE por el colapso parcial del edificio, con remanentes de coladas en bloque y columnares y un cono construido sobre el anfiteatro de colapso constituido por un conjunto de lavas, domos y lavas acanaladas en bloque, ben conservadas, postglaciales.

Depósitos aluviales y coluviales modernos (Qal)

Gravas con clastos angulosos, arenas y limos del Pleistoceno-Holoceno (Cuaternario). Forman escombros de faldas, abanicos aluviales y depósitos de poco espesor en quebradas de fondo plano.

Salares:

Materiales evaporíticos y detríticos salinos que ocupan las partes bajas de la cuenca formando los salares de Imilac y Punta negra.

- Sulfatos (Q S)
- Sulfatos y Cloruros (Q S-Cl)
- Cloruros y Sulfatos (Q Cl-S)
- Limos salinos (Q LimS)
- Sulfatos y limos (Q S y L)

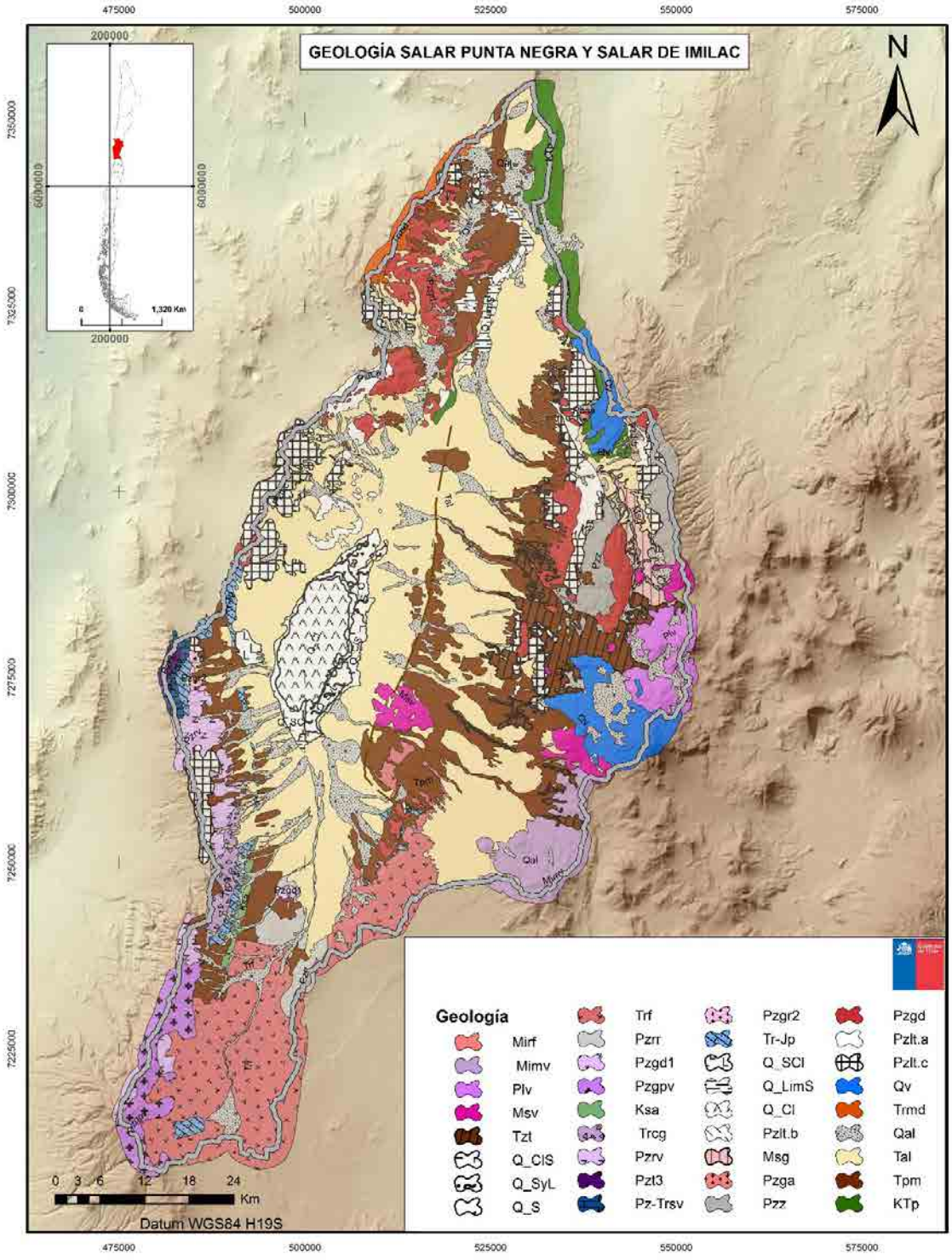


Figura 5-46. Geología del Salar de Punta Negra y Salar de Imilac. Fuente: modificado de Gardeweg et al., 1994.

5.6 CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA

Durante el mes de Mayo de 2016 se realizó una campaña de geofísica en las cuencas del salar de Punta negra y salar de Imilac la cual tuvo como objetivo caracterizar hidrogeológicamente el acuífero aluvial.

En la cuenca del salar de Punta Negra se realizaron un total de 7 perfiles TEM, 3 perfiles NanoTEM y un perfil gravimétrico sumando un total de 35 puntos TEM y 46 puntos de gravimetría. En la cuenca del salar de Imilac fueron 5 perfiles TEM, 1 perfiles NanoTEM y un perfil gravimétrico sumando un total de 22 puntos TEM y 14 puntos de gravimetría.

El método de transiente electromagnético (TEM) se utilizó con el objetivo de definir la superficie freática, la geometría de la cuña salina (NanoTEM) y el contacto entre los depósitos aluviales y el método de gravimetría para definir la geometría del basamento.

En el **Anexo 6 Geofísica** se presenta el informe realizado por la empresa Geodatos donde se explican los métodos utilizados además de los resultados observados. La interpretación hidrogeológica de los resultados se describe en los numerales de geometría y piezometría que se muestran a continuación.

En la **Figura 5-47** se presenta la ubicación de los perfiles realizados en la cuenca del salar de Punta Negra y en la **Figura 5-48** la ubicación de los perfiles realizados en la cuenca del salar de Imilac.

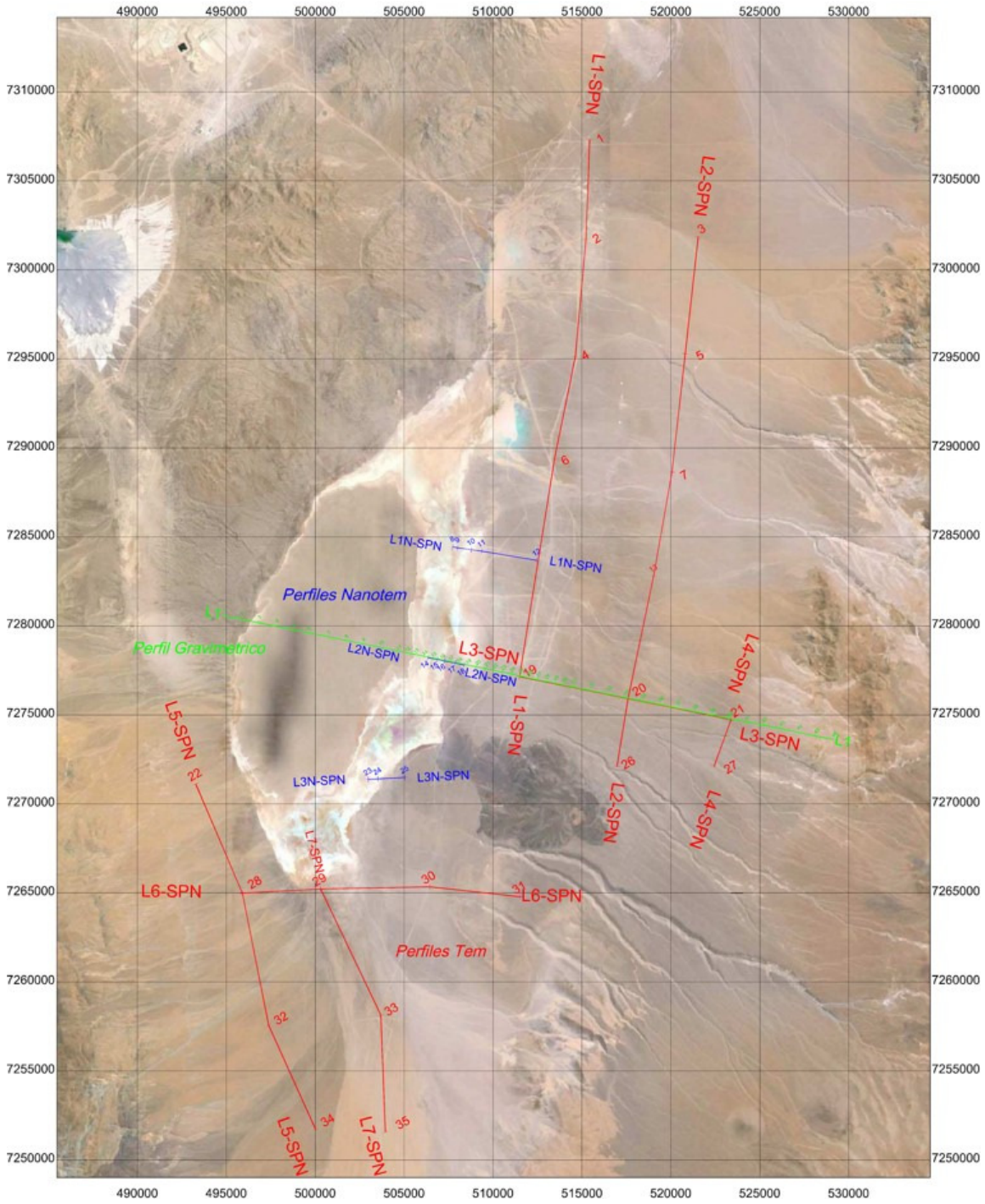


Figura 5-47. Ubicación de los perfiles realizados en la cuenca del salar de Punta Negra. Fuente: Geodatos.

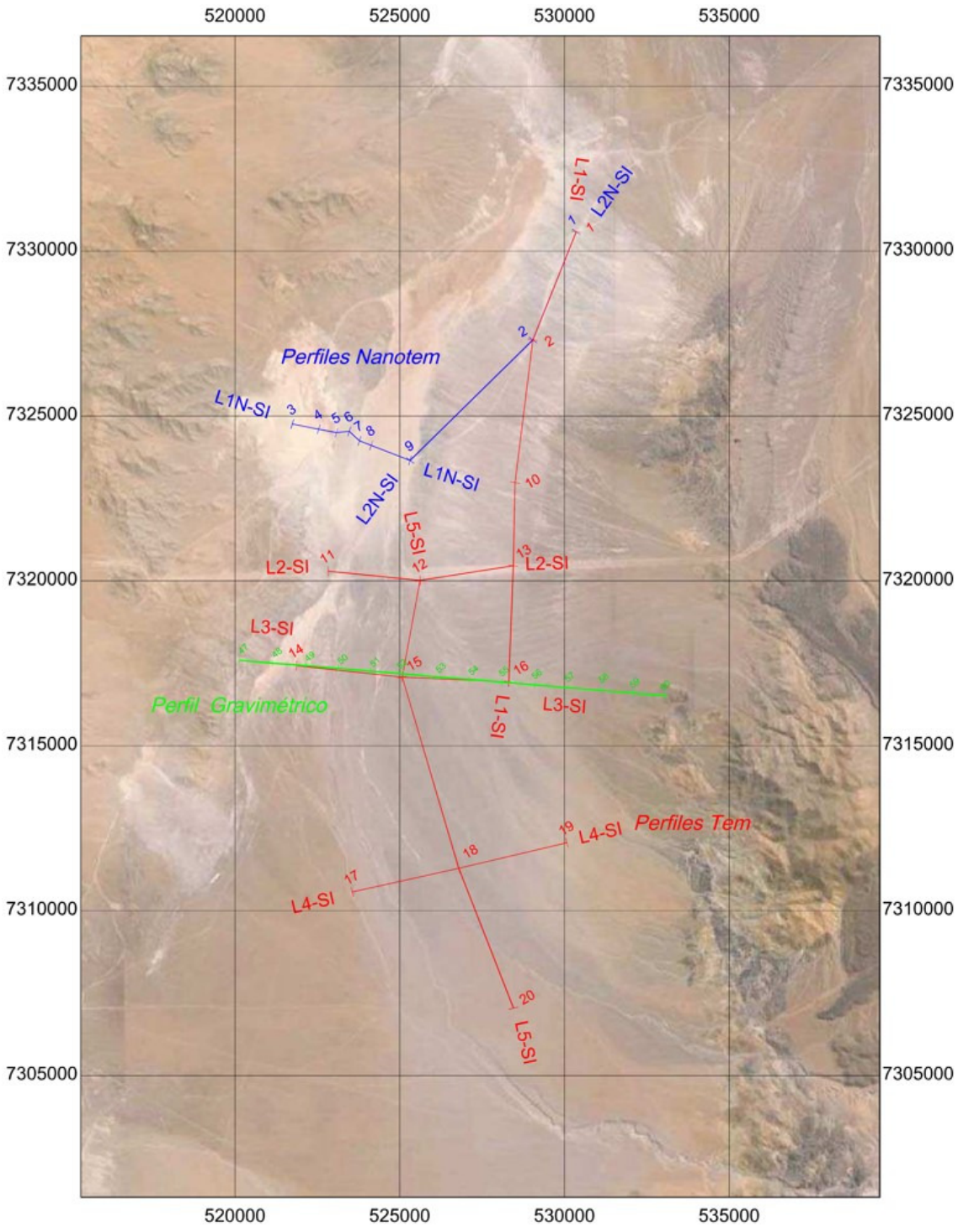


Figura 5-48. Ubicación de los perfiles realizados en el salar de Imilac. Fuente: Geodatos.

Los dos perfiles gravimétricos se realizaron con el objetivo de conocer la geometría del basamento. A partir de los perfiles se ha determinado que para la cuenca del salar de Punta Negra, el espesor de relleno sedimentario en su parte central es de unos 1.000 m (**Figura 5-49**). Por su parte en el salar de Imilac, la profundidad observada en la sección seleccionada fue de 400 m (**Figura 5-50**).

Los perfiles TEM se utilizaron para conocer la profundidad del nivel freático en diferentes puntos y de esta forma poder generar un mapa piezométrico el cual se describe en la siguiente sección. En los perfiles no se pudo reconocer el basamento, éste se encuentra a mucha profundidad y la señal emitida con el método TEM se pierde antes de llegar al basamento.

No obstante, los resultados obtenidos, muestran un contraste bien definido entre depósitos no saturados y depósitos saturados pudiendo definir con claridad la superficie piezométrica tal y como se observa en la **Figura 5-51**.

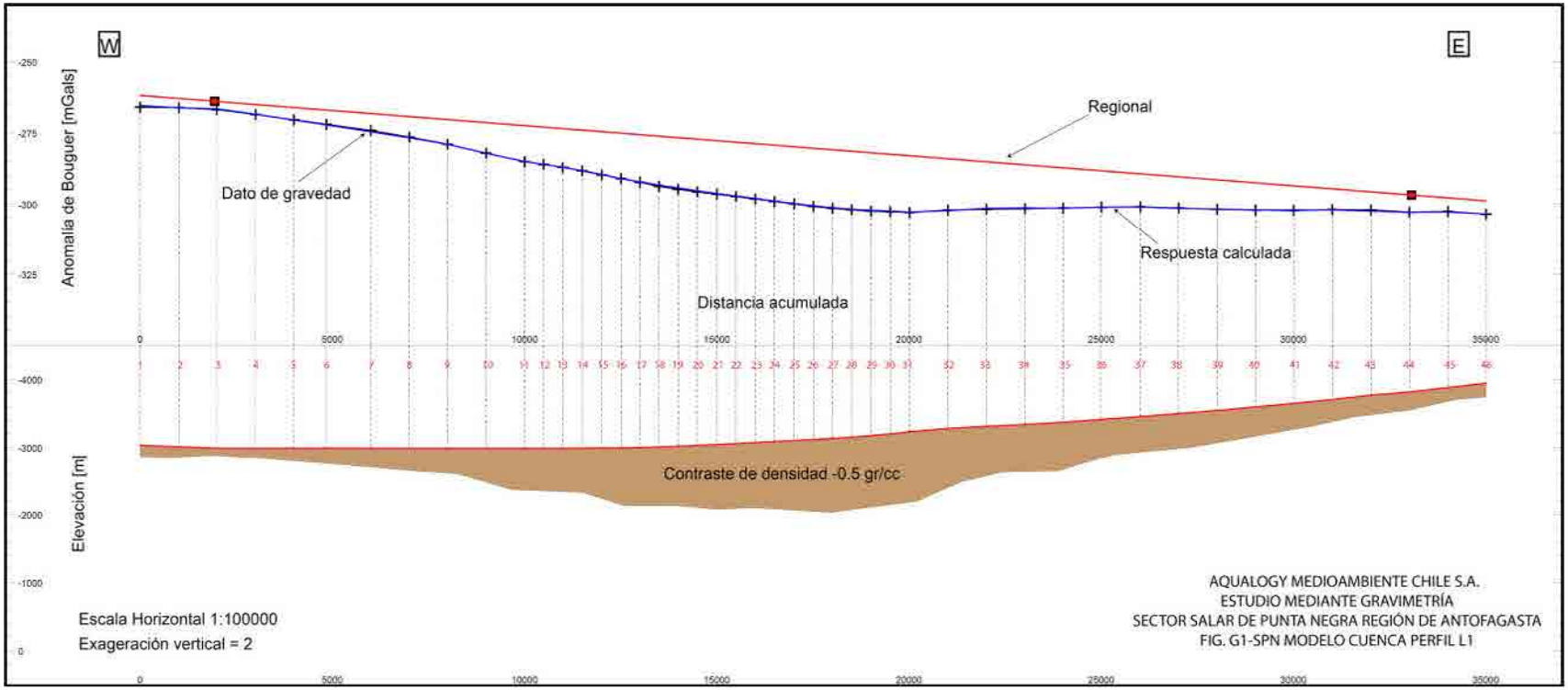


Figura 5-49. Perfil W-E del relleno sedimentario del salar de Punta Negra obtenido a partir de la campaña geofísica. Fuente: GEODATOS.

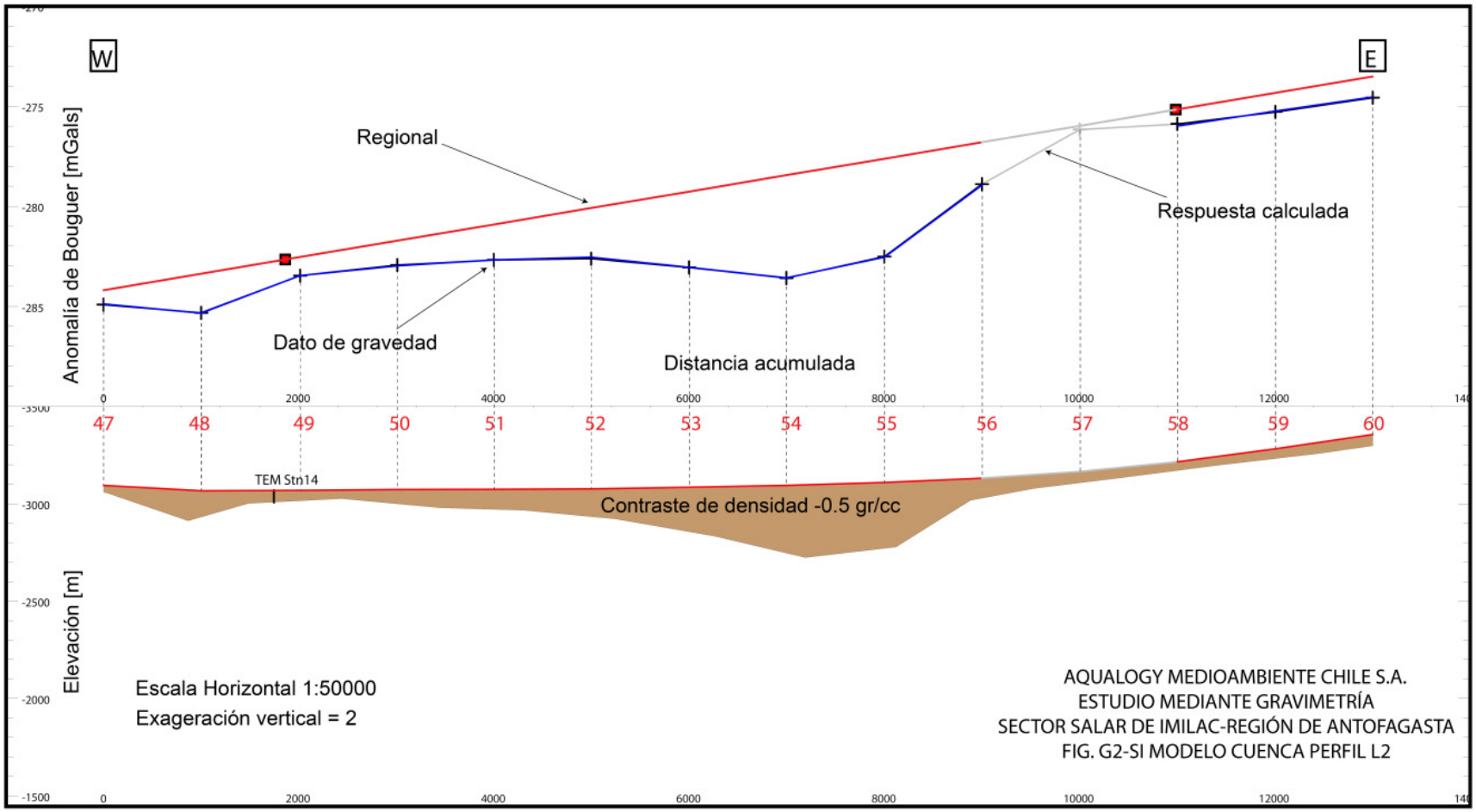


Figura 5-50. Perfil W-E del relleno sedimentario del salar de Imilac obtenido a partir de la campaña geofísica. Fuente: GEODATOS.

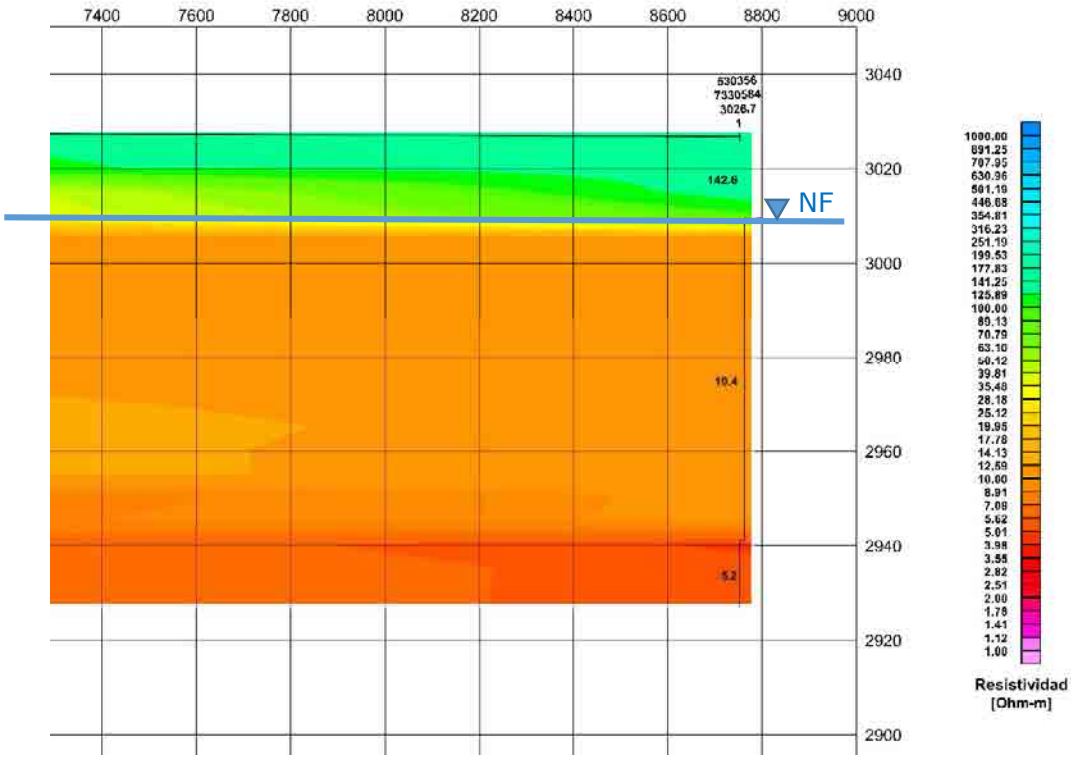


Figura 5-51. Detalle del contraste de resistividades que define la profundidad del nivel freático. Fuente: Geodatos.

También se observó en los tres perfiles NanoTEM ubicados en el margen del salar de Punta Negra la geometría de la cuña salina pudiendo distinguir el acuífero de agua dulce del acuífero de salmuera o agua salada, separados por la interfaz salina. En algunos de los perfiles se observó como el nivel freático descendía hacia el este causado por el cono de depresión producido por el campo de pozos central.

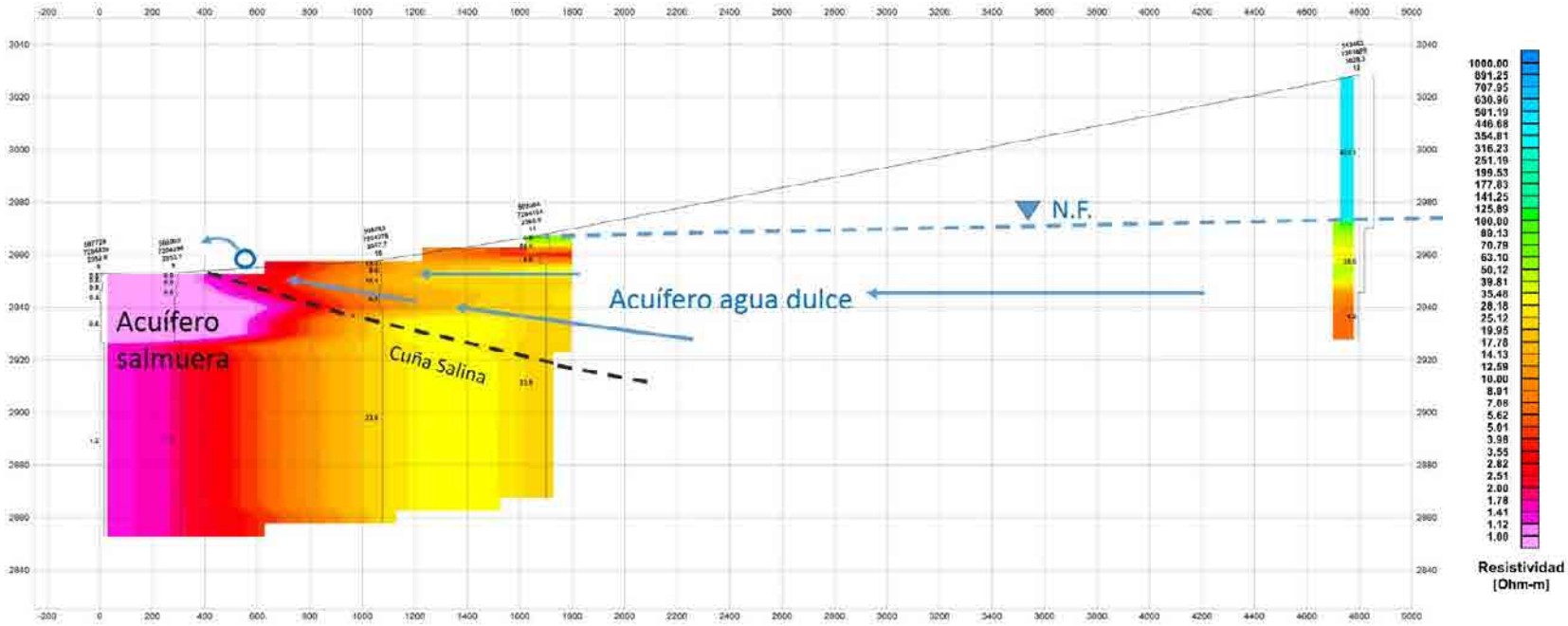


Figura 5-52. Contacto entre acuífero agua dulce y agua salada y geometría de la cuña salina. Fuente: modificado de Geodatos.

5.7 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA

5.7.1 DEFINICIÓN DE ACUIFEROS

A partir de los materiales geológicos presentes en la zona de estudio, se ha realizado una agrupación de los mismos en función de sus características hidrogeológicas, quedando clasificada la zona de la siguiente forma:

Basamento impermeable: materiales consolidados, formados por rocas que no conforman acuífero o que raramente puedan hacerlo, salvo localmente en zonas fracturadas y/o fisuradas. Estos materiales son principalmente intrusivos (granitos, granitoides, granodioritas, etc.), así como lavas y piroclastos consolidados, andesitas, dacitas y riolitas.

Piroclastos: dentro de esta agrupación se han dividido materiales piroclásticos de baja permeabilidad (Msv y Pz-Trsv) y de media-baja permeabilidad (Msg y Tzt), en función del grado de consolidación de los mismos.

Estos materiales no se suponen acuíferos, no obstante, se ha decidido incorporar su clasificación como media-baja permeabilidad puesto que, si bien no conforman el material acuífero principal de la zona de estudio, pueden contener agua y aportar de forma lateral cierto caudal a los materiales posteriormente definidos como acuíferos.

Fisurados: los materiales aquí incluidos pueden comportarse como acuíferos en función del grado de fisuración que tengan, no obstante, a priori éste se supone bajo, por lo que la permeabilidad puede ser baja y/o media-baja.

Se incluyen conglomerados, areniscas, lavas, depósitos volcanoclásticos, calizas, etc. Es decir, aquellos materiales consolidados que pueden presentar cierto grado de fisuración.

Depósitos Evaporíticos: se trata de los materiales que conforman los salares, se encuentran formados mayoritariamente por rocas evaporíticas (principalmente compuestas por cloruros, sulfatos y carbonatos), presentando también intercalaciones con sedimentos. Estos materiales forman acuíferos de salmuera.

Detríticos: los materiales detríticos son los que conforman el acuífero principal y de mayor extensión de la zona de estudio.

Debido a la heterogeneidad en la génesis, las características hidráulicas pueden ser muy variables dentro de este mismo grupo, presentando permeabilidades desde bajas hasta altas o muy altas. Corresponden a gravas, arenas y limos del Cenozoico (Mioceno-Plioceno) y del Cuaternario.

5.7.2 GEOMETRÍA DE LOS ACUÍFEROS

La distribución en planta de los materiales acuíferos, a partir de la agrupación y clasificación anterior, se muestra en la **Figura 5-53**.

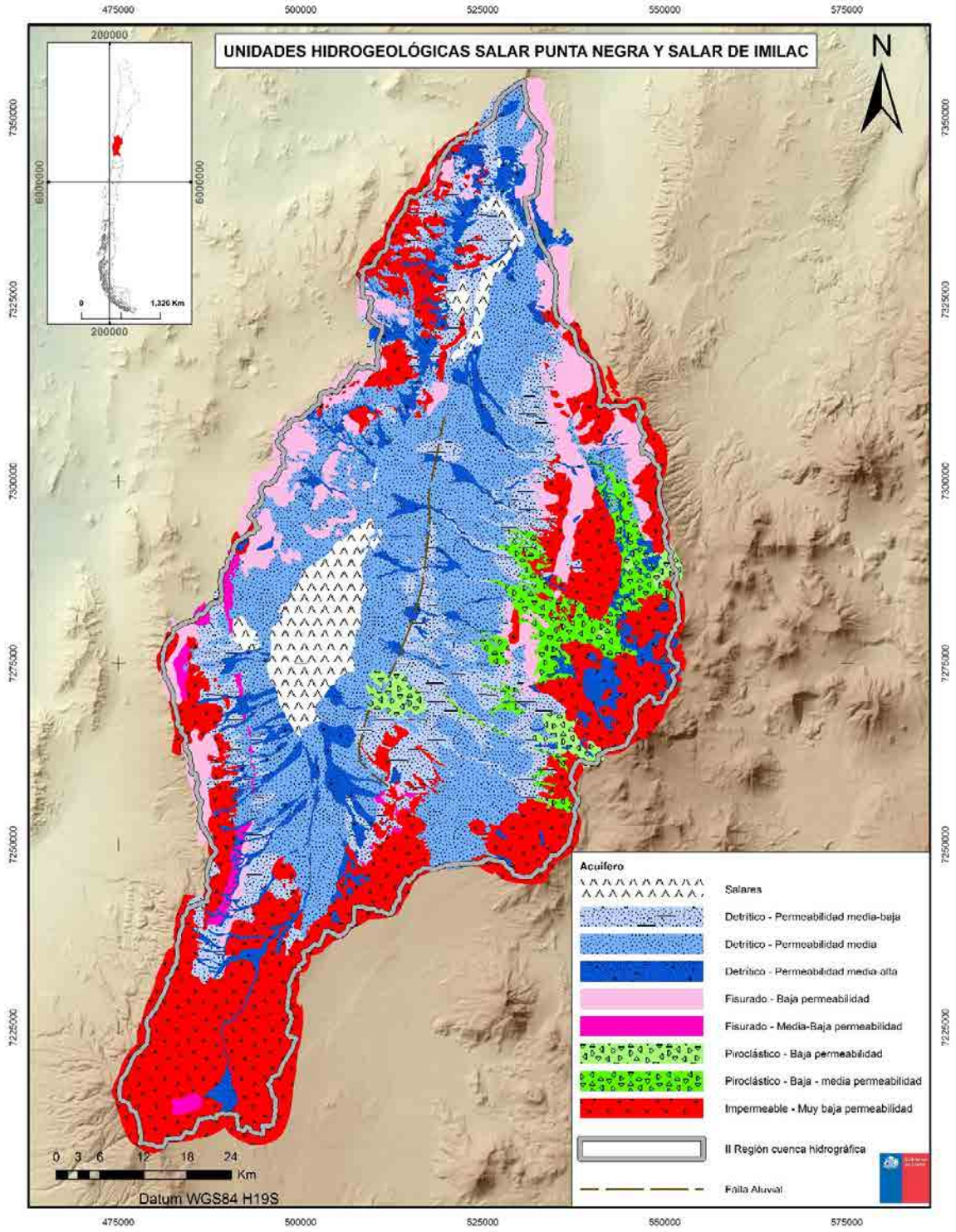


Figura 5-53. Materiales acuíferos del salar de Punta Negra y salar de Imilac: Fuente: elaboración propia.

Por otro lado, para la obtención de la geometría en profundidad, se han analizado en conjunto los datos obtenidos en la campaña geofísica, las columnas litológicas recopiladas, así como la información geológica de superficie, integrándola en el software Hydro Geoanalyst para su mejor procesado e interpretación, elaborando perfiles hidrogeológicos, que con un posterior procesado de interpolación, se ha podido obtener la geometría tridimensional del relleno sedimentario, definido como el acuífero.

Para ello se han trazado un total de 28 perfiles (ver **Figura 5-54**) en la Cuenca del Salar de Punta Negra e Imilac, que mediante un proceso iterativo de interpretación entre unos perfiles y otros, se ha ido dando coherencia e infiriendo la posición del basamento, que, por falta de información, ha tenido que ser supuesta en muchos casos, siempre bajo criterio geológico y correlativo entre distintos perfiles.

Asimismo, aunque con cierta incertidumbre, el mencionado proceso ha permitido la obtención de la geometría tridimensional del acuífero, la cual, en líneas generales, pone de manifiesto la existencia de dos sectores acuíferos, uno el correspondiente con la cuenca del salar de Punta Negra, y otro con la cuenca del salar de Imilac, no aislados sino dependientes en función de la posición del nivel freático, pudiendo estar desconectados si la napa desciende por determinado nivel. El descenso máximo en esta zona de interconexión se definirá una vez realizada la geofísica complementaria y/o durante la modelación.

Se muestran a continuación los perfiles hidrogeológicos más significativos, en los cuales se puede ver, tanto la geometría de ambos sectores acuíferos, como la geometría de la conexión.

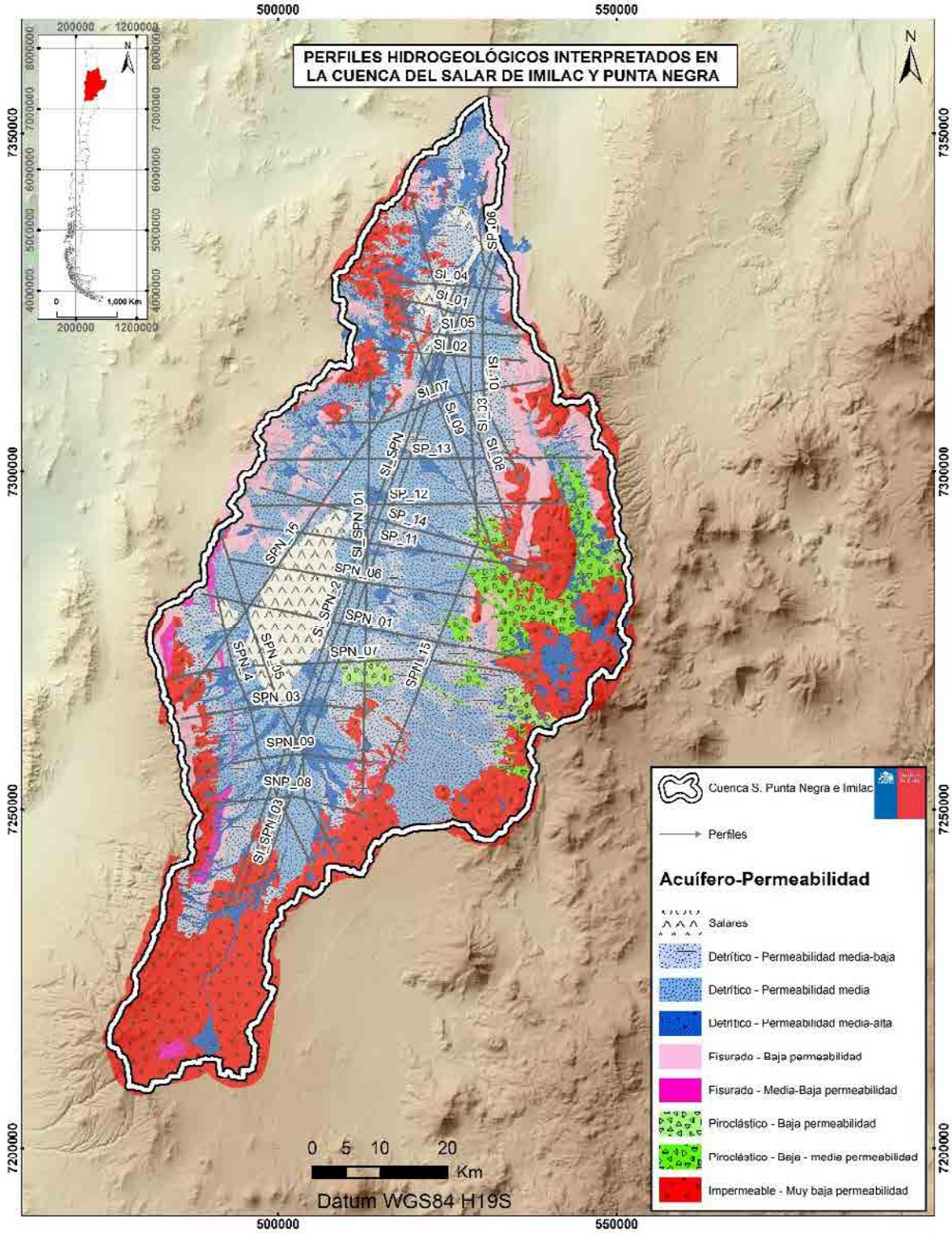


Figura 5-54. Perfiles hidrogeológicos trazados para la definición del basamento en el salar de Punta Negra y salar de Imilac: Fuente: elaboración propia.

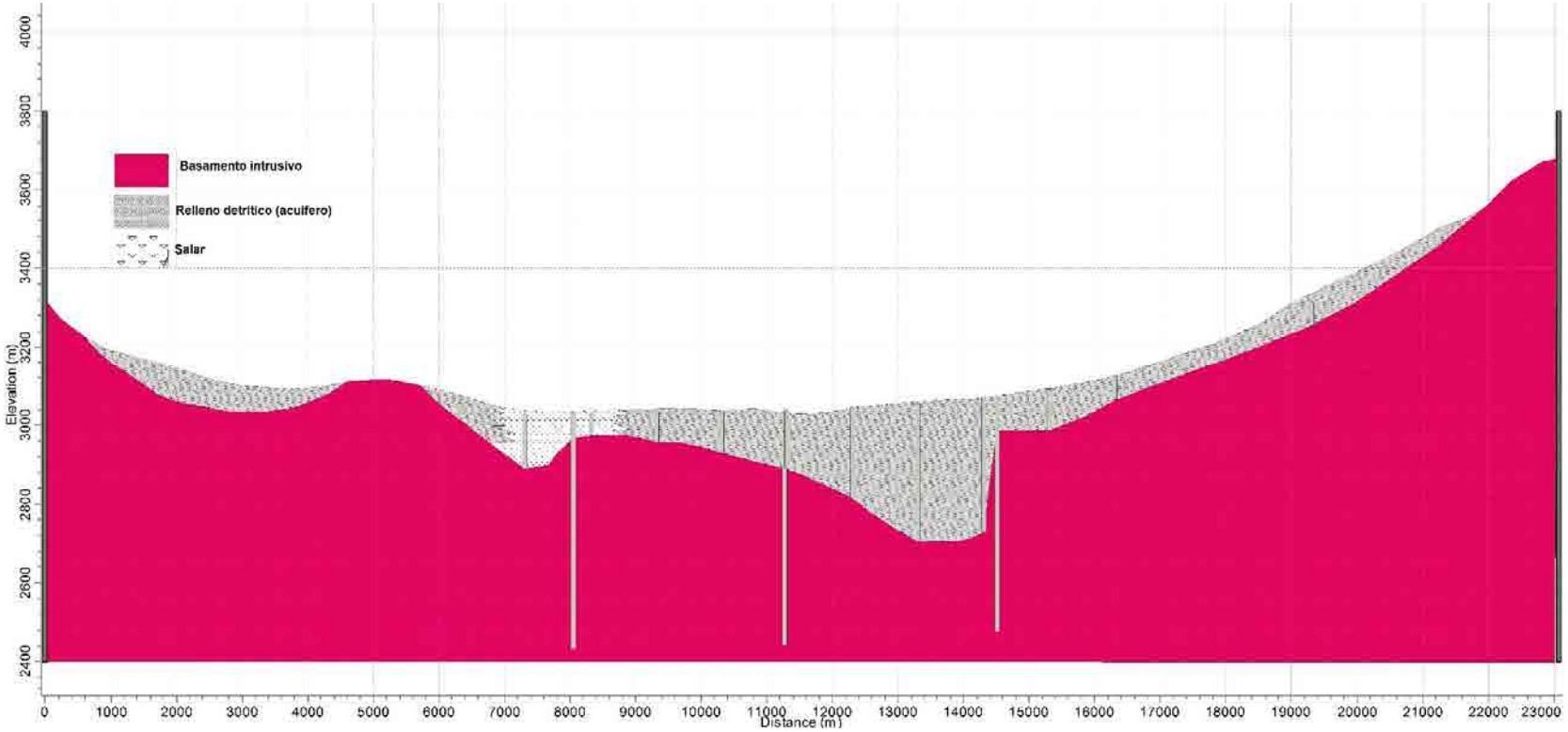


Figura 5-55. Perfil SI_02, corte W-E del Salar de Imilac (escala vertical por 6). Fuente: elaboración propia.

En este perfil, se muestra la geometría del basamento en el Salar de Imilac, donde se observa un espesor del relleno sedimentario máximo de 350 m, que al Este disminuye notablemente (por el probable efecto de una falla) y hacia el oeste también es menor, pero se reduce de forma más paulatina.

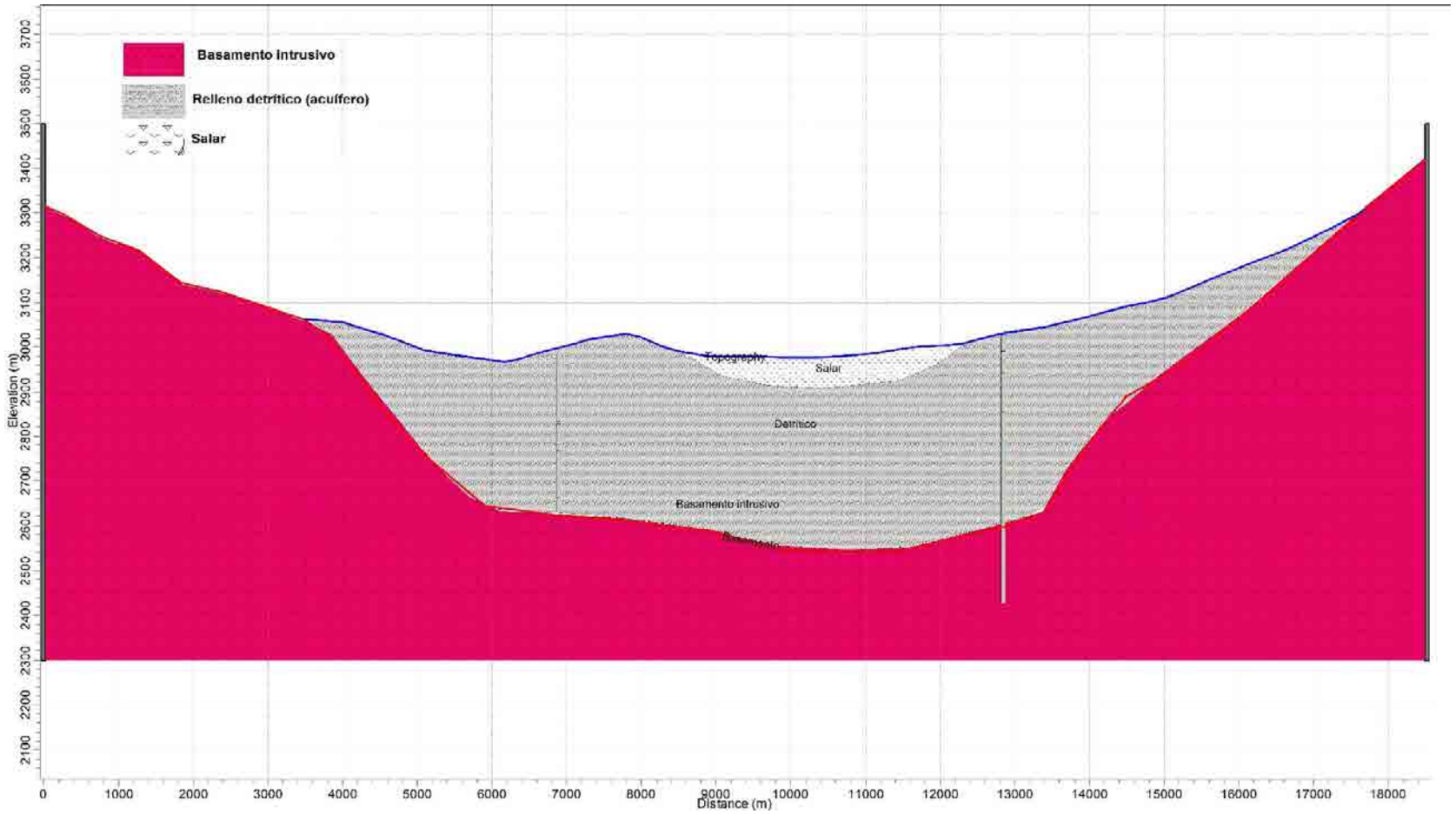


Figura 5-56. Perfil SI_04, corte W-E del Salar de Imilac (escala vertical por 6). Fuente: elaboración propia.

En este otro perfil se muestra la morfología del relleno sedimentario de la parte norte del Salar de Imilac, con espesor similar al anterior e incluso algo superior (400 m).

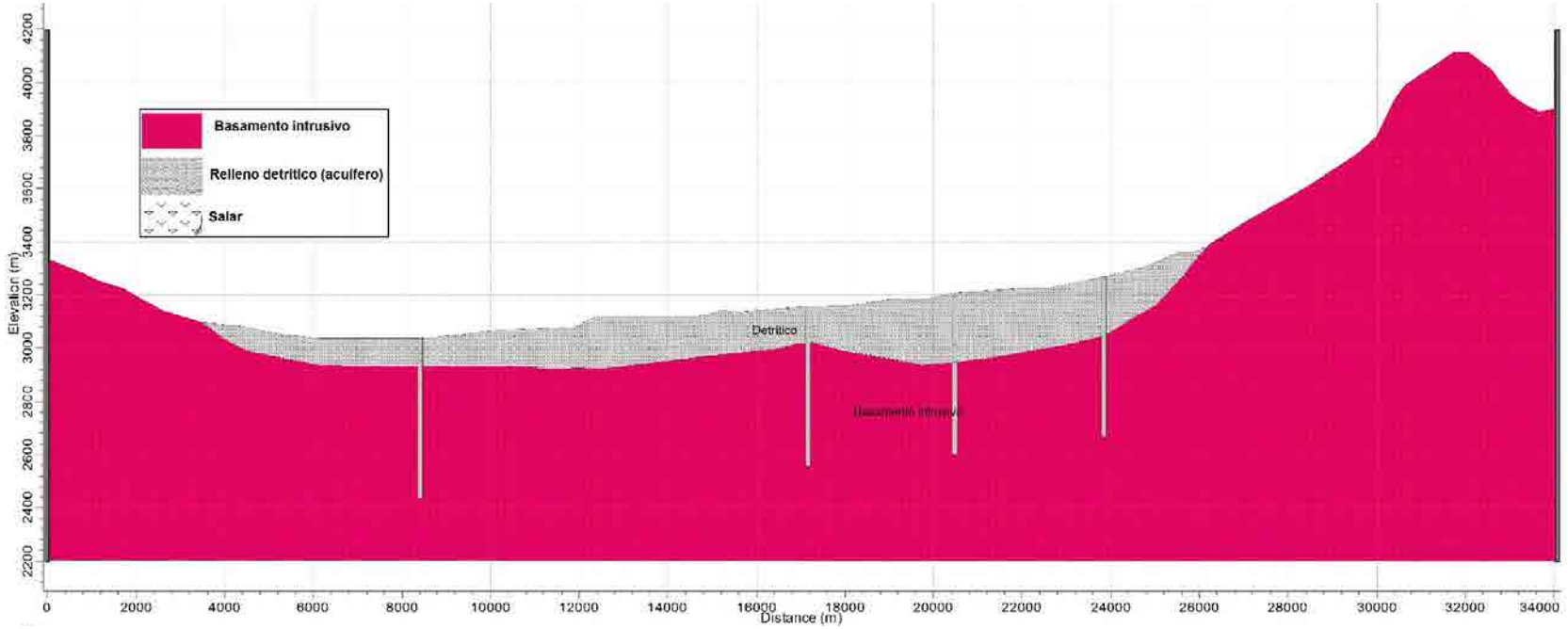


Figura 5-57. Perfil SI_07, E-W al sur del Salar de Imilac (escala vertical por 6). Fuente: elaboración propia.

Este perfil, de dirección este-oeste, se ubica al sur del Salar de Imilac, en el cual se observa que el espesor del relleno sedimentario alcanza como máximo los 200 m.

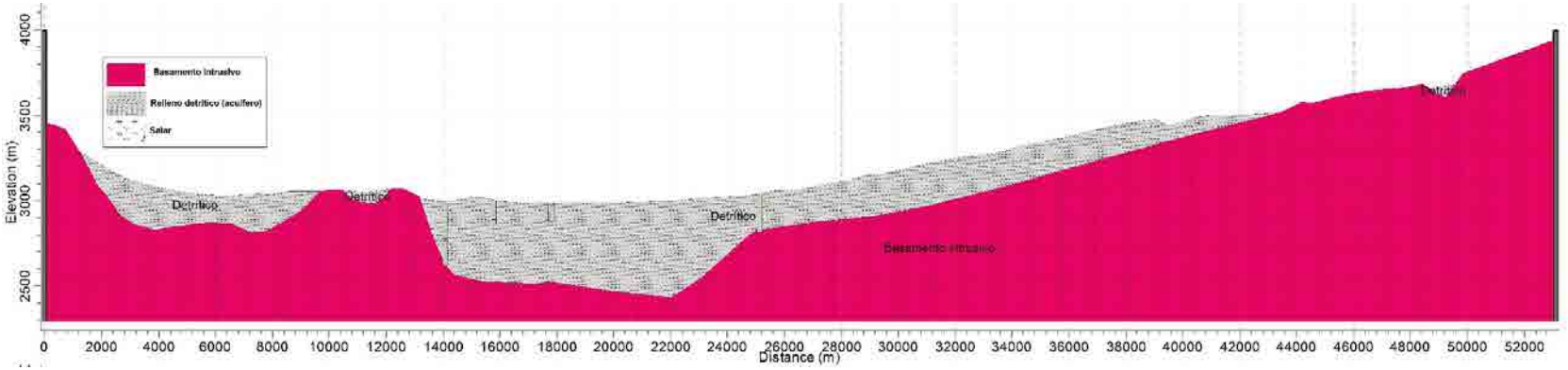


Figura 5-58. Perfil SI_08, NNW-SSE en Salar de Imilac (escala vertical por 6). Fuente: elaboración propia.

En este perfil, de dirección nor-noroeste, sur-sureste, se muestra el relleno sedimentario del Salar de Imilac, cuyo espesor máximo son 500 m.

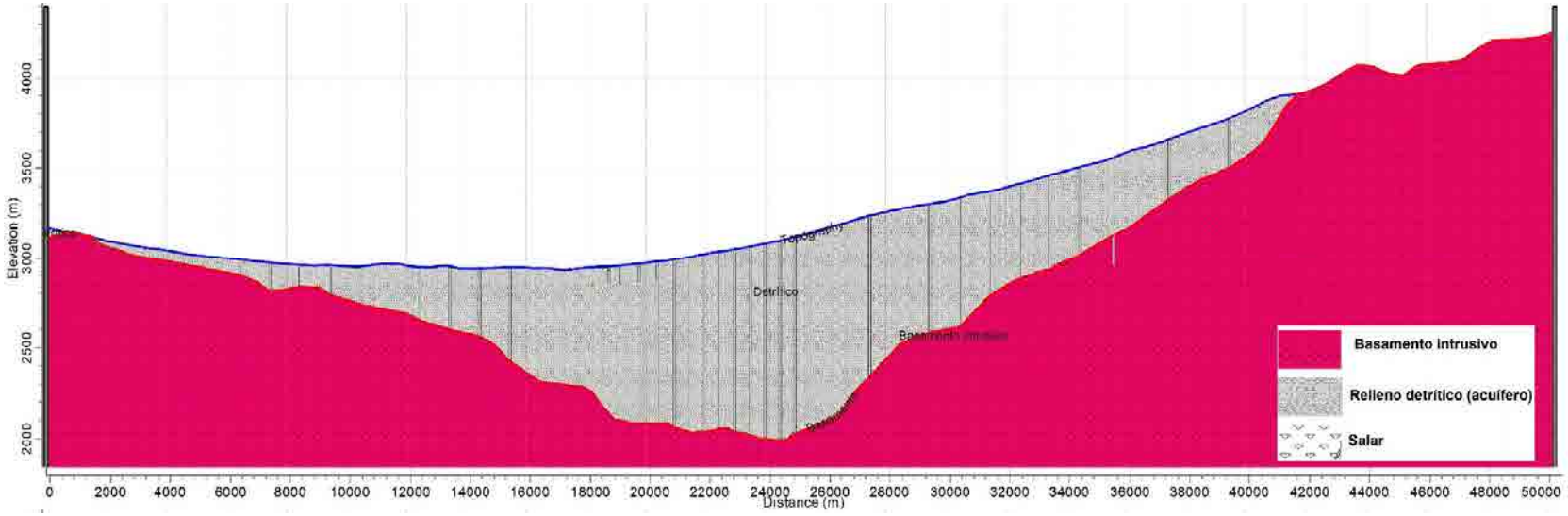


Figura 5-59. Perfil SPN_01, dirección W-E en la cuenca del Salar de Punta Negra (escala vertical por 6). Fuente: elaboración propia.

Este perfil cruza de oeste a este el Salar de Punta Negra, cuyo espesor de relleno sedimentario máximo es de 1.100 metros.

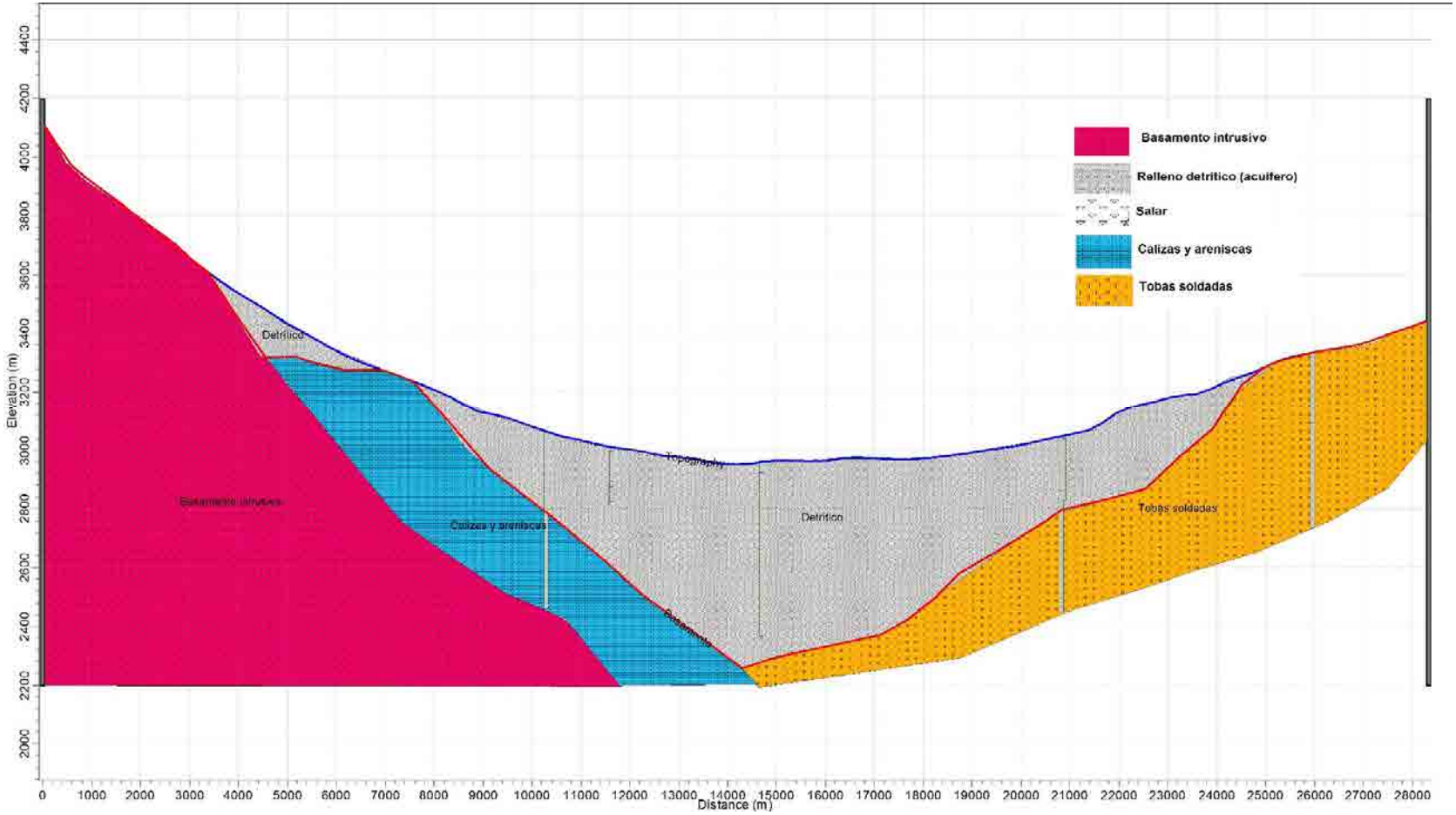


Figura 5-60. Perfil SPN_03, dirección W-E al sur del Salar de Punta Negra (escala vertical por 6). Fuente: elaboración propia.

En este perfil, ubicado al sur del Salar de Punta Negra, afloran materiales volcánicos al este y calizos-conglomeráticos al oeste, y por su consideración como material consolidado, de menor interés o de bajo interés hidrogeológico, la morfología del acuífero, es decir, la delimitación del basamento, se ha referido al contacto de éstos con el relleno sedimentario, al margen de la posición de los materiales intrusivos sobre los cuales descansan los anteriores.

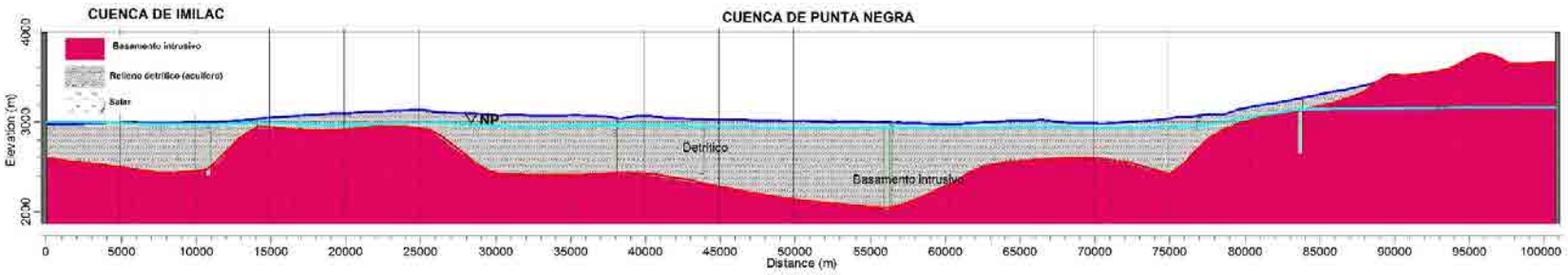


Figura 5-61. Perfil SI_SPN_01, NNE-SSW cuenca de Imilac y Punta Negra (escala vertical por 6). Fuente: elaboración propia.

En este perfil, de dirección nor-noreste, sur-suroeste, se observa el sector acuífero asociado al Salar de Imilac al norte, y el sector acuífero asociado al Salar de Punta Negra al sur. Entre ambos, el espesor del relleno sedimentario es mínimo (75 – 100 m en este perfil), debido a que el basamento impermeable se queda cerca de la superficie.

Asimismo, se el nivel piezométrico (en color cian) queda cerca del basamento, siendo por tanto el espesor saturado en esta zona de transición entre ambos sectores de en torno a los 40 metros. De esta situación se traduce que, en el caso de que el nivel freático descienda esos 40 metros, ambos sectores quedarían desconectados.

Esta situación se observa en otros dos perfiles más elaborados tanto al oeste (perfil SI_SPN_02) como al este de éste mismo (perfil SI_SPN_03), ambos mostrados a continuación.

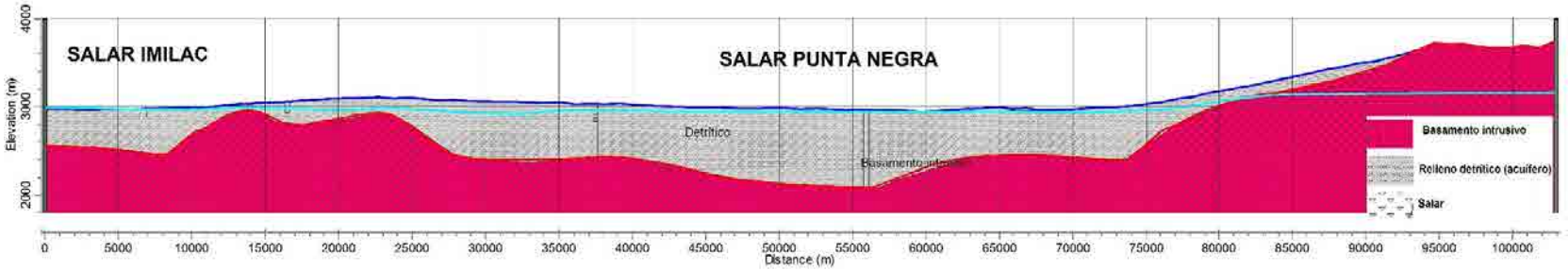


Figura 5-62. Perfil SI_SPN_02, NNE-SSW cuenca de Imilac y Punta Negra (escala vertical por 6). Fuente: elaboración propia.

En este otro perfil, paralelo, al oeste del anterior, el espesor saturado en la zona de transición entre ambas cuencas es inferior, siendo éste de uno 20 metros.

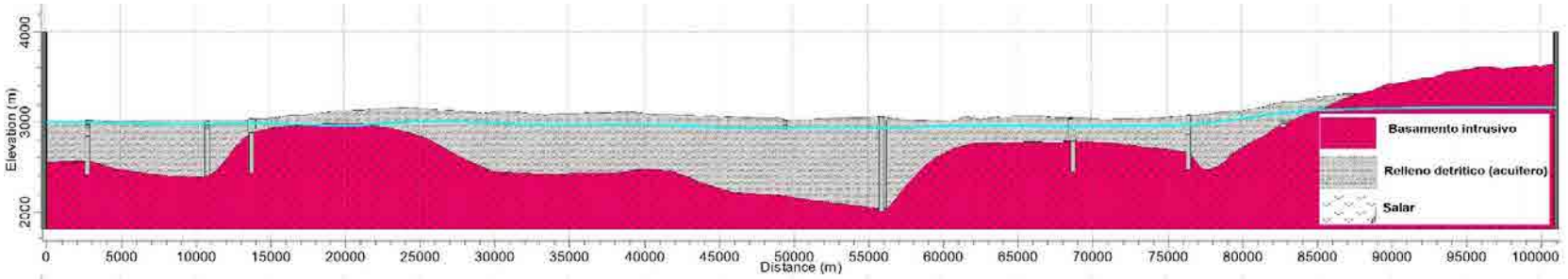


Figura 5-63. Perfil SI_SPN_03, NNE-SSW cuenca de Imilac y Punta Negra (escala vertical por 6). Fuente: elaboración propia.

Por último, en este perfil, paralelo a los anteriores, ubicado más al este de los mismos, ambos sectores estarían desconectados, por lo que solo habría relación hidráulica al oeste de este perfil.

Atendiendo a la geometría definida en los perfiles anteriores, se obtiene el siguiente mapa de isohipsas del basamento.

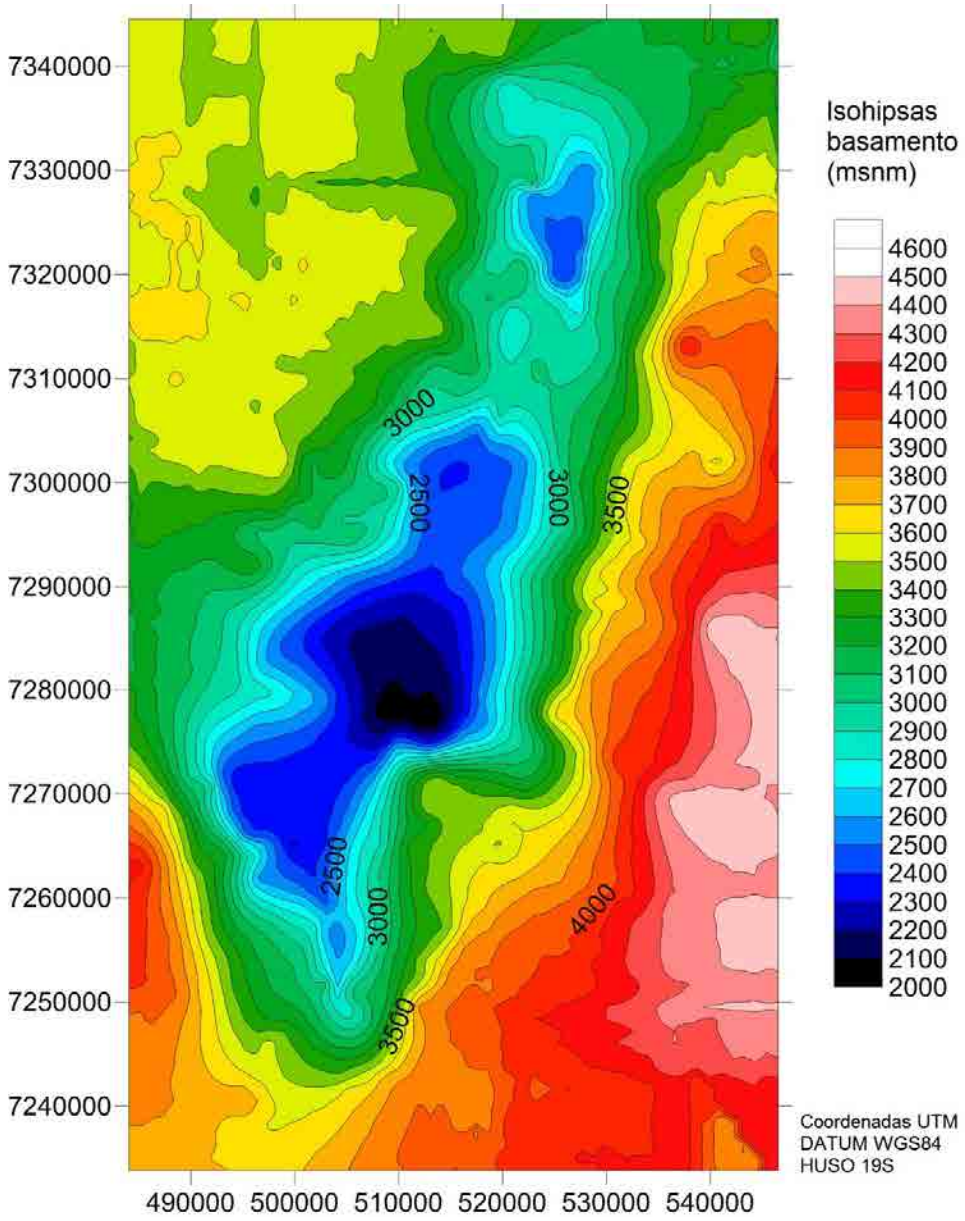


Figura 5-64. Mapa de isohipsas del basamento del acuífero de la cuenca del Salar de Imilac y Punta Negra. Valores en msnm. Fuente: elaboración propia.

En este mapa se identifica claramente los dos sectores acuíferos (Imilac al norte y Punta Negra al sur), así como la zona de separación entre ambos.

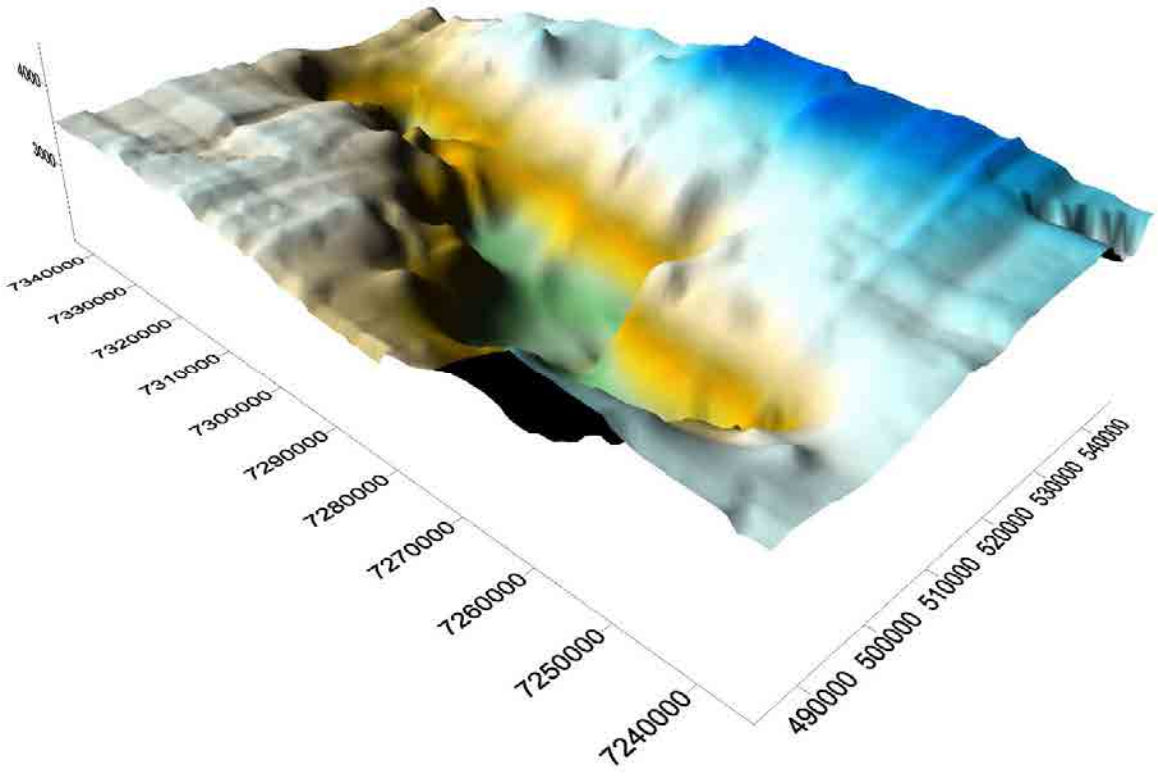


Figura 5-65. Vista 3D de la posición del basamento del acuífero de la cuenca del Salar de Imilac y Punta Negra. Fuente: elaboración propia.

5.7.3 PIEZOMETRÍA

DIRECCIÓN Y SENTIDO DE FLUJO

Se ha definido la dirección y sentido de flujo de la zona de estudio a partir de la siguiente información:

- Campaña de terreno realizada, durante la cual se tomaron medidas de nivel estático y puntos de surgencia.
- Datos facilitados por Minera Escondida, en los puntos de control de nivel estático que tienen para controlar la evolución del acuífero.
- Campaña de prospección geofísica TEM y NanoTEM, en los cuales se identifica de forma clara la posición del nivel freático en el acuífero.
- Clasificación hidrogeológica realizada en secciones anteriores.

El mapa de isopiezas y flujo realizado representa el estado hidráulico del **acuífero aluvial** en diciembre de 2015, fecha de la realización de la campaña. Si bien, la geofísica se hizo en meses posteriores, ha sido contrastada con puntos tomados en diciembre y muestra una buena correlación. Asimismo, se han descartado algunos puntos de posición del nivel freático ofrecidos por la campaña de geofísica, al observarse que en ese momento había afección por bombeos cercana, coincidente además con campos de bombeo actualmente en explotación.

Adicionalmente, los datos facilitados por Minera Escondida, han sido tratados y verificados para que solamente sean utilizados los niveles estáticos en la elaboración del mapa de isopiezas.

No obstante, debido a la gran extensión de la zona de estudio, y a su complejidad hidrogeológica, no todo el acuífero está definido con gran certidumbre, sino que se ha tenido que aplicar criterio hidrogeológico para el trazado de isopiezas.

A continuación en la **Figura 5-66** se muestra la piezometría realizada correspondiente a diciembre de 2015 en base a los datos proporcionados por Minera Escondida Ltda., los datos levantados en terreno y la información entregada por los perfiles de geofísica realizados en la zona. En la **Figura 5-67** se muestra la piezometría sobre la cartografía hidrogeológica realizada.

Cuenca del salar de Punta Negra

El flujo subterráneo en la cuenca del salar de Punta Negra se desplaza principalmente de Este a Oeste. Dentro del acuífero aluvial se distinguen dos sectores claramente diferenciados. Según el informe de GAC-MEL existe una falla normal con orientación NNE-SSW que divide el acuífero aluvial ubicado al este del salar en dos unidades. Según la piezometría elaborado a partir de los perfiles geofísicos, se observa un salto significativo en la piezometría coincidiendo con la falla. Este hecho corroboraría la existencia de dos bloques separados por la falla.

La piezometría al este de la falla presenta una morfología continua, representativa de un régimen natural. Por el contrario al oeste de la falla, debido a la intensa explotación, la piezometría está condicionada por la presencia de los campos de pozos. Existen dos campos de pozos, sector norte y sector centro, el primero con una caudal de extracción mayor genera un cono de depresión más pronunciado que el campo de pozos del sector central.

El campo de pozos del sector norte, se encuentra al norte del salar de Punta Negra, en una zona deprimida, cerca del límite con la cuenca del salar de Imilac. Su ubicación estratégica hace que el cono de depresión fruto del bombeo no altere el funcionamiento de los sectores de vegas VCL2 y VCL3. No obstante, si el cono de depresión se continuase expandiendo, con el tiempo podría interferir en la cuenca del salar de Imilac. No se conoce con exactitud si existe una continuidad del acuífero hacia la cuenca del salar de Imilac, pero dada la geología observada en superficie es esperable que ambos acuíferos estén conectados (ver mapa hidrogeológico de la **Figura 5-53**).

El campo de pozos del sector central, no genera un cono tan pronunciado debido a su menor explotación. Una explotación descontrolada podría afectar los sectores de lagunas VCL2 y VCL3 alterando el ecosistema. Este hecho ya se produjo antes del año 2.000 y por este motivo Minera Escondida Ltda. inyecta un caudal determinado para mantener siempre las vegas en condiciones óptimas para el desarrollo de la fauna y flora autóctona del sector. La recarga artificial producida para mantener las vegas, se ve reflejado en la existencia de domos en la piezometría ubicados cerca del margen del salar.

En el sector sur de la cuenca, al no haber pozos de bombeo, la piezometría muestra un régimen natural con un flujo convergente con orientación S-N. Se estima que este sector puede disponer de reservas abundantes de agua debido a las dimensiones de la cuenca aportante.

Entre el sector centro y sur, afloran materiales volcánicos los cuales se desconoce que interacción tiene con el acuífero aluvial. Al oeste de esta formación se encuentra el sector VCL3, punto en el cual aflora agua subterránea la cual podría estar asociada a la formación volcánica.

Al oeste del salar se encuentra la cordillera de Domeyko, ésta presenta depósitos aluviales que podrían albergar agua. Teniendo en cuenta la escasa precipitación que se produce en el sector, no se esperan aportes subterráneos de las dimensiones del sector este. Este hecho también se ve reflejado en la formación de la costra salina en el margen oeste del salar donde el ancho es muy inferior al del margen este. La piezometría en esta zona se ha extrapolado siguiendo un criterio geomorfológico al no tener puntos medidos de profundidad del nivel freático.

Cuenca del salar de Imilac

La cuenca del salar de Imilac se alimenta principalmente de la quebrada Guanaqueros situada al SE. Este hecho provoca que el flujo subterráneo preferencial en la cuenca sea de SE a NO. El acuífero también se propaga hacia el N por el lado este del salar aportando agua al salar central. En el salar central el agua subterránea se desplaza en sentido S-N hasta la zona más deprimida del salar ubicada al norte.

El salar ubicado al SO presenta una piezometría concéntrica con su parte más deprimida en el centro del salar. Según las vertientes observadas en terreno, el salar recibe aportes tanto de la cordillera de Domeyko como del salar central. No se ha podido extrapolar la piezometría hacia el oeste del salar por falta de puntos de medición de nivel no obstante se interpreta que los depósitos aluviales del margen oeste contienen agua y que estos son los causantes de la formación de una vertiente en este punto.

Se desconoce la piezometría en el sector del salar ubicado al NO, pero se interpreta que los aportes principales deben venir del NO.

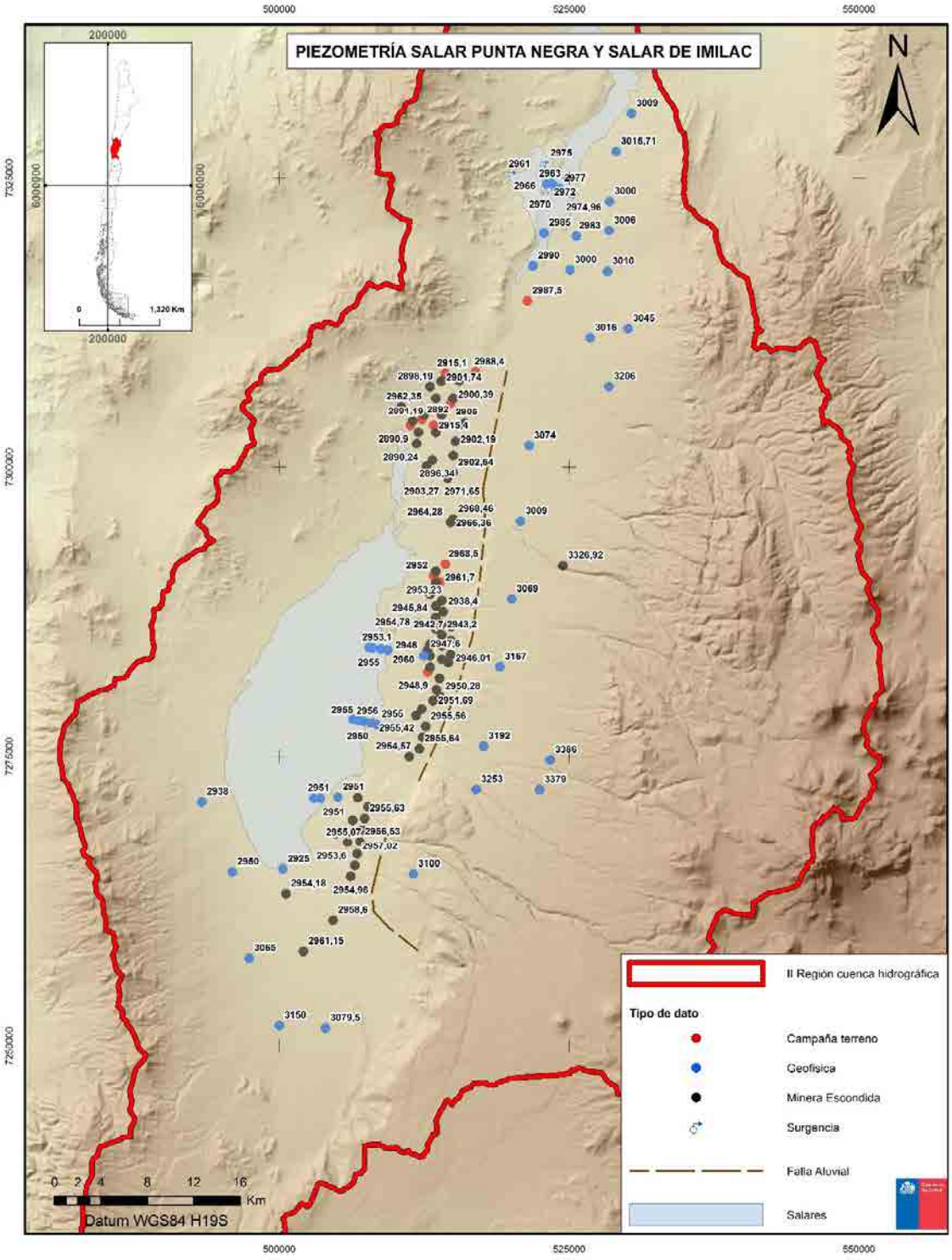


Figura 5-66. Puntos con información de nivel para la elaboración de la piezometría en el Salar de Punta Negra y Salar de Imilac en diciembre de 2015. Fuente: elaboración propia.

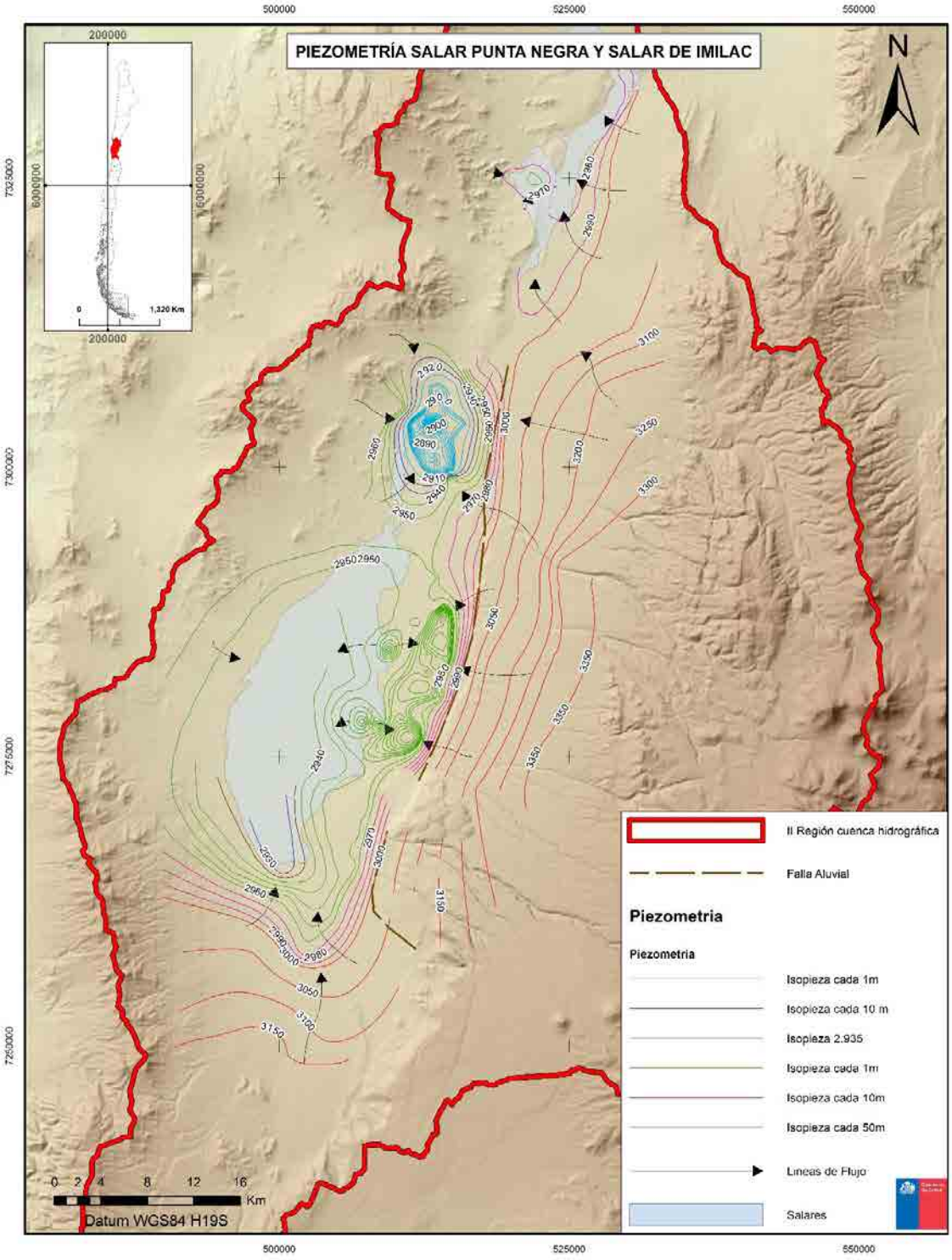


Figura 5-67. Isopiezas y dirección de flujo en el Salar de Punta Negra y Salar de Imilac en diciembre de 2015 sobre mapa hidrogeológico. Fuente: elaboración propia.

5.7.4 EVOLUCIÓN PIEZOMÉTRICA

En esta sección se ha realizado un análisis de la evolución piezométrica en el acuífero del Salar de Punta Negra e Imilac, teniendo en cuenta exclusivamente datos de niveles estáticos registrados en pozos de Minera Escondida. No se ha podido hacer lo mismo en el salar de Imilac por falta de información.

Con el objetivo de caracterizar el comportamiento del acuífero por zonas de similar comportamiento piezométrico, se han realizado agrupaciones de piezómetros con respuestas análogas, que han llevado a diferenciar tres zonas en el acuífero:

- **Zona Norte**, que corresponde a los pozos situados en el Campo de Pozos Norte del Salar de Punta Negra, localizados en el borde oriental del mismo. Son puntos de observación cuyos niveles freáticos están condicionados por los pozos de bombeo.
- **Zona Central**, que engloba los pozos de observación situados en el Campo de Pozos Central del Salar de Punta Negra.
- **Zona Sur**, engloba los pozos de observación situados en el extremo sur del Campo de Pozos Central dónde no se registran pozos con bombeo. Las oscilaciones de los niveles freáticos dependen de las variaciones de recarga.

A continuación se presenta la información del histórico de niveles registrados desde julio de 2004 hasta diciembre de 2015, en pozos de observación (**Figura 5-68**), para cada una de las zonas identificadas. Destacar la ausencia de datos para el período de junio de 2007 a diciembre de 2013. Los valores del nivel freático mensual corresponden a medidas puntuales de cada mes.

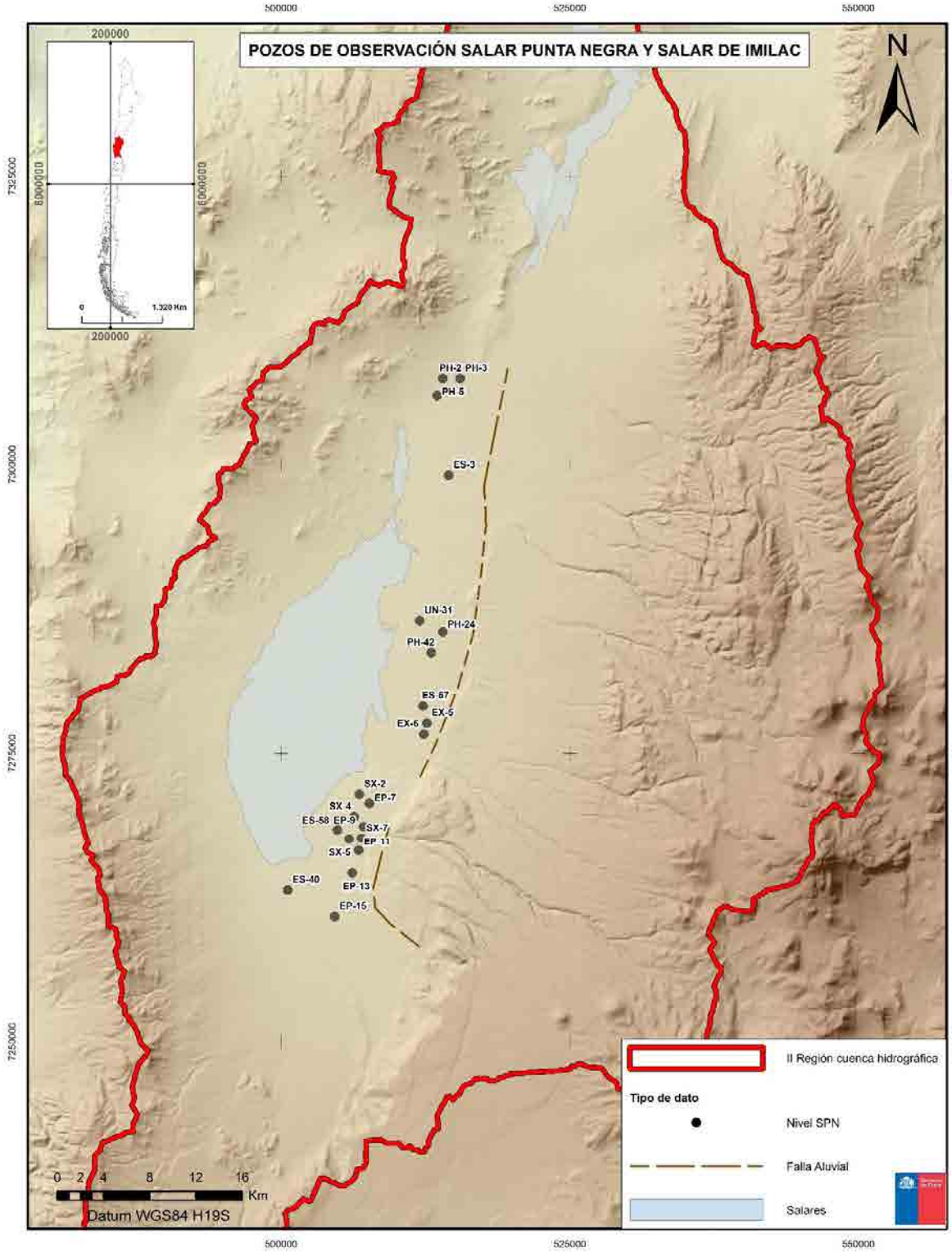


Figura 5-68. Ubicación de pozos de observación utilizados en la evolución piezometrica. Fuente: Minera Escondida Ltda

Zona Norte del SPN

En la siguiente tabla se muestra la profundidad del nivel estático desde julio de 2004 hasta diciembre de 2015, así como la variación de nivel producida entre ambas fechas.

Pozo	Ubicación	Profundidad Nivel (m)		Variación en el periodo (m)
		jul-04	dic-15	
PH-02	Zona Norte SPN	96,25	113,53	-17,3
PH-03	Zona Norte SPN	101,83	113,84	-12,0
PH-05	Zona Norte SPN	87,37	105,88	-18,5
ES-03	Zona Norte SPN	46,85	46,50	0,4

Tabla 5-35. Variación del nivel estático en pozos de Zona Norte del SPN (julio 2004-diciembre 2015). Fuente: Modificado de Minera Escondida Ltda.

En los siguientes gráficos se ilustra la tendencia de los niveles registrados. En el eje vertical la cota del nivel piezométrico (msnm) y el eje horizontal muestra el período temporal igual para todos los pozos, que va desde julio de 2004 a diciembre de 2015.

Tal y como se observa en los siguientes gráficos, la tendencia de los pozos PH-02, PH-03 y PH-05 es decreciente. Dichos pozos de observación se ubican en el Campo de Pozos Norte, por ello que sus niveles freáticos estén condicionados por los bombeos. En los siguientes gráficos (**Figura 5-69, Figura 5-70, Figura 5-71**) se la evolución temporal del nivel descrito en los diferentes pozos.



Figura 5-69. Evolución piezométrica del pozo PH-02 (Zona Norte SPN). Fuente: modificado de Minera Escondida Ltda.

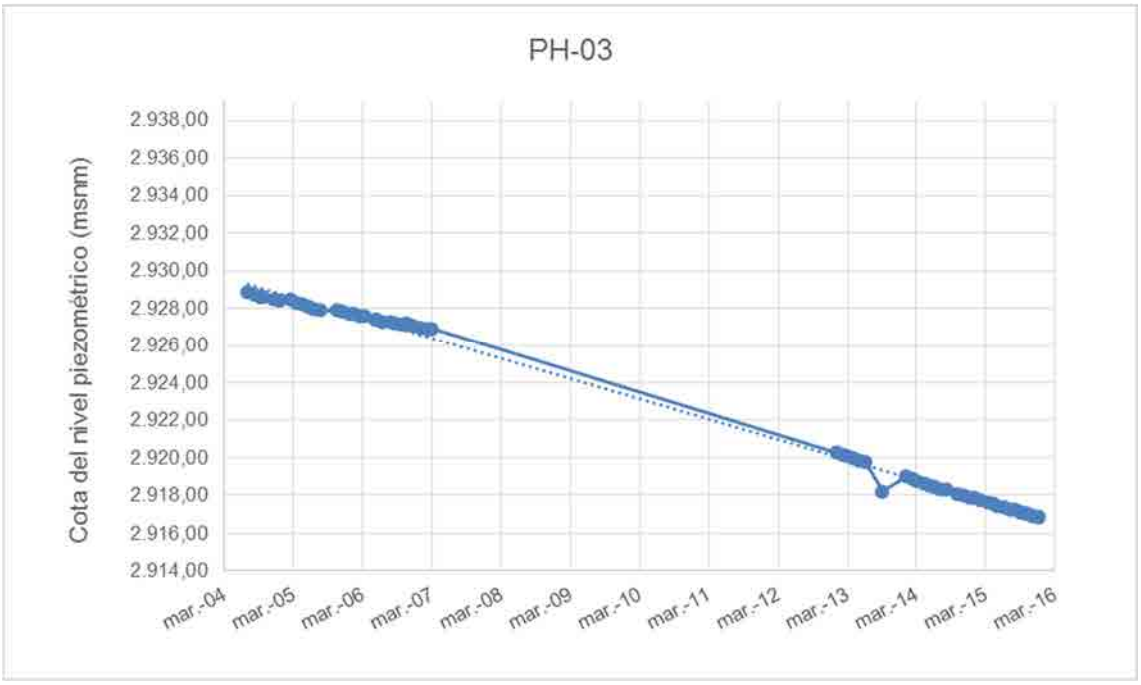


Figura 5-70. Evolución piezométrica del pozo PH-03 (Zona Norte SPN). Fuente: modificado de Minera Escondida Ltda.

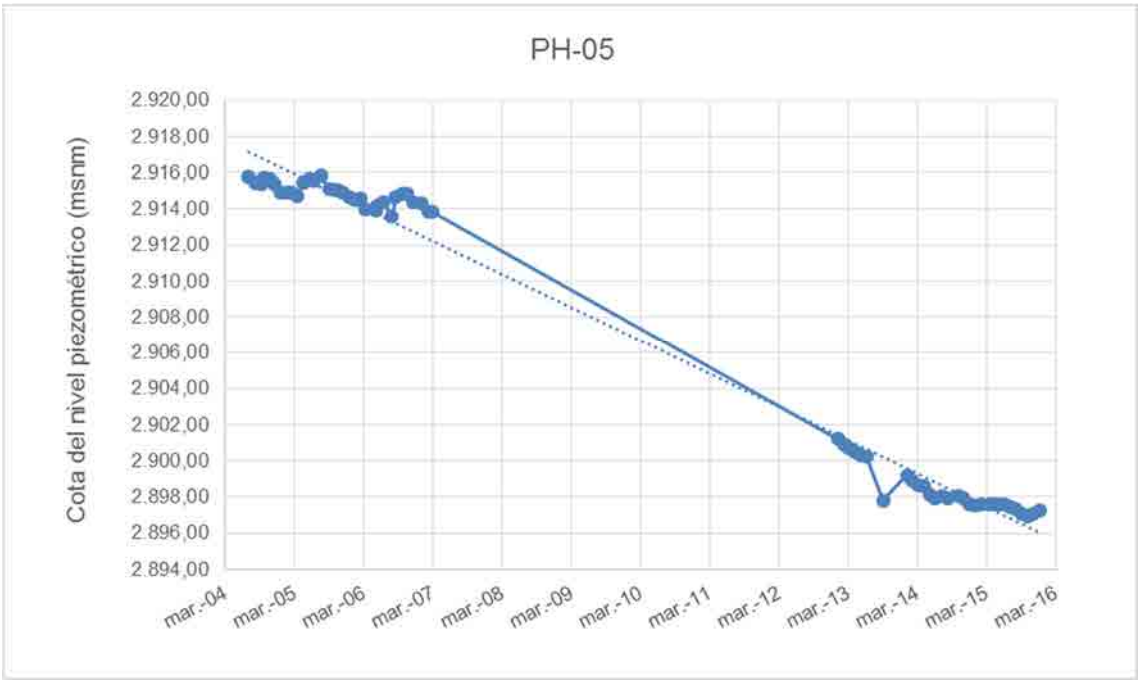


Figura 5-71. Evolución piezométrica del pozo PH-05 (Zona Norte SPN). Fuente: modificado de Minera Escondida Ltda.

Según nos alejamos del Campo de Pozos Norte, los niveles no presentan un descenso claro como se observa en el pozo ES-03 situado en el extremo sur del Campo de Pozos Norte (**Figura 5-72**).Este hecho se debe a que este pozo se encontraría fuera del radio de influencia del bombeo que se produce en el Campo de Pozos Norte.

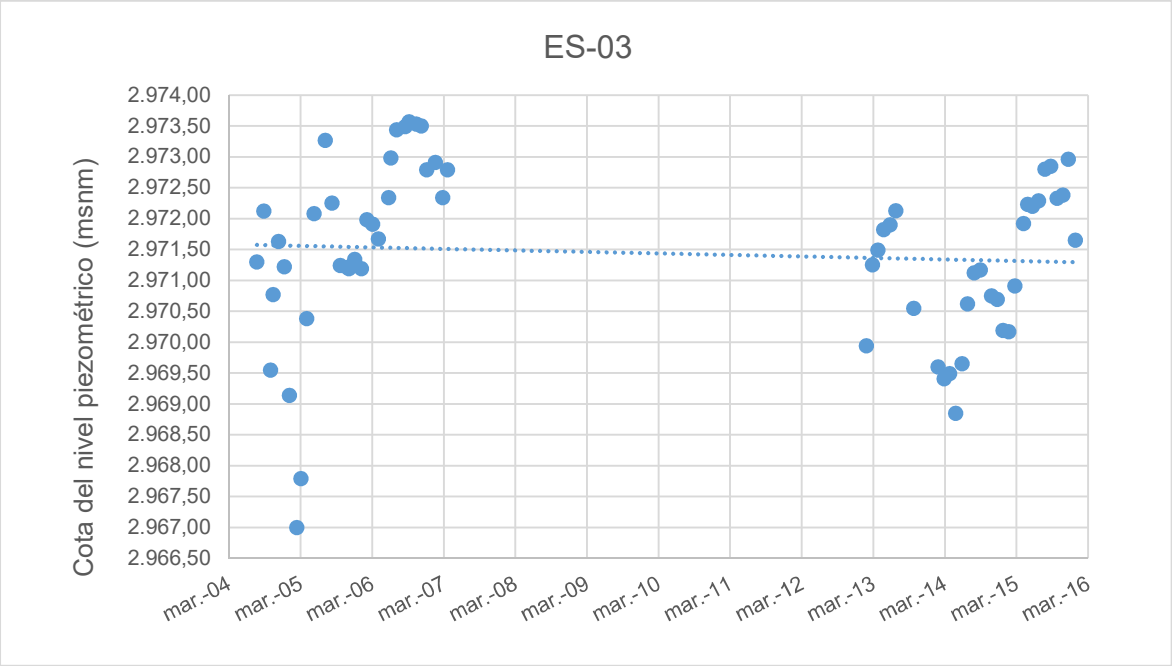


Figura 5-72. Evolución piezométrica del pozo ES-03 (sur de la Zona Norte SPN). Fuente: modificado de Minera Escondida Ltda.

La **Tabla 5-36** resume la profundidad de nivel freático en los pozos situados en la zona Norte del SPN, desde el mes de julio a diciembre del 2015.

Pozo	jul-04	dic-04	jul-05	dic-05	jul-06	dic-06	jul-14	dic-14	jul-15	dic-15
PH-02			96,84	98,25		97,48	114,44	112,73	113,65	113,53
PH-03	101,83	102,22	102,71	102,83	103,40	103,62	112,39	112,82	113,45	113,84
PH-05	87,37	87,76	87,57	88,24	88,79	88,81	105,12	105,54	105,67	105,88
ES-03	46,85	46,93	44,88	46,81	44,71	45,36	47,03	47,96	45,35	46,50

Tabla 5-36. Profundidad de nivel estático medio mensual en pozos de Zona Norte del SPN (julio 2004-diciembre 2015). Fuente: modificado de Minera Escondida Ltda.

En base a los datos disponibles, en la **Tabla 5-37** se calcula la variación del nivel estático (m) observada en estos pozos para 9 períodos semestrales en los años 2004, 2005, 2006, 2014 y 2015.

Pozo	jul-04-dic-04	dic-04-jul-05	jul-05-dic-05	dic-05-jul-06	jul-06-dic-06	dic-06-jul-14	jul-14-dic-14	dic-14-jul-15	jul-05-dic-15
PH-02		-1,41	-1,41				1,71	-0,92	0,12
PH-03	-0,39	-0,49	-0,12	-0,57	-0,22	-8,77	-0,43	-0,63	-0,39
PH-05	-0,39	0,19	-0,67	-0,55	-0,02		-0,42	-0,13	-0,21
ES-03	-0,08	2,05	-1,93	2,10	-0,65	-1,67	-0,93	2,61	-1,15

Tabla 5-37. Variación del nivel estático medio mensual en pozos de Zona Norte del SPN (julio 2004-diciembre 2015). Fuente: modificado de Minera Escondida Ltda.

Atendiendo a los descensos registrados en la tabla y a los gráficos de evolución del nivel dentro de la zona Norte destacar que:

- Hay una tendencia negativa en los pozos de observación más próximos a los pozos de explotación y la tendencia se suaviza e incluso la tendencia es positiva (ES-03) según nos alejamos de dicha zona de bombeo.
- Los niveles de los pozos localizados en el extremo sur del Campo de Pozos Norte tienden a estabilizarse en los últimos años.

Zona Central del SPN

La **Tabla 5-38** detalla la profundidad del nivel en julio de 2004 y diciembre de 2015, así como la variación del nivel registrada entre ambas fechas.

Pozo	Ubicación	Profundidad Nivel (m)		Variación nivel (m)
		jul-04	dic-15	
ES-57	Zona Central SPN	108,14	109,89	-1,75
EX-05	Zona Central SPN	129,44	131,35	-1,91
EX-06	Zona Central SPN	125,55	135,45	-9,90
PH-24	Zona Central SPN	112,50	116,23	-3,73
PH-42	Zona Central SPN	86,24	88,77	-2,53
UN-31	Zona Central SPN	46,22	48,80	-2,58

Tabla 5-38. Variación del nivel estático en pozos de Zona Central del SPN (julio 2004-diciembre 2015). Fuente: modificado de Minera Escondida Ltda.

A continuación, los gráficos con el registro histórico de los niveles para la Zona Central.

En los siguientes gráficos la diferencia espacial de cota del nivel piezométrico entre el mínimo y el máximo es de aproximadamente 10 m. Los pozos ES-57, EX05, PH-42 y UN-31 muestran una tendencia decreciente constante.

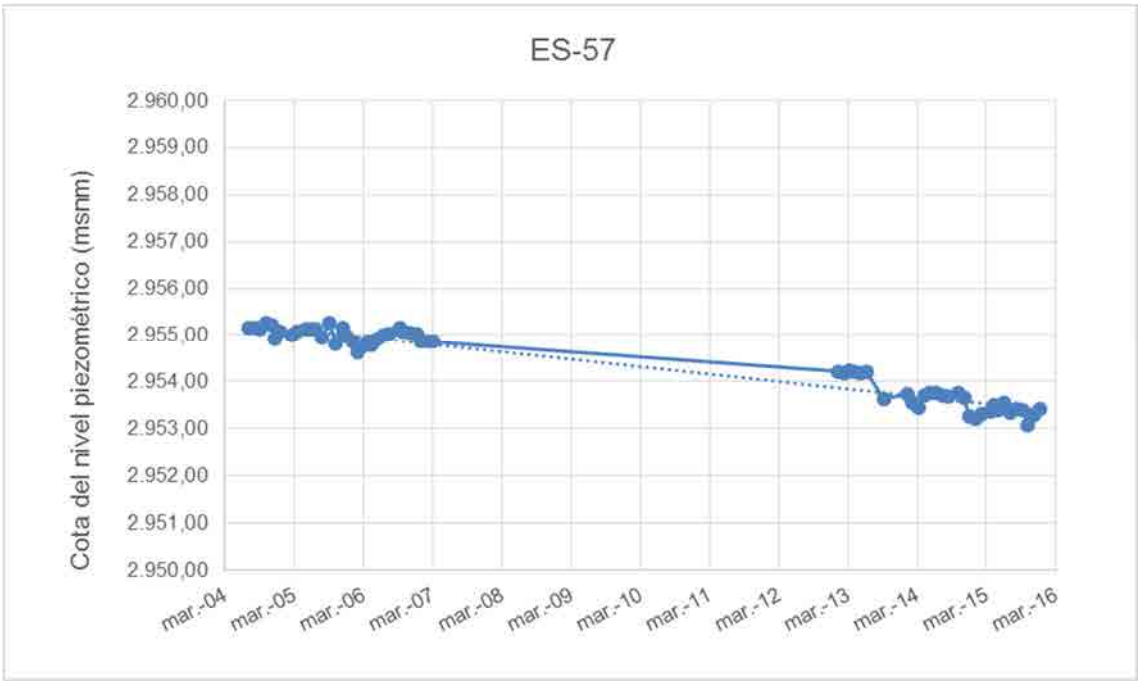


Figura 5-73. Evolución piezométrica del pozo ES-57 (Zona Central SPN). Fuente: modificado de Minera Escondida Ltda.



Figura 5-74. Evolución piezométrica del pozo EX-05 (Zona Central SPN). Fuente: modificado de Minera Escondida Ltda.



Figura 5-75. Evolución piezométrica del pozo PH-42 (Zona Central SPN). Fuente: modificado de Minera Escondida Ltda.



Figura 5-76. Evolución piezométrica del pozo UN-31 (Zona Central SPN). Fuente: modificado de Minera Escondida Ltda.

En los siguientes gráficos de los pozos PH-24 y EX06 la diferencia espacial de cota del nivel piezométrico entre el mínimo y el máximo es de 20 m. En ellos, se observan oscilaciones de niveles debidos al bombeo del Campo de Pozos Central con una tendencia negativa de los niveles más marcada que en los pozos anteriores.



Figura 5-77. Evolución piezométrica del pozo PH-24 (Zona Central SPN). Fuente: modificado de Minera Escondida Ltda.



Figura 5-78. Evolución piezométrica del pozo EX-06 (Zona Central SPN). Fuente: modificado de Minera Escondida Ltda.

Seguidamente se detallan en la **Tabla 5-39** los niveles freáticos donde se presentan los datos desde el mes de julio a diciembre del 2015.

Pozo	jul-04	dic-04	jul-05	dic-05	jul-06	dic-06	jul-14	dic-14	jul-15	dic-15
ES-57	108,14	108,39	108,16	108,34	108,30	108,28	109,60	110,05	109,96	109,89
EX-05	129,44	129,80	129,54	129,57	129,64	129,60	131,01	131,62	131,51	131,35
EX-06	125,55	125,57	125,06	135,13	125,25	131,29	129,85	131,14	129,1	135,45
PH-24	112,50	112,99	112,71	117,21	113,93	117,56	118,72	119,52	116,93	116,23
PH-42	86,24	86,47	86,42	86,75	86,99	87,25	88,28	88,42	88,66	88,77
UN-31	46,22	46,61	46,60	46,80	47,03	47,18	48,62	48,63	48,80	48,80

Tabla 5-39. Niveles estáticos medios mensuales en pozos de Zona Central del SPN (julio 2004-diciembre 2015). Fuente: modificado de Minera Escondida Ltda.

Al igual que en la zona Norte, en base a los datos disponibles, en la siguiente tabla se calcula la variación del nivel (m) observada en estos pozos para 9 períodos semestrales en los años 2004,2005, 2006, 2014 y 2015.

Pozo	jul-04-dic-04	dic-04-jul-05	jul-05-dic-05	dic-05-jul-06	jul-06-dic-06	dic-06-jul-14	jul-14-dic-14	dic-14-jul-15	jul-05-dic-15
ES-57	0,25	-0,23	0,18	-0,04	-0,02	1,32	0,45	-0,09	-0,07
EX-05	0,36	-0,26	0,03	0,06	-0,04	1,41	0,61	-0,11	-0,16
EX-06	0,02	-0,51	10,07	-9,88	6,04	-1,44	1,29	-2,04	6,35
PH-24	0,49	-0,28	4,50	-3,28	3,63	1,16	0,80	-2,59	-0,70
PH-42	0,23	-0,05	0,33	0,24	0,26	1,03	0,14	0,24	0,11
UN-31	0,39	-0,01	0,20	0,23	0,15	1,44	0,01	0,17	0,00

Tabla 5-40. Variación de niveles estáticos semestrales en pozos de Zona Central del SPN (julio 2004-diciembre 2015). Fuente: modificado de Minera Escondida Ltda.

De acuerdo a los resultados obtenidos en la tabla anterior y a los gráficos del registro histórico de los niveles, se resume que:

- Hay una tendencia negativa más suave que en la zona Norte, asociada al Campo de Pozos Central del SPN.
- Los niveles de los pozos localizados en el extremo sur de dicha zona tienden a estabilizarse e incluso a ascender en los últimos años.

Zona Sur del SPN

La **Tabla 5-41** detalla la profundidad del nivel en julio de 2004 y diciembre de 2015, así como la variación del nivel registrada entre ambas fechas.

Pozo	Ubicación	Profundidad Nivel (m)		Variación de nivel (m)
		jul-04	dic-15	
EP-07	Zona Sur SPN	88,68	88,77	-0,09
EP-09	Zona Sur SPN	105,69	105,71	-0,02
EP-11	Zona Sur SPN	80,62	80,62	0,00
EP-13	Zona Sur SPN	81,42	81,34	0,08
EP-15	Zona Sur SPN	83,85	83,82	0,03
ES-40	Zona Sur SPN	40,45	40,44	0,01
ES-58	Zona Sur SPN	54,69	54,71	-0,02
SX-2	Zona Sur SPN	60,25	60,37	-0,12
SX-4	Zona Sur SPN	76,10	76,18	-0,08

Pozo	Ubicación	Profundidad Nivel (m)		Variación de nivel (m)
		jul-04	dic-15	
SX-5	Zona Sur SPN	61,77	61,80	-0,03
SX-7	Zona Sur SPN	97,92	97,92	-0,00
SX-8	Zona Sur SPN	47,98	48,02	-0,04

Tabla 5-41. Variación de niveles estáticos semestrales en pozos de Zona Central del SPN (julio 2004-diciembre 2015). Fuente: modificado de Minera Escondida Ltda.

A continuación, se presentan los gráficos de los históricos de niveles para dichos pozos de observación siendo la diferencia espacial de cota del nivel piezométrico entre el mínimo y el máximo de aproximadamente 1 m.

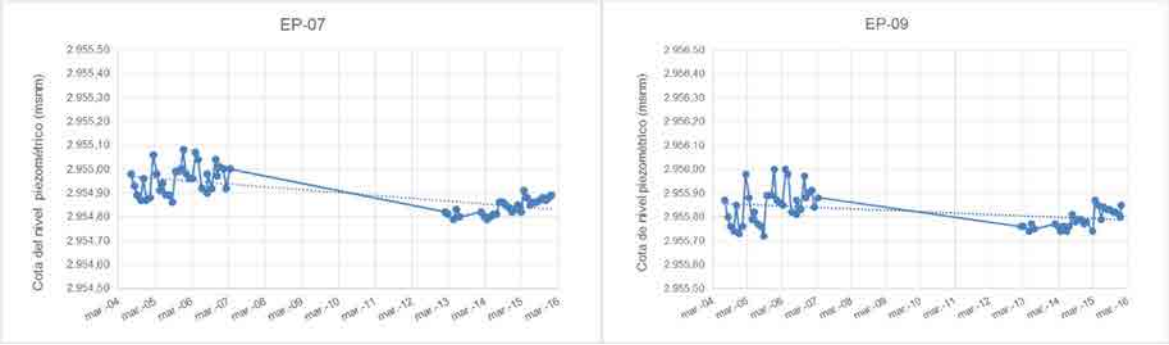


Figura 5-79. Evolución piezométrica en pozos EP-07 y EP-09 (Zona Sur SPN). Fuente: modificado de Minera Escondida Ltda.

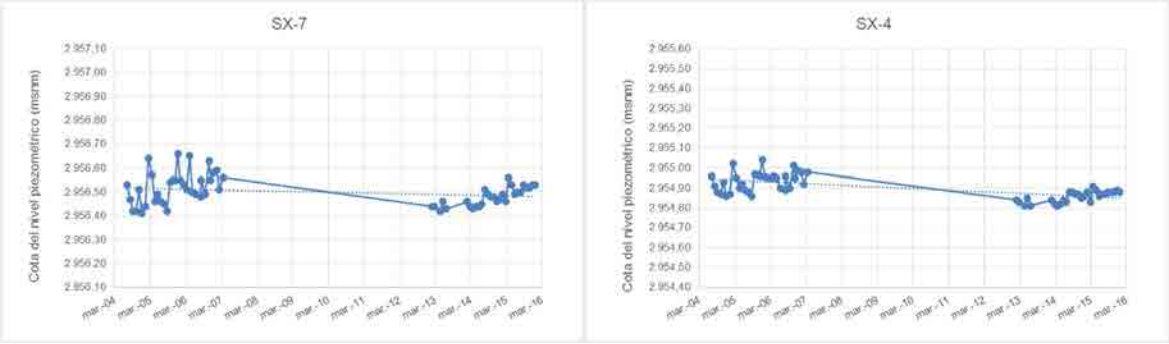


Figura 5-80. Evolución piezométrica en pozos SX-7 y SX-4 (Zona Sur SPN). Fuente: modificado de Minera Escondida Ltda.

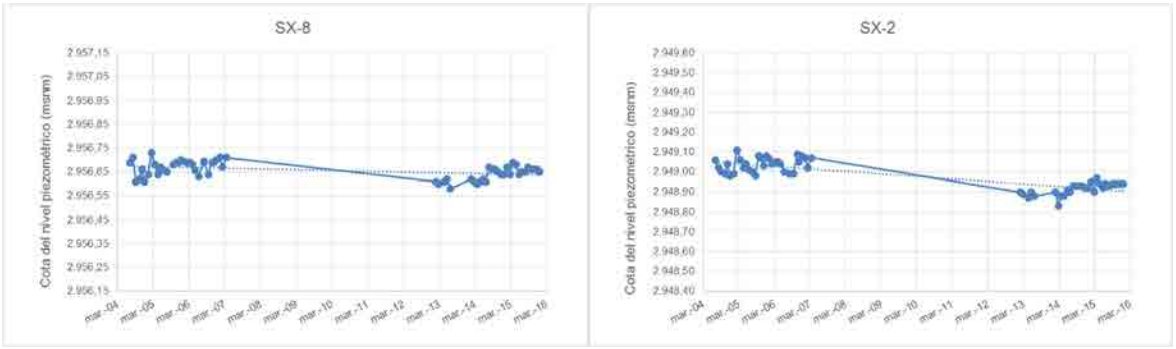


Figura 5-81. Evolución piezométrica en pozos SX-8 y SX-2 (Zona Sur SPN). Fuente: modificado de Minera Escondida Ltda.

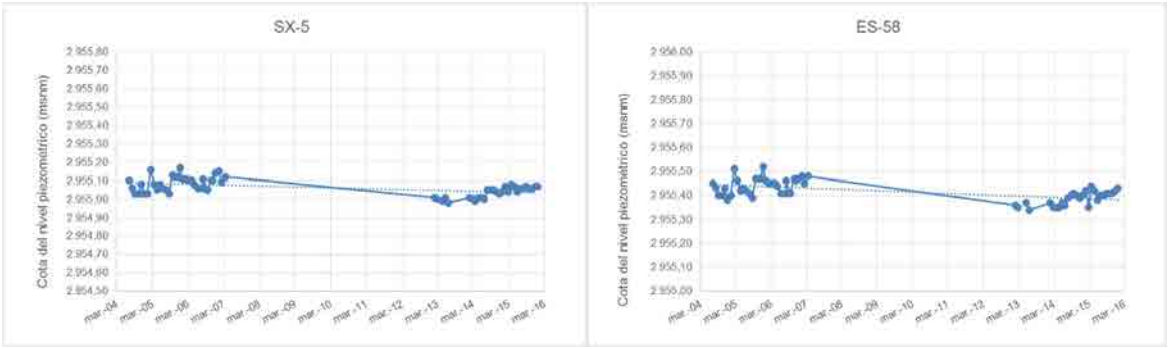


Figura 5-82. Evolución piezométrica en pozos SX-5 y ES-58 (Zona Sur SPN). Fuente: modificado de Minera Escondida Ltda.

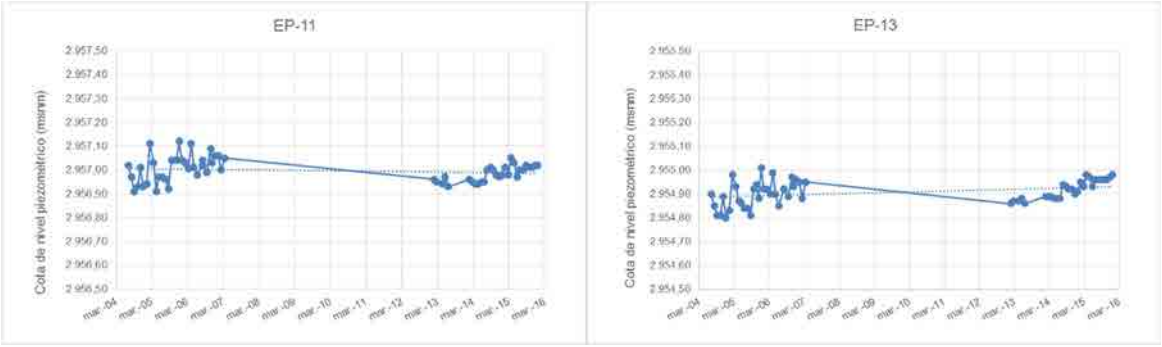


Figura 5-83. Evolución piezométrica en pozos EP-11 y EP-13 (Zona Sur SPN). Fuente: modificado de Minera Escondida Ltda.

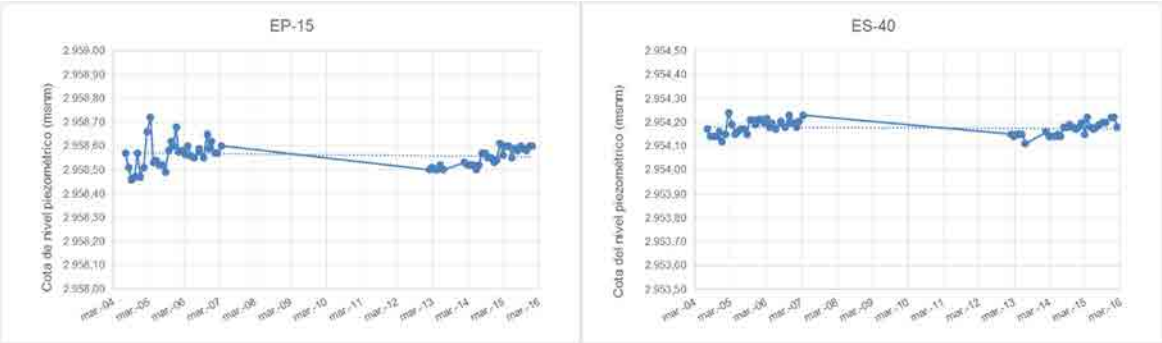


Figura 5-84. Evolución piezométrica en pozos EP-15 y ES-40 (Zona Sur SPN)

En la **Tabla 5-42** se recogen los niveles estáticos desde el mes de julio a diciembre del 2015.

Pozo	jul-04	dic-04	jul-05	dic-05	jul-06	dic-06	jul-14	dic-14	jul-15	dic-15
EP-07	88,68	88,79	88,77	88,58	88,76	88,65	88,80	88,83	88,80	88,77
EP-09	105,69	105,83	105,80	105,56	105,75	105,66	105,75	105,78	105,73	105,71
EP-11	80,62	80,71	80,68	80,52	80,62	80,58	80,64	80,66	80,64	80,62
EP-13	81,42	81,52	81,48	81,31	81,40	81,36	81,38	81,41	81,36	81,34
EP-15	83,85	83,95	83,90	83,74	83,85	83,80	83,85	83,88	83,84	83,82
ES-40	83,85	40,50	40,45	40,41	40,41	40,42	40,44	40,44	40,43	40,4
ES-58	54,69	54,76	54,73	54,62	54,73	54,67	54,75	54,74	54,74	54,71
SX-2	60,25	60,33	60,31	60,23	60,32	60,23	60,38	60,39	60,37	60,37
SX-4	76,10	76,20	76,18	76,02	76,17	76,07	76,18	76,20	76,19	76,18
SX-5	61,77	61,84	61,82	61,70	61,81	61,73	61,82	61,83	61,81	61,80
SX-7	97,92	98,04	98,00	97,79	97,97	97,87	97,94	97,98	97,95	97,92
SX-8	47,98	48,06	48,02	47,97	47,98	47,97	48,00	48,03	48,02	48,02

Tabla 5-42. Niveles estáticos medios mensuales en pozos de Zona Sur del SPN (julio 2004-diciembre 2015). Fuente: modificado de Minera Escondida Ltda.

Igualmente que en las anteriores zonas, en la siguiente tabla se calcula la variación (m) observada en estos pozos para 9 períodos semestrales en los años 2004,2005, 2006, 2014 y 2015.

Pozo	jul-04-dic-04	dic-04-jul-05	jul-05-dic-05	dic-05-jul-06	jul-06-dic-06	dic-06-jul-14	jul-14-dic-14	dic-14-jul-15	jul-05-dic-15
EP-07	0,11	-0,02	-0,19	0,18	-0,11	0,15	0,03	-0,03	-0,03
EP-09	0,14	-0,03	-0,24	0,19	-0,09	0,09	0,03	-0,05	-0,02
EP-11	0,09	-0,03	-0,16	0,10	-0,04	0,06	0,02	-0,02	-0,02
EP-13	0,10	-0,04	-0,17	0,09	-0,04	0,02	0,03	-0,05	-0,02
EP-15	0,10	-0,05	-0,16	0,10	-0,04	0,05	0,03	-0,04	-0,02
ES-40	-43,35	-0,05	-0,04	0,01	0,00	0,02	0,00	-0,01	-0,03
ES-58	0,07	-0,03	-0,11	0,11	-0,06	0,08	-0,01	0,00	-0,03
SX-2	0,08	-0,02	-0,08	0,09	-0,09	0,15	0,01	-0,02	0,00
SX-4	0,10	-0,02	-0,16	0,15	-0,10	0,11	0,02	-0,01	-0,01
SX-5	0,07	-0,02	-0,12	0,11	-0,08	0,09	0,01	-0,02	-0,01
SX-7	0,12	-0,04	-0,21	0,18	-0,10	0,07	0,04	-0,03	-0,03
SX-8	0,08	-0,04	-0,05	0,01	-0,01	0,03	0,03	-0,01	0,00

Tabla 5-43. Variación de niveles estáticos semestrales en pozos de Zona Sur del SPN (julio 2004-diciembre 2015). Fuente: modificado de Minera Escondida Ltda.

Según los resultados obtenidos en la tabla anterior y a los gráficos del registro histórico de los niveles, se detecta:

- Una tendencia a la estabilización de los niveles, se registran pocas oscilaciones.
- En algunos pozos los niveles freáticos de los pozos ascienden, a escala centimétrica, debidas a las fluctuaciones producto de la recarga interanual.
- No se aprecia afección por conos de bombeo en esta zona.

Por tanto, según nos alejamos de los campos de Pozos Norte y Central, es decir, los niveles de los pozos localizados en el extremo sur y norte del acuífero SPN tienden a estabilizarse e incluso a ascender en los últimos años.

5.7.5 PARÁMETROS ELÁSTICOS

Resulta de especial interés establecer de manera precisa los parámetros elásticos del acuífero, ya que son determinantes en los flujos subterráneos y su correcta fijación es indispensable para obtener un buen ajuste en los resultados del modelo numérico, y que tanto las evaluaciones del flujo de agua subterránea, como la definición del funcionamiento hidrogeológico del acuífero reproduzcan el modelo físico y sean suficientemente fiables.

Los parámetros elásticos, transmisividad y coeficiente de almacenamiento, sólo se obtienen de la interpretación de ensayos de bombeo y cuando no existen, o son escasos, es habitual utilizar aproximaciones basadas en el caudal específico del pozo, como la Thiem o Galofré, donde también intervienen otros factores, como depresiones asociadas a pérdidas de carga en el pozo y zona próxima del acuífero, que pueden desviar notablemente los valores respecto a los reales, por lo que siempre deben estar contrastados o utilizarse como referencias, pero no como valores únicos.

En el caso que nos ocupa, dichos parámetros se han obtenido tras la interpretación de las pruebas de bombeo existentes en los pozos situados en el acuífero de estudio.

Sobre los datos de descensos del nivel de agua en función del tiempo y para un régimen de caudal conocido, se ha realizado un ajuste mediante la aplicación PIBE 2.0, a partir de la cual se obtienen datos de transmisividad (T), coeficiente de almacenamiento y/ o porosidad (S), coeficiente de goteo (B), etc., siendo estos dos últimos valores de referencia, con menor fiabilidad que el valor de transmisividad, ya que para su obtención se requiere de ensayos de bombeo con puntos de observación diferentes al propio en el cual se realiza el bombeo, pero, puesto que el software empleado tiene en cuenta el régimen transitorio del ensayo, éstos pueden ser obtenidos como orden de magnitud.

Asimismo, esta aplicación reproduce una curva de descensos teórica y la ajusta en sucesivas iteraciones a la experimental, mostrando finalmente el resultado, como se muestra en la siguiente figura obtenida del pozo ND-0401-381, donde los puntos son los datos experimentales y la línea continua el descenso calculado.

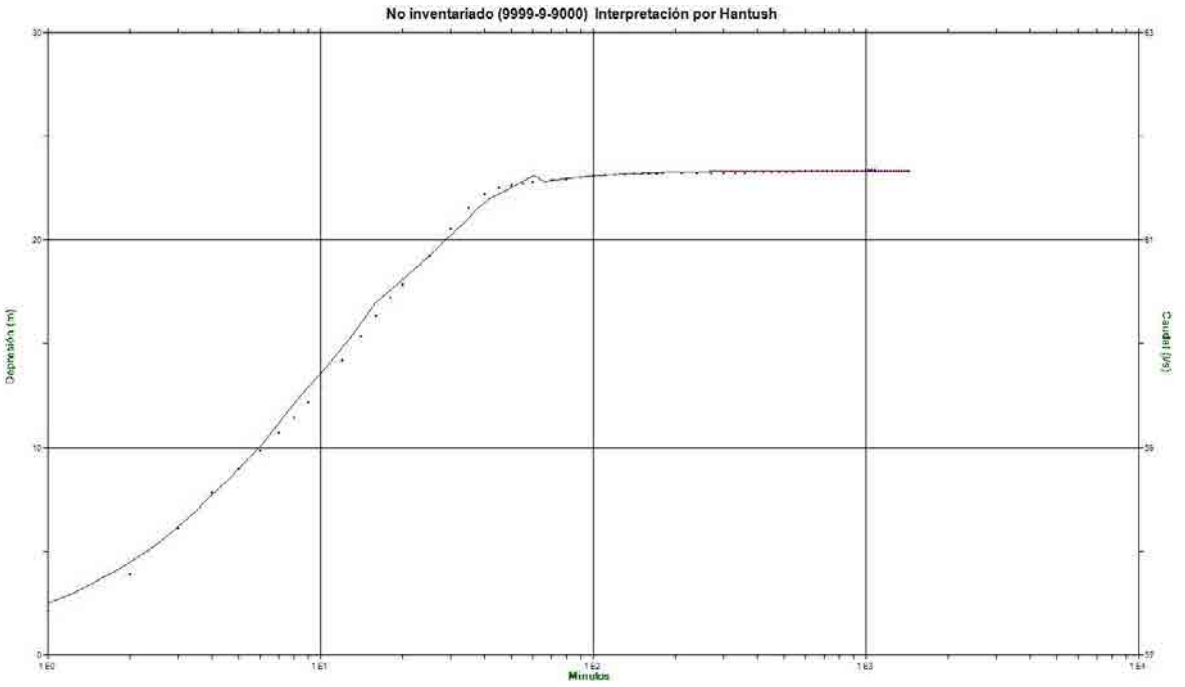


Figura 5-85. Interpretación de una prueba de bombeo en el pozo ND-0401-381

El programa considera, igualmente, la posibilidad de aportación de agua desde niveles de reducida permeabilidad (acuitardos) en función del potencial hidráulico.

De forma complementaria se han interpretado las curvas de recuperación de las pruebas de bombeo mediante el ajuste a una recta, y en función del caudal bombeado y la pendiente de la recta se obtiene la transmisividad.

Se han interpretado 15 ensayos de bombeo en el acuífero de estudio, de los cuales de la mayoría (10) solo se disponía de información para interpretar la recuperación. Los valores de transmisividad obtenidos son muy variables, desde 0,26 m^2/d hasta cerca de los 980 m^2/d.

Respecto a los coeficientes de almacenamiento calculados, solo se han obtenido a partir de los ensayos de bombeo y no de los de recuperación. Los métodos de cálculo han variado en función del tipo de ensayo, tratando de emplear el que mejor se ajustara a cada caso (Theis, Hantush y Newman).

En la **Tabla 5-44** se presentan los resultados de los ensayos realizados y en el **Anexo 5 Interpretación de ensayos de bombeo** se incluyen las gráficas de los ensayos interpretados.

Expediente	Pozo	Ensayo	Trans. (m^2/d)	Coordenadas (WGS 1984 Huso 19S)	
				Norte (m)	Este (m)
ND-0103-188	ES-46	Recuperación	29,00	7.258.160,36	502.104,11
ND-0103-188	ES-38	Recuperación	980,00	7.265.658,57	457.223,93
ND-0103-188	ES-19	Recuperación	20,00	7.340.768,78	530.044,95
ND-0103-188	ES-17	Recuperación	4,00	7.337.338,57	529.702,61
ND-0103-188	ES-14	Recuperación	26,00	7.326.062,59	523.449,97
ND-0103-188	ES-13	Recuperación	14,00	7.335.966,66	529.619,59
ND-0103-188	ES-11	Recuperación	16,00	7.327.733,79	523.096,09
ND-0103-188	ES-09	Recuperación	19,00	7.275.867,44	511.719,70
ND-0103-188	ES-07	Recuperación	20,00	7.291.502,42	520.200,02
ND-0103-188	ES-04	Recuperación	18,00	7.293.634,73	511.958,75
ND-0203-604	SX-9	Escalonado	121,34	7.265.527,00	506.506,00
ND-0203-604	SX-9	Constante	117,98	7.265.527,00	506.506,00
ND-0203-694	PC-2	Constante	0,26	7.301.996,00	521.934,00
ND-0203-695	PC-1	Constante	167,70	7.314.777,00	522.086,00
ND-0203-2386	PC-2	Constante	1,11	7.252.000,00	502.000,00

Tabla 5-44. Parámetros elásticos obtenidos. Fuente: modificado de Minera Escondida Ltda.

Los valores obtenidos, son, en líneas generales, del orden de magnitud, que los consultados en bibliografía:

Pozo	Y	X	Cota (msnm)	Prof. (m)	Trans. (m^2/d)	S	Fuente información
T-1	7.284.703	513.023	3.033,15	186,7	249,60	0,13	Álamos y Peralta Ingenieros. 1987
T-2	7.307.628	514.024	3.016,45	107,4	229,68	0,08	
T-3	7.302.036	511.847	2.985,44	128,1	282,00	0,0004	
T-4	7.295.288	514.785	3.039,26	189,1	275,76	0,20	
T-5	7.258.135	502.077	3.088,28	204,4	199,68	0,10	

Tabla 5-45. Parámetros elásticos bibliográficos. Fuente: modificado de Álamos y Peralta Ingenieros. 1987

La ubicación y los valores obtenidos se presentan en las figuras siguientes:

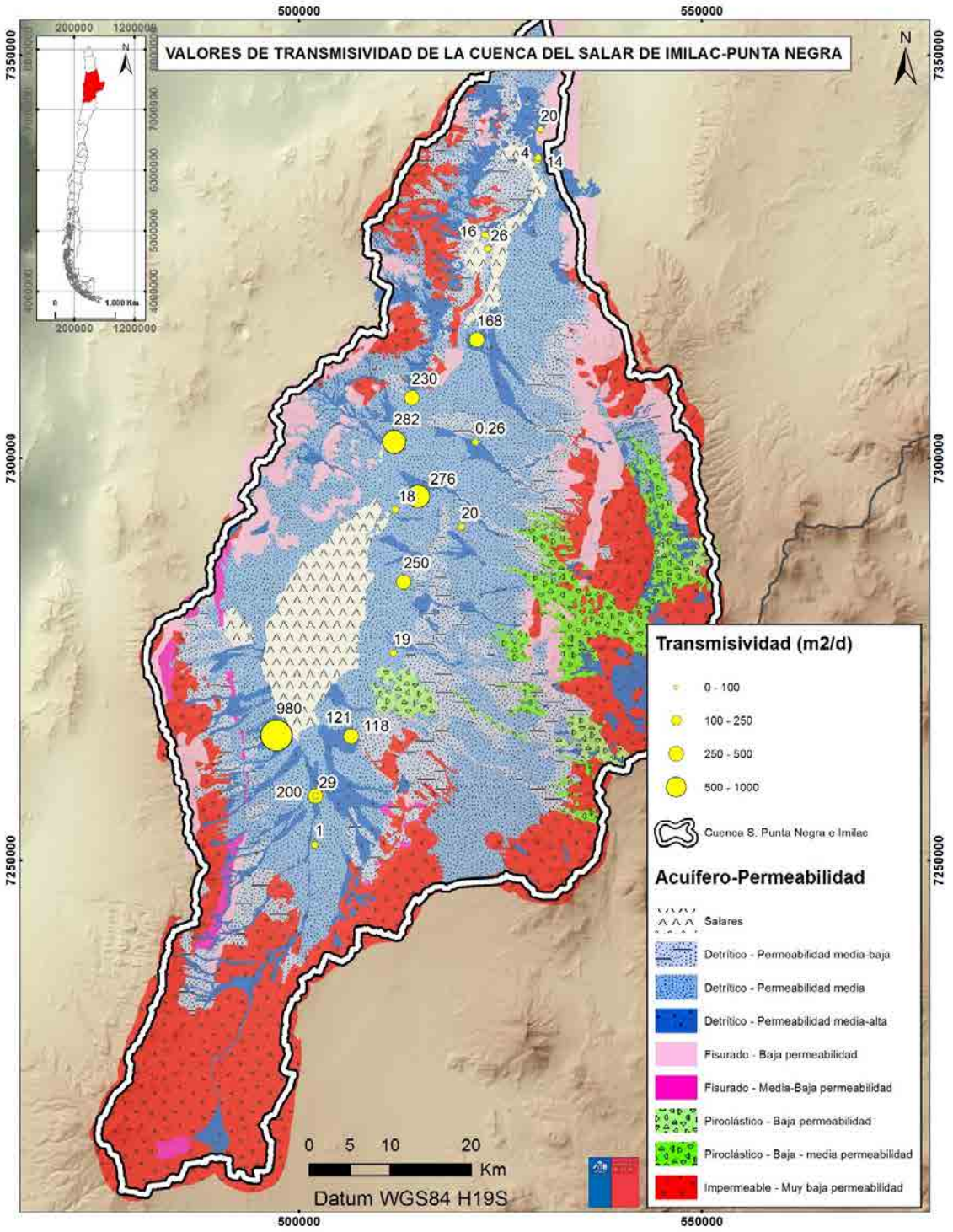


Figura 5-86. Ubicación de ensayos de bombeo interpretados y valores de transmisividad. Fuente: Elaboración propia

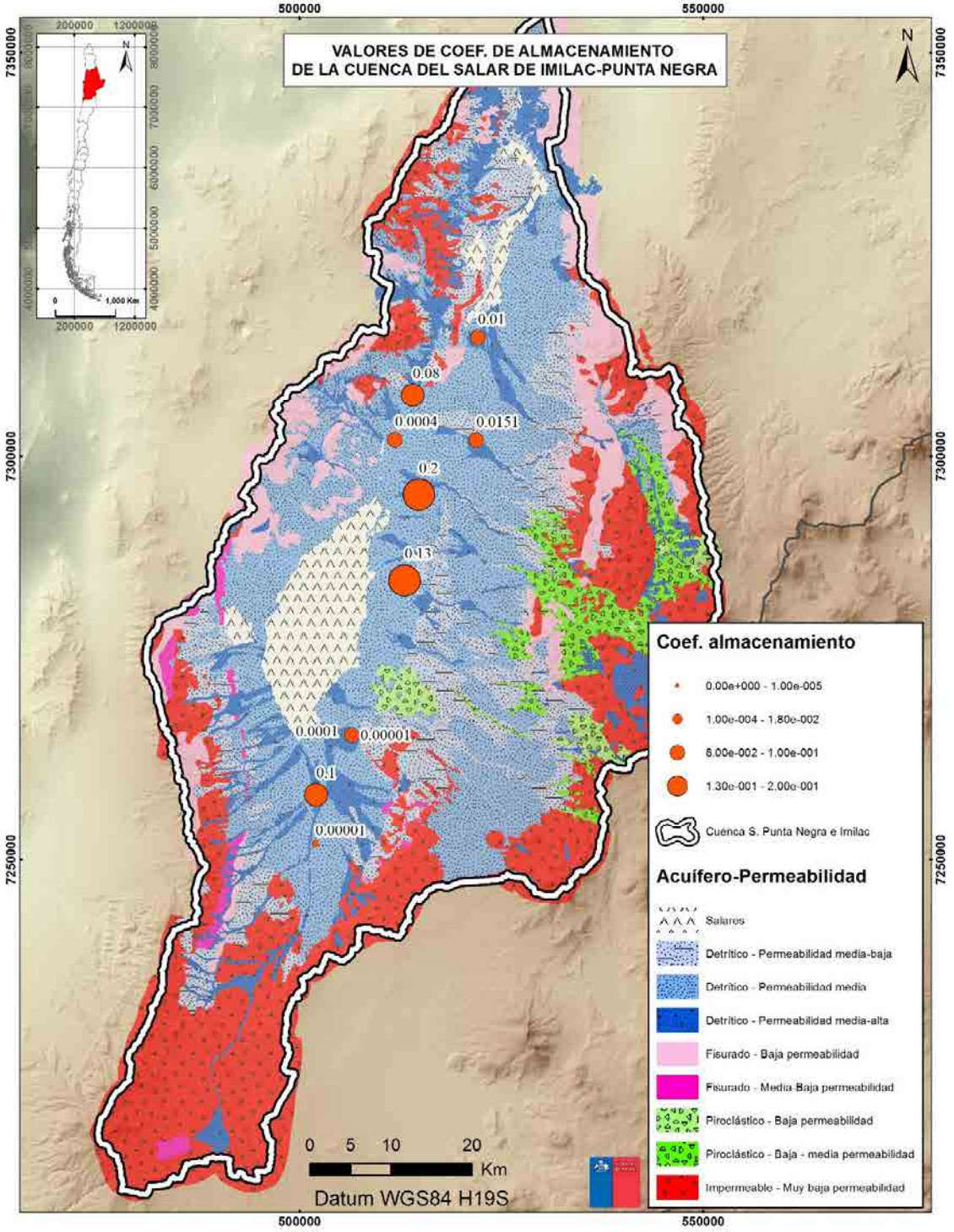


Figura 5-87. Ubicación de ensayos de bombeo interpretados y valores de coeficiente de almacenamiento. Fuente: Elaboración propia

5.8 MODELO CONCEPTUAL

La subcuenca del Salar de Imilac - Punta Negra tiene una superficie de 5.308 km^2 y una situación geográfica pre-andina en la II Región de Chile, en un contexto climático de aridez extrema. Morfológicamente, la cuenca tiene mayor longitud en dirección N-S y está delimitada por dos importantes cordones montañosos a E y W: cordillera de los Andes y cordillera Domeyko. En el depocentro de la cuenca se encuentra la superficie de salar, una amplia zona de sedimentos clásticos y evaporíticos.

Este **modelo conceptual** presenta un análisis, del funcionamiento e interacción de las aguas superficiales y subterráneas, inferida a partir de los antecedentes disponibles.

5.8.1 HIDROLOGÍA

En este numeral, se presenta un resumen de los parámetros relacionados con la hidrología, tales como son la precipitación, temperatura y evaporación.

El detalle del análisis de cada uno de estos parámetros, a partir de los datos de las estaciones meteorológicas, se puede encontrar en el **numeral 5.4**.

Con respecto al análisis de la información existente de las estaciones de precipitación en el entorno de la cuenca de estudio, se deduce que la precipitación en la cuenca de estudio muestra una marcada estacionalidad, produciéndose durante los meses de verano por la entrada de frentes de bajas presiones que se manifiestan en forma de lluvia y nieve en la cordillera. El resto del año corresponde a una época seca con muy escasa precipitación.

La comparación de la precipitación media anual con la altitud de cada estación muestra que existe un gradiente altitudinal, donde la precipitación aumenta 4,025 mm por cada 100 m de altitud.

El cálculo de la distribución de precipitaciones sobre la cuenca se realizó mediante la aplicación del gradiente altitudinal de precipitaciones al modelo digital del terreno, generando líneas isoyetas y polígonos de precipitación a través de los cuales se determinó una precipitación total para el área de estudio de 350 hm^3, equivalente a 11.098 L/s.

La distribución espacial de precipitaciones muestra que las mayores precipitaciones se producen en las zonas altas sobre los depósitos de origen volcánico de la cordillera de los Andes, mientras que, en las zonas de menor altitud, las precipitaciones son muy bajas, alcanzándose valores mínimos de en torno a 40 – 50 mm/año en el área del salar de Punta Negra.

El análisis de temperaturas se realizó así mismo en base a datos de estaciones situadas en el salar de Atacama. A modo de resumen, la comparación de la temperatura media anual con la altitud de las estaciones muestra que la temperatura media anual disminuye con la altura, en un gradiente de -0,81°C por cada 100 m de altitud, esto hace que las mayores temperaturas se encuentren en el área del salar de Punta Negra (En torno a 12°C) y las menores temperaturas en las cimas de las montañas de la cordillera de los Andes, con mínimos de -13°C en la cima del volcán LLullaillaco.

Con respecto a la variación temporal, las temperaturas muestran un comportamiento bastante similar a las precipitaciones, con máximos en los meses de verano (diciembre – febrero) y mínimos en invierno (junio - agosto).

Respecto al recurso hídrico superficial, las aguas superficiales escurren sobre los depósitos ubicados a mayor altura hasta encontrarse con materiales detríticos, donde terminan por infiltrarse, y solo durante eventos extremos, el agua de las quebradas llega hasta el salar.

La infiltración de la cuenca objeto se estimó en base a un balance de cloruros, tal y como se explica en el **numeral 5.9.2.1**, el valor obtenido índica que la infiltración varía entre un 0,5 y un 5% de la precipitación total. En estudios anteriores de evapotranspiración e infiltración en climas áridos, en concreto las estimaciones realizadas en Houston (2007), ROCKWOOD LITHIUM (2015) y UAA-ROCKWOOD (2015) en el Salar de Atacama y la cuenca de Turi, también en la II Región de Chile, se estiman rangos de evapotranspiración similares.

5.8.2 GEOLOGÍA

La cuenca de estudio (Salar Imilac-Punta Negra) se compone de dos salares de similares características desde el punto de vista de la génesis, y por tanto, también desde el punto de vista geológico, no obstante, conforman geometrías y espesores acuíferos distintos.

Ambos salares, ubicados en una depresión de origen tectónico entre la cordillera Andina y la cordillera de Domeyko, se formaron a partir de los continuos procesos de evaporación que tienen lugar en la zona más deprimida de la cuenca. Dicha cuenca está controlada por fallas normales de dirección preferencial N-S, con componentes secundarios SE-NO. Alrededor del salar de Punta Negra se generó una planicie casi horizontal de estratos de arcilla y arenas irregularmente depositadas.

En el sector norte del salar afloran rocas paleozoicas volcanoclásticas y depósitos coluviales y aluviales antiguos, intercalados con afloramientos graníticos terciarios.

La zona del salar propiamente tal, se encuentra rellena de sedimentos terciarios y cuaternarios incluyendo los depósitos de sulfatos y cloruros de su interior, que se espacializan como sedimentos muy finos mezclados con capas salinas, que en general sin material grueso excepto algunas lenguas de conglomerados con materiales clásticos gruesos. Al este de la cuenca, existen rocas efusivas y al oeste sedimentos, rocas ígneas y volcánicas pre-terciarias.

5.8.3 HIDROGEOLOGÍA

El funcionamiento conceptual de la cuenca salar Imilac y salar de Punta Negra tiene un comportamiento típico de una cuenca endorreica. Como se ha explicado anteriormente, la recarga de los acuíferos formados por los depósitos aluviales colindantes al salar, se produce por percolación directa de las precipitaciones ocurrentes en la misma cuenca, así como por la infiltración a lo largo de su recorrido de cursos superficiales eventuales así como por la infiltración proveniente del derretimiento de precipitación sólida en las zonas altas de la cordillera de los Andes.

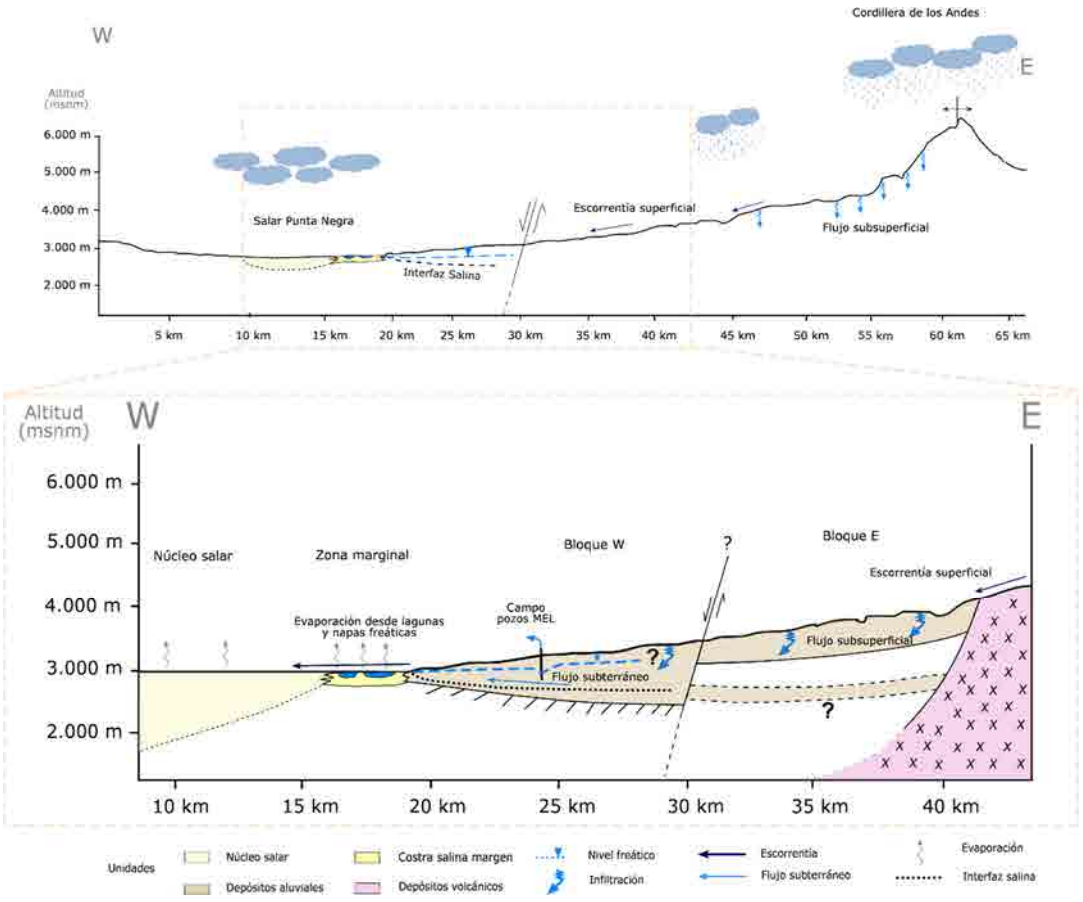


Figura 5-88. Esquema conceptual del funcionamiento del salar de Punta Negra con el ciclo del agua desde la precipitación en la cordillera de los Andes hasta su evaporación al aproximarse al salar. Fuente: elaboración propia.

En el caso del núcleo del salar, su alimentación proviene principalmente desde el acuífero aluvial del margen este, aunque también recibe en menor medida de otros acuíferos aledaños como de precipitación directa sobre el salar.

El agua del acuífero aluvial, fluye de mayor a menor altura piezométrica hasta llegar al margen del salar donde entra el contacto con el acuífero salino. La zona de contacto entre ambas masas de agua se conoce como interfaz salina. En este punto, el agua dulce por diferencia de densidad, en algunos puntos asciende a la superficie formando una serie de lagunas de gran importancia ecológica (**Figura 5-89**).

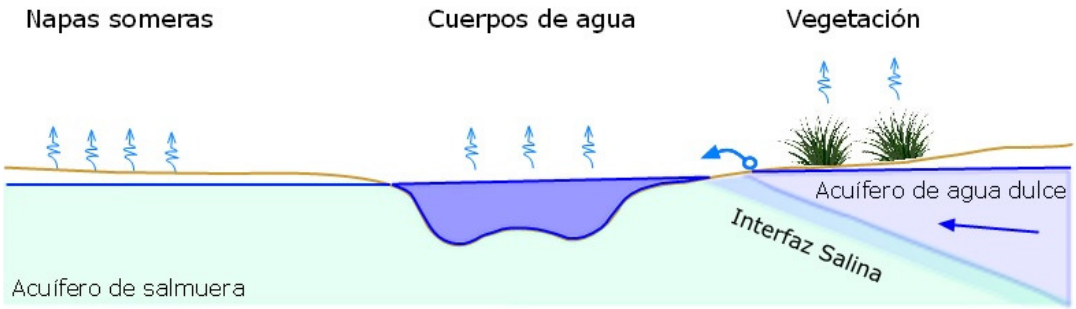


Figura 5-89. Modelo conceptual del funcionamiento del margen de un salar. Fuente: elaboración propia.

Las aguas de la zona marginal del salar están sujetas a una fuerte evaporación, tanto las de carácter superficial como las de carácter subterráneo (napas más próximas a la superficie). La evaporación y evapotranspiración, además de ser la única salida natural reconocida del sistema al tratarse de una cuenca endorreica, producen un importante cambio en la química de las aguas definiendo la vía evolutiva futura.

Los depósitos aluviales tienen una continuidad N-S extendiéndose a lo largo de las dos cuencas formando un único acuífero con una divisoria de aguas subterránea entre ambas cuencas. Si bien la presencia de una divisoria de aguas podría interpretarse como la división entre dos acuíferos, dada la intensa explotación del recurso hídrico que se da en la zona, la alteración de la piezometría en la cuenca del salar de Punta Negra, con el tiempo podría interferir en la cuenca del salar de Imilac.

Hidrogeológicamente se distinguen cuatro tipos de formaciones (ver **Figura 5-53**):

Basamento impermeable formado por materiales consolidados, formados por rocas que raramente conforman acuífero.

Piroclastos de baja permeabilidad y de media-baja permeabilidad, en función del grado de consolidación de los mismos.

Formaciones fisuradas que pueden comportarse como acuíferos en función del grado de fisuración que tengan.

Detríticos los cuales conforman el acuífero principal y de mayor extensión de la zona de estudio.

Acuífero aluvial del salar de Punta Negra

El acuífero aluvial (detrítico) del salar de Punta Negra tiene un espesor en su parte central de aproximadamente 1.000 m y está formado por dos unidades, un bloque E y un bloque W divididos por una falla con orientación N-S (**Figura 5-90**).

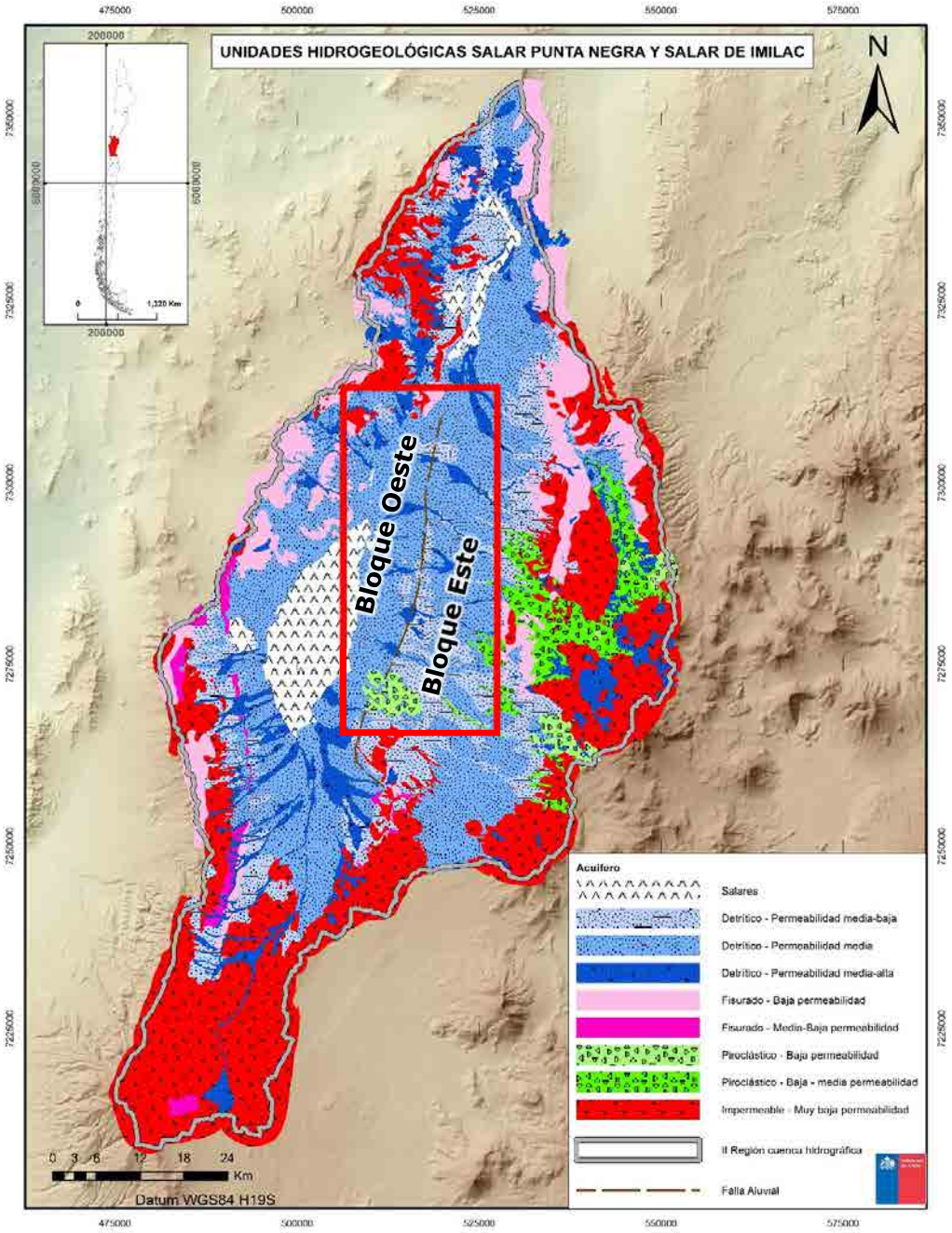


Figura 5-90. Detalle del acuífero aluvial del salar de Punta Negra. Fuente: Elaboración propia.

El flujo subterráneo en la cuenca del salar de Punta Negra se desplaza principalmente de este a oeste. Según la piezometría, elaborada a partir de los perfiles geofísicos, se observa un salto significativo en la piezometría coincidiendo con la falla. Este hecho corroboraría la existencia de dos bloques separados por la falla. La piezometría en el Bloque Este presenta una morfología continua, representativa de un régimen natural. Por el contrario en el Bloque Oeste, debido a la intensa explotación, la piezometría está condicionada por la presencia de los campos de pozos. Existen dos campos de pozos, sector norte y sector centro, el primero con una caudal de extracción mayor genera un cono de depresión más pronunciado que el campo de pozos del sector central.

En el sector sur de la cuenca, al no haber pozos de bombeo, la piezometría muestra un régimen natural con un flujo convergente con orientación S-N.

En base al análisis realizado a partir de los pozos de Minera Escondida Ltda, la evolución temporal de los niveles freáticos entre 2004 y 2015 muestra una tendencia variable según la zona del acuífero. Los pozos del sector norte, registra una tendencia decreciente que en algunos pozos se ha llegado a registrar de 18 m durante el periodo descrito. En el sector central se ha registrado un descenso menor de entre 2 m y 3 m de descenso según el pozo. Por el contrario en el sector sur, al no haber bombeo, el nivel en los pozos se ha mantenido constante con pequeñas variaciones de +/- 0,1 m.

Respecto a las características hidráulicas del acuífero, las transmisividades calculadas son muy variadas con valores entre 0,26 m^2/d y 980 m^2/d lo que muestra que el acuífero del salar de Punta Negra es heterogéneo.

Acuífero aluvial del salar Imilac

El acuífero aluvial del salar de Imilac tiene un espesor en su parte sur de aproximadamente 400 m. El flujo subterráneo preferencial en la cuenca proviene de la quebrada Guanaqueros y tiene una orientación SE-NO. El acuífero también se propaga hacia el N por el lado este del salar aportando agua al salar central. En el salar central el agua subterránea se desplaza en sentido S-N hasta la zona más deprimida del salar ubicada al norte.

El salar ubicado al SO presenta una piezometría concéntrica en torno su parte más deprimida en el centro del salar.

5.8.4 DETERMINACIÓN DE SHAC

Como ya se ha comentado en el modelo conceptual, en la zona de estudio se observa una divisoria de aguas superficiales entre la cuenca del salar de Imilac y el salar de Punta Negra, sin embargo, con los datos de los que se dispone actualmente no se puede asegurar que subterráneamente exista discontinuidad entre los acuíferos aluviales de ambas cuencas, por lo que se ha decidido considerar estos acuíferos como un único SHAC, el cual incluye el acuífero detrítico y los acuíferos salinos que se encuentran dentro de la cuenca. La distribución de dichos acuíferos en superficie se muestra en la **Figura 5-53.** Se excluyen del SHAC las formaciones que rodean el acuífero aluvial, las cuales, en su mayor parte se han considerado como basamento impermeable, y si bien es cierto que en algunos casos pueden comportarse como acuífero fisurado, estos son de baja permeabilidad tal y como se explica en el **numeral 5.7.**

5.9 BALANCE HÍDRICO

5.9.1 DEFINICIÓN DE BALANCE HÍDRICO

El balance hídrico se basa en el principio de conservación de la masa, estableciéndose que para un determinado sistema, la variación en el almacenamiento será igual a las entradas menos las salidas:

Variación de Almacenamiento = Entradas – Salidas

Si las entradas son iguales a las salidas, la variación en el almacenamiento es igual a 0, en esos casos se dice que el sistema está en equilibrio.

Si las entradas son superiores a las salidas, la variación en el almacenamiento será positiva, lo que indica que el almacenamiento de ese sistema está aumentando.

En caso contrario, cuando las salidas son superiores a las entradas, la variación en el almacenamiento será negativa, lo cual indica que el almacenamiento está en proceso de disminución.

Para poder acotar cuáles serán las entradas y salidas, primero se debe definir el sistema sobre el cual se calcula el balance. Los **balances se pueden realizar a diferentes niveles** en función del interés del proyecto. En este caso se realizará a **nivel de SHAC** con el objetivo de evaluar el estado actual de las reservas hídricas de éste. En concreto el balance se realizará a nivel del acuífero aluvial y el acuífero salino que interactúa de forma directa con él. No se tendrán en cuenta otros posibles acuíferos asociados a rocas ígneas.

En la **Figura 5-91** se presenta un esquema tipo del funcionamiento conceptual del salar de Punta Negra y salar de Imilac con las componentes que conforman el balance hídrico.

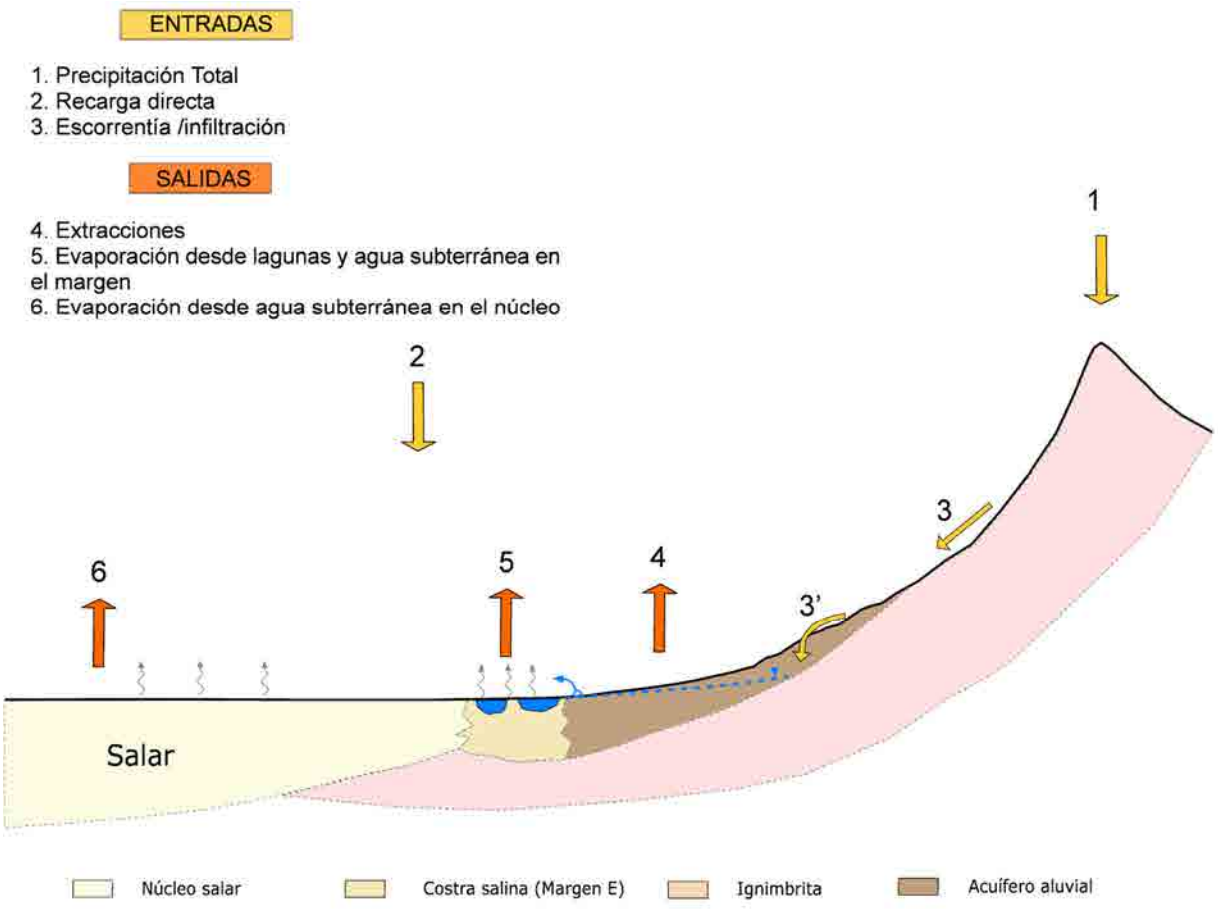


Figura 5-91. Funcionamiento conceptual y componentes del balance hídrico en salar de Punta Negra y salar de Imilac. Fuente: Elaboración propia.

La construcción del balance hídrico se ha realizado en base a las serie de datos de las estaciones meteorológicas, la información recabada en terreno y de los antecedentes revisados.

Las cuencas hidrográficas del salar de Punta negra y salar de Imilac están separadas por una elevación, no obstante según se muestra en el **numeral 5.7.3** ambas cuencas sí están conectadas subterráneamente. Actualmente existe una divisoria de aguas subterránea pero ésta no tiene por qué mantenerse en el futuro, debido a que ambas cuencas tienen una continuidad hidrogeológica. Factores como el bombeo de pozos o cambios en el régimen de precipitaciones podrían alterar el equilibrio actual u hacer que esta divisoria de aguas desapareciera. Por este motivo se ha **calculado el balance para ambas cuencas conjuntas ya que se propone que comparten un único acuífero**.

De forma general, los distintos tipos de entradas y salidas que puedan encontrarse en un acuífero con las características del salar de Punta negra y salar de Imilac son los siguientes:

Entradas	Salidas
- Recarga directa por precipitación - Aportes laterales subterráneos - Recarga desde cursos superficiales - Retorno de agua de riego	- Extracciones - Descargas a cursos superficiales - Evapotranspiración - Descargas laterales subterráneas

Tabla 5-46. Entradas y salidas en un sistema acuífero. Fuente: Elaboración propia.

A continuación se definen cada uno de estos tipos de entradas y salidas para el caso de la zona de estudio.

5.9.2 BALANCE HÍDRICO DEL ACUÍFERO

5.9.2.1 ENTRADAS

Recarga directa por precipitación

Se trata de toda la recarga del acuífero, la cual es producida por la infiltración de agua de lluvia sobre las zonas de recarga. Representa un porcentaje de la precipitación total, el resto del volumen precipitado sufrirá procesos de evaporación, transpiración o escorrentía superficial, antes de infiltrar y pasar a formar parte del agua subterránea.

Como ya se ha comentado en numerales anteriores, para el caso del área de estudio se considera que de toda la precipitación caída sobre la cuenca, una parte se evapotranspira y la otra parte o bien se infiltra directamente al subsuelo o bien escurre superficialmente para más tarde infiltrarse cuando los cauces hacen contacto con el acuífero aluvial, esto indica que toda la precipitación que no se evapotranspira acaba conformando la recarga del SHAC. Debido a lo anterior se ha considerado como entrada toda la precipitación caída sobre la cuenca, independientemente de que esta haya precipitado directamente los el acuífero aluvial o sobre el material encajante.

La recarga directa por precipitación fue definida en base al método de balance de cloruros. Este método consiste en comparar las concentraciones de cloruro en el agua de lluvia y en el agua del acuífero, suponiendo que una vez el agua de lluvia alcanza el terreno, se produce una evaporación y concentración de este ion.

Este método se aplica bajo el supuesto de que el agua de lluvia es el único componente de ion cloruro, sin tener en cuenta otras posibles fuentes presentes en el terreno, como la disolución de sales cloruradas. Cabe destacar, que en el presente informe este método se aplica en la zona aluvial de la cuenca, antes del que el agua subterránea llegue a los materiales salinos que forman los salares de la zona de estudio.

La relación entre la concentración de ion cloruro en la lluvia con respecto a la concentración de ion cloruro del agua en al acuífero, se establece por mediante la siguiente ecuación:

$$R \cdot \ Clac = P \cdot Clp - E \cdot Ce + As - Av + Av'$$

Donde:

R - Recarga por precipitación (mm/año)

P - Precipitación media (mm/año)

E - Escorrentía superficial media (mm/año)

Clp - Concentración de cloruro en las precipitaciones (mg/L)

Clac – Concentración de cloruro en el agua del acuífero (mg/L)

As - Otros aportes de cloruro (Por aporte del suelo o aportados artificialmente (g/m2·año)

Av – Tasa de cloruro utilizado por la vegetación (g/m^2·año)

Av’ – Retorno de cloruro del suelo al morir la vegetación (g/m^2·año)

Ce – Concentración de cloruro en la escorrentía.

La aplicación de esta ecuación general al caso particular del salar de punta Negra, se ha realizado bajo el supuesto de que la tasa de cloruro tomada por la vegetación es similar a la que la vegetación vuelve a aportar al suelo al morir, por lo que los términos Av y Av’ han sido aproximados a 0, además debido a que en la zona de estudio, los cursos de agua superficiales son muy escasos y de bajo caudal se ha despreciado el término Ce, por lo tanto la ecuación fue simplificada a:

$$R \cdot Clac = P \cdot Clp$$

La concentración de cloruro en la precipitación ha sido obtenida de (ROCKWOOD LITHIUM, 2015) los cuales utilizan una concentración en 8 mg/L para el agua de lluvia en el salar de Atacama en base a mediciones realizadas en (UAA-ROCKWOOD, 2015).

La concentración en el agua del acuífero ha sido obtenida de (CORFO-ONU-DGA-CCC, 1977) en el que citan la concentración en cloruros de las muestras del acuífero aluvial entre 149 y 1.598 mg/L.

Aplicando la ecuación de balance de cloruros para estos valores límites se obtiene que la recarga efectiva por precipitación es de entre 56 L/s y los 595 L/s, equivalente a un 0,5% y el 5,3% de la precipitación total en la cuenca.

Los valores de recarga obtenidos han sido comparados con los valores obtenidos en estudios anteriores, especialmente con los que muestran en el estudio (ROCKWOOD LITHIUM, 2015), en el cual se estima la recarga por precipitación total en la cuenca del salar de Atacama entre un 3,5% y un 4,1% en función del sector de la cuenca, además se presenta una revisión reciente de antecedentes de infiltración en zonas áridas, mencionando a su vez los siguientes estudios:

- Bazuhair and Wood, 1996. "Chloride mass balance method for estimating ground water recharge in arid areas: examples from western Saudi Arabia". Dicho estudio cifra la recarga por precipitación entre un 2% y un 4% de la precipitación total.
- Scanlon et al., 2006. "Global synthesis of groundwater recharge in semiarid and arid regions". Este estudio concluye que entre un 0,1 a 5% de la precipitación en zonas áridas y semi áridas acaba conformando la recarga por precipitación del acuífero.
- Houston, 2007. "Recharge to groundwater in the Turi Basin, northern Chile: An evaluation based on tritium and chloride mass balance techniques". Estudio llevado a cabo en la cuenca de Turi, ubicada a 70 km al este de Calama. En el estudio se calcula una recarga por precipitaciones variable con la altura, desde casi un 1% a 2.500 msnm, hasta un 10% a los 4.500 msnm.
- University of Massachusetts-Amherst (UAA-Rockwood, 2015). "Using the chloride mass balance method to estimate recharge". En este trabajo se aplicó el CMB en

distintos puntos del sector oriente de la cuenca aportante al Salar de Atacama. Se determinó que el porcentaje de precipitación que se transforma en recarga varía entre 0,5 y 4%.

Debido la cercanía con la cuenca del salar de Imilac y Punta Negra, se consideran antecedentes representativos de las condiciones de la zona de estudio a (Houston, 2007), (ROCKWOOD LITHIUM, 2015) y (UAA-ROCKWOOD, 2015), cuyos estudios se realizaron en zonas cercanas con características climáticas muy similares, ante esta consideración y teniendo en cuenta los valores obtenidos en el presente estudio, se decidió tomar un valor promedio de recarga por precipitación para la zona de estudio de un 4% de la precipitación total. Lo cual es equivalente a 444 L/s. Como se ha indicado en numerales anteriores, existen muy pocos datos de precipitación públicos en el interior del área de estudio, por lo que los valores de precipitación han sido extrapolados a partir de datos de áreas cercanas, por lo cual, tanto el valor de precipitación sobre la cuenca como el valor de infiltración presentan gran incertidumbre.

Aportes laterales subterráneos

Los acuíferos se encuentran normalmente en contacto con otras formaciones acuíferas, con las cuales se realiza un intercambio de caudal, el volumen de ese caudal depende del área de contacto, de los parámetros hidráulicos de cada uno de los acuíferos y del gradiente existente entre ambas formaciones. Los valores de permeabilidad de la roca encajante que rodea el acuífero aluvial son desconocidos, pero debido a su naturaleza volcánica son mucho menos permeables que el acuífero aluvial, por lo que se ha considerado despreciable la entrada desde el encajante.

Recarga desde cursos superficiales

En la zona de estudio los cursos superficiales que se forman en la cordillera, al entrar en contacto con el acuífero aluvial, se infiltran y pasan a formar parte del acuífero. Por este motivo se considera que el caudal infiltrado forma parte de la recarga por precipitación directa y no debiese contabilizarse de nuevo.

Retorno por agua de riego

En la zona de estudio no existen cultivos de ningún tipo, por lo tanto se ha considerado nulo este término.

5.9.2.2 SALIDAS

Extracciones

Se denomina 'Extracciones' a todo el volumen de agua que es extraído a través de pozos, canales, galerías u otros medios de extracción antrópicos. Para este caso, todo el caudal extraído es a través de pozos, este caudal es trasladado a una explotación minera situada en otra cuenca, excepto una pequeña parte de las extracciones, las cuales se ocupan para recargar de forma artificial el sistema de vegas del margen del salar de Punta Negra, mediante pozos de inyección. Aunque es cierto que se produce una surgencia en la inyección, según experiencia del consultor, la gran mayoría del agua se infiltra al acuífero.

Para calcular el volumen total que se extrae desde el acuífero, se han utilizado los datos que se muestran en el CPA (Catastro Público de Aguas) de la Dirección General de Aguas. Se ha considerado para el balance el caudal total otorgado que se encuentra tanto en el acuífero del salar de Punta Negra como en el salar de Imilac.

El caudal total otorgado es de **1.566 L/s** (**numeral 5.2**) de los cuales 1.543 L/s se extraen en el acuífero de la cuenca del salar de Punta Negra y 23 L/s en el de Imilac. Según los datos mostrados en el control de extracciones del año 2015, el caudal explotado por Minera Escondida durante este año fue de 293,3 L/s.

Al total extraído se ha descontado el caudal destinado a la recarga artificial de las vegas del margen del salar. Según el informe de MEL, debido a la disminución del caudal que alimenta las vegas VCL2 y VCL3 del salar de Punta Negra, a partir del año 2000, se llevó a cabo una medida de remediación que consistía en inyectar agua para recuperar el caudal original de las vertientes. Después de varias pruebas con diferentes caudales, se concluyó durante el 2011 y 2012 que el caudal óptimo el cual se iba a inyectar iba a ser de 9,6 L/s de media.

Como conclusión, el caudal total concedido es de 1.566 L/s menos el retorno por recarga artificial (9,6 L/s) es igual a **1.556 L/s. Si, por el contrario, utilizamos el caudal total explotado en 2015 según el control de extracciones (293,3 L/s) menos la recarga artificial, la extracción total efectuada en 2015 es de 283,7 L/s.**

Descargas a cursos superficiales

En la zona de estudio existen varios puntos donde se produce una descarga subterránea a cursos superficiales. En el contacto entre en acuífero aluvial y el margen del salar, debido al contraste de densidades, el agua del acuífero aluvial aflora en superficie formando una serie de canales y lagunas. El caudal descargado en estos puntos se ha estimado mediante la evaporación calculada desde lámina libre asumiendo que prácticamente todo el caudal descargado, se evapora a su paso por las lagunas.

Evapotranspiración

Se define evapotranspiración como la suma de la evaporación y la transpiración en áreas cubiertas de vegetación. Esta variable está influenciada por la temperatura, el viento, la presencia de vegetación y otros factores meteorológicos. En el área de estudio, la escasa vegetación hace que la salida se produzca principalmente por evaporación desde lámina libre y desde aguas subterránea. Este proceso es posterior a la infiltración, por lo que no se ha confundir con la evaporación que se produce directamente de la precipitación antes de infiltrarse.

Para el cálculo de la evapotranspiración se ha considerado la evaporación desde lámina libre y desde agua subterránea. Se entiende como evaporación desde lámina libre, aquella que se produce desde las lagunas que se forman en el margen de los salares. Éstas ocupan superficies reducidas pero tienen tasas de evaporación muy elevadas al estar el agua expuesta de forma directa a las condiciones atmosféricas de las que depende la evaporación (Temperatura, radiación solar, viento, etc.).

La tasa de evaporación desde aguas subterráneas depende principalmente de la profundidad del nivel freático y de la salinidad del agua. Por ello la evaporación se producirá principalmente en las zonas con la superficie freática somera.

A continuación en la **Tabla 5-34** se muestra el total evaporado en las cuencas del salar de Punta negra y salar de Imilac resultado de la suma de la evaporación desde lámina libre y desde aguas subterráneas. La tasa de evaporación total calculada para la zona de estudio es de **236 L/s**.

Tipo evaporación	Salar	Área (Km^2)	Total tasa evaporación (L/s)
Lámina libre	Punta Negra	0,28	18,6
	Imilac	0,04	2,5
Aguas subterráneas	Punta Negra	224,78	209,7
	Imilac	27,91	5,4
		Total (L/s)	**236**

Tabla 5-47. Total tasa de evaporación calculada para las cuencas del salar de Punta Negra y salar de Imilac. Fuente: elaboración propia.

Salidas laterales subterráneas

Al igual que para las entradas subterráneas, existe la posibilidad de un intercambio de caudal entre formaciones acuíferas, el volumen de ese caudal depende del área de contacto, de los parámetros hidráulicos de cada uno de los acuíferos y del gradiente existente entre ambas formaciones. Sin embargo, al tratarse de una cuenca endorreica donde el basamento es impermeable y/o de baja permeabilidad se considera que este término del balance es despreciable.

5.9.2.3 VARIACIÓN DE ALMACENAMIENTO

La variación de almacenamiento es la variación del volumen que se produce en el acuífero en un tiempo determinado. En este caso, se ha calculado a partir de la piezometría realizada en base a los datos de 2015 (**numeral 5.7.4**) y los descensos producidos en los niveles durante este año.

Existe una tendencia decreciente de los niveles en los sectores norte y centro del acuífero aluvial del salar de Punta Negra mientras que, en la zona sur al no existir bombeo, no se observa un descenso. En el salar de Imilac no se ha podido analizar si existe una tendencia al descenso o ascenso de los niveles al no disponer de información pública de niveles en esta zona. Se considera que en condiciones naturales sucedería lo mismo que el sector sur de la cuenca del salar de Punta Negra donde no se observa una tendencia decreciente de los niveles.

Acorde con lo comentado en el párrafo anterior, se ha estimado la variación de almacenamiento calculando el descenso producido durante el año 2015 en el sector norte

y sector centro del salar de Punta Negra. La delimitación del área de influencia del cono de depresión de cada sector se ha calculado en base a la piezometría realizada para 2015. La superficie calculada representa el área de influencia generada en cada cono de depresión y en un mapa piezométrico se representa mediante isopiezas concéntricas.

El cono de depresión producido por el bombeo en el sector norte, tiene un área aproximadamente de 90,7 km^2. Dentro del área se ha analizado de un total de 4 pozos, el descenso producido durante el año 2015 entregando un valor medio de 0,18 m.

De igual forma se ha analizado para el campo de pozos central donde la superficie estimada del cono de depresión es de aproximadamente 43,26 Km^2 y el valor medio de descenso producido durante el 2015 fue de 0,185 m (estimado en base a 6 pozos). Los valores de descenso calculados durante el 2015 se presentan en el **numeral 5.7.4**.

Para estimar el volumen que ha variado el sector norte durante el año 2015, se ha calculado el volumen del cono correspondiente al descenso en diciembre de 2014 y en diciembre de 2015, para más tarde calcular la diferencia entre esos volúmenes.

$$Volumen\ cono = \frac{1}{3} * \pi * r^2 * h$$

Donde,

$Volumen\ cono$: *Volumen que ha variado durante 2015 [m^3/a]*

r^2: *Superficie del cono [m^2]*

h: *Descenso medio producido por el bombeo entre ene - dic de 2015 [m]*

Para calcular el volumen de agua extraído se ha multiplicado por la porosidad (25% aprox.) para estimar el volumen de agua. El valor de porosidad se ha obtenido de publicaciones previas sobre acuíferos aluviales y depósitos de arenas, gravas y arcillas (Konikow *et al,* 1974, Lau *et al*, 1957).

Para el caso de la zona centro, se utilizó para el cálculo la fórmula del volumen de un paralelepípedo, debido a que la forma en superficie de la zona afectada por los bombeos se asemeja más a un rectángulo que a una circunferencia.

$$Volumen\ paralelepípedo\ = a * b * h$$

Donde,

Volumen paralelepipedo: Volumen que ha variado durante 2015 [m³/a]

a: lado mayor [m]

b: lado menor [m]

h: Descenso medio producido por el bombeo entre ene - dic de 2015 [m]

A continuación en la **Tabla 5-48** se muestran los resultados obtenidos en el cálculo de la variación de almacenamiento producida en las cuencas del salar de Punta Negra y salar de Imilac. El valor total de la variación de almacenamiento durante el año 2015 fue de **-260 L/s**.

Sector	Área (m^2)	Descenso promedio 2015 (m)	Variación almacenamiento (dic-2014/dic-2015) (L/s)
Norte	90.730.000	0,18	-196,6
Centro	43.264.000	0,185	-63,5
* profundidad total en el cono			**-260,1**

Tabla 5-48. Resultado del cálculo de la variación de almacenamiento estimada para el sector norte y centro de la cuenca del salar de Punta negra. Fuente: elaboración propia.

5.9.2.4 APLICACIÓN DE LA ECUACIÓN DE BALANCE

En este caso y como se ha ido detallando, el sistema objeto de estudio se basa en una cuenca endorreica sin vegetación, identificándose una única **ENTRADA**:

1. ***Recarga directa por precipitación (PP)***

Así mismo, se considera la existencia de 2 tipos de **SALIDAS**:

1. ***Extracciones (Bombeo)***
2. ***Evaporación (ET) desde las napas/lámina libre***

La incertidumbre asociada a los términos del balance hídrico hace que no tenga sentido utilizar valores con decimales en la aplicación de la ecuación de balance, es por ello que

a la hora de aplicar la ecuación de balance todos los términos han sido aproximados a números enteros.

Según lo explicado en los puntos anteriores, algunos de los términos han sido considerados despreciables, por tanto, la ecuación de balance será expresada finalmente de la siguiente manera:

$$\text{Variación de almacenamiento} = \text{Recarga por precipitación} - \text{Extracciones} - \text{Evapotranspiración}$$

Sustituyendo los valores en la ecuación, y considerando el caudal de extracciones total otorgando en el área se tiene obtiene un valor de variación en el almacenamiento de -1.348 L/s:

Variación de almacenamiento = 444 L/s – 1.556 L/s -236 L/s =-1.348 L/s

En cambio, si se utiliza el valor de caudal obtenido del control de extracciones correspondiente a 2015 descontado el caudal utilizado para recarga artificial, lo que equivale a 284 L/s, la variación de almacenamiento obtenida es de -76 L/s:

Variación de almacenamiento = 444 L/s – 284 L/s -236 L/s =-76 L/s

A modo de resumen, la estimación de la variación en el almacenamiento se ha realizado en base a 3 métodos diferentes:

1. Según balance hídrico teniendo en cuenta las extracciones totales otorgadas.
2. Según balance hídrico teniendo en cuenta las extracciones publicadas por MEL 2012.
3. A partir de la variación de niveles, tal y como se explica en el **numeral 5.7.4.**

Tal y como se observa en la **Tabla 5-49,** la variación de almacenamiento obtenida mediante los diferentes métodos es variable, aunque se muestra claramente negativa, y se encuentra en el rango de entre - 76 L/s y – 1.348 L/s.

Método de obtención	Variación de almacenamiento año 2015 (L/s)
Balance hídrico teniendo en cuenta las extracciones totales otorgadas	-1.348
Balance hídrico teniendo en cuenta las extracciones publicadas por MEL	-76
Variación de niveles	-260

Tabla 5-49. Variación en el almacenamiento acuífero aluvial Imilac - Punta Negra. Fuente: elaboración propia.

5.9.3 BALANCE HÍDRICO DE LA CUENCA

En las secciones anteriores se ha descrito el balance del SHAC, sin embargo, el SHAC considerado se encuentra dentro de una cuenca hidrográfica endorreica que tiene su propio balance, siendo la ecuación de balance:

$$\boldsymbol{Precipitaciones} = \boldsymbol{Recarga\ al\ acuífero} + \boldsymbol{Evapotranspiración\ real}$$

En esta expresión, no se ha incluido el término de escorrentía superficial, debido a las características presentes en una cuenca endorreica, donde la escorrentía superficial no supone una salida de aguas del sistema, ya que termina infiltrándose o evaporándose. El término de la ecuación que tiene mayor incertidumbre es la evapotranspiración real, el resto de los parámetros han sido obtenidos de fuentes de datos contrastadas, por lo que la evapotranspiración real será despejada y calculada a través de la ecuación de balance. En los siguientes puntos se describen el resto de los términos de la ecuación.

5.9.3.1 ENTRADAS

Precipitaciones

El total de precipitaciones anuales para la cuenca objeto de estudio fue estimado en 350 hm^3, equivalente a 11.098 L/s, la explicación del método de obtención de la precipitación total anual se puede encontrar en el **numeral 5.4.1**.

5.9.3.2 SALIDAS

Salidas superficiales

En el caso de la zona de estudio una parte del total precipitado escurre de forma superficial, pero al entrar en contacto con los materiales del aluvial vuelve a infiltrarse, y no hay ningún cauce superficial que salga de la cuenca, por lo que se consideran nulas las salidas superficiales.

Recarga al acuífero

La recarga al acuífero fue estimada en 444 L/s, tal y como se explica en el **numeral 5.9.2**.

5.9.3.3 APLICACIÓN DE LA ECUACIÓN DE BALANCE

Como se ha explicado anteriormente, el parámetro con mayor incertidumbre de la ecuación de balance en la cuenca, es la evapotranspiración real, por lo que, esta será despejada de la ecuación:

$$Precipitaciones = Recarga\ al\ acuífero + Evapotranspiración\ real$$

Sustituyendo los valores de cada uno de los términos y resolviendo la ecuación obtenemos un valor de evapotranspiración real de 10.654 L/s.

$$Evapotranspiración\ real = 11.098\ L/s - 444\ L/s = 10.654\ L/s$$

El valor de evapotranspiración obtenido es equivalente a un 96 % de la precipitación total, el 4% restante corresponde a la infiltración. El porcentaje de infiltración ha sido contrastado con autores anteriores, tal y como se explica en el **numeral 5.9.2.**

El porcentaje de evapotranspiración valor ha sido comparado con estudios anteriores que cifran la evapotranspiración de la cuenca en un 94,4%, en Balance hídrico de Chile (DGA, 1988) o 77,6% en 'Hidrología general salar de Punta Negra' (Orellana *et al.*, 1972). Sin embargo, este valor deberá ser ajustado en un futuro, con los datos monitoreados en los lisímetros instalados durante el presente proyecto.

5.10 SELECCIÓN DEL SHAC A MODELAR

En el marco del presente Estudio, se debe realizar la simulación numérica de uno de los SHAC analizados, pero previamente se debe seleccionar aquel con mayor interés en ser modelado.

El concepto SHAC (Sector Hidrogeológico de Aprovechamiento Común) se define como un acuífero o parte de un acuífero, cuyas características hidrológicas espaciales y temporales permiten una delimitación para efectos de su evaluación hidrogeológica o gestión de forma independiente (DGA, 2013). En otras palabras, la división de un acuífero en uno o más SHAC permite estudiar su comportamiento hidrogeológico y administrar el recurso hídrico asociado de manera independiente.

Tal y como se ha descrito en apartados anteriores, el presente Estudio abarca dos zonas, una situada en la II Región y formada por las cuencas del salar de Punta Negra y salar de Imilac, y otra en la IV Región, formada por las cuencas del río Claro y Río Turbio. Ambas zonas tienen características geomorfológicas diferentes. Acorde con la definición de SHAC expuesta anteriormente, para las cuencas del salar de Punta Negra y salar de Imilac se definió un único SHAC que engloba ambas cuencas, mientras que en el caso de las cuencas del río Claro y río Turbio se definieron dos SHAC.

El motivo por el cual se definió un único SHAC para la II Región es porque las unidades detríticas que forman el acuífero aluvial tienen continuidad a lo largo de las dos cuencas, estando, por tanto, ambas hidráulicamente conectadas, aunque pudieran no estarlo si el nivel piezométrico descendiera entre 10-20 metros (descrito en Etapa II).

El SHAC consideraría los acuíferos aluviales y salinos y excluiría las formaciones que rodean el acuífero aluvial, las cuales, en su mayor parte se han considerado como basamento impermeable.

En el caso de la IV Región se definieron dos SHAC porque las cuencas del río Claro y Turbio se encuentran separadas hidrológicamente por una divisoria de aguas conformada por un material impermeable. Éste hecho, hace que estas dos zonas funcionen hidrogeológicamente de manera independiente, aunque es evidente que en la zona de la confluencia entre ambas cuencas los acuíferos aluviales interactúan entre sí, el posible efecto de un acuífero sobre el otro se vería limitado principalmente a la zona de confluencia y no necesariamente aguas arriba.

De los tres SHAC descritos anteriormente se propone la modelación del SHAC Imilac - Punta Negra principalmente por los siguientes motivos:

- Mayor interés desde el punto de vista de la gestión del recurso hídrico, puesto que actualmente se dedica a uso minero y se desconoce la evolución que podrían tener las reservas hídricas a largo plazo.
- El acuífero del salar de Punta Negra actualmente está sufriendo un régimen de explotación elevado (en 2015 fue de 293,3 L/s) y es necesario evaluar el efecto que pudiera tener sobre el acuífero.
- Se dispone de información suficiente para la trasposición a un modelo numérico, puesto que tiene una buena distribución de pozos y perfiles geofísicos que favorecerán la elaboración y calibración del modelo.

En los SHAC de la IV Región si bien un modelo numérico sería de gran utilidad para la gestión integral de los recursos hídricos, no sería tan necesario como en la II Región ya que se tiene un mayor conocimiento de la zona de estudio y se realiza un monitoreo del nivel freático en algunos pozos.

Desde el punto de vista técnico, se propone la construcción del modelo en entorno Visual MODFLOW, el cual es un software de reconocido prestigio en la comunidad hidrogeológica internacional, cuyo motor de cálculo es de código libre (MODFLOW) y permite su transposición a otros entornos de simulación numérica de acuíferos.

Este software permite la simulación y predicción tridimensional del flujo saturado mediante diferencias finitas, lo cual se considera perfectamente válido para el caso que nos ocupa.

Asimismo, en este entorno se puede realizar la simulación de la interacción entre el agua superficial y subterráneo, transporte de solutos, flujos de densidad variable, estimación de parámetros y la gestión del recurso hídrico.

El modelo se podrá realizar tanto en régimen estacionario como transitorio, cuyo periodo dependerá de las series temporales disponibles y fiables (presumiblemente periodo 2004-2015).

El mallado del modelo tendrá una resolución de unos 250x250 metros, puesto que las dimensiones del mismo (75 km ancho x 125 km de alto), no permiten una resolución

mayor debido a las propias limitaciones del software. Asimismo, en caso de no hacer un mallado cuadrado, se podría reducir el tamaño de celda en la dirección 'x', generando, por ejemplo, celdas de tamaño 150x250m, no obstante, esto será objeto de estudio ya que el mallado debe permitir el correcto funcionamiento del modelo de flujo.

5.11 MODELO NUMÉRICO DEL ACUÍFERO DE LAS CUENCAS DEL SALAR DE PUNTA NEGRA Y SALAR DE IMILAC

Una vez desarrollado el modelo conceptual del acuífero se ha llevado a cabo la construcción de un modelo numérico de flujo, de forma que se pueda reproducir en condiciones controladas el comportamiento hidráulico del mismo, para posteriormente explotar el modelo según unos escenarios futuros determinados.

El modelo numérico ha sido alimentado y calibrado en régimen transiente, la información utilizada para su construcción ha sido la generada durante el presente trabajo, tal como geofísica, campaña de catastro y piezometría, ensayos de bombeo, análisis de estudios previos, etc.

5.11.1 DISCRETIZACIÓN Y MALLADO DEL MODELO

El modelo se ha realizado considerando una única capa acuífera, formada por el volumen entre el basamento y la superficie topográfica, determinada mediante la extrapolación entre los perfiles geológicos trazados en apartados anteriores. Estos perfiles se definieron en base a los perfiles geofísicos y a las columnas litológicas de sondajes.

El hecho de construir el modelo en formato unicapa, en lugar de haberlo realizado en multicapa, se debe al desconocimiento de la existencia de niveles con distinto comportamiento hidráulico, ya que, a pesar de que el método geofísico empleado (transiente electromagnético) permite la diferenciación de resistividades en profundidad, dentro del acuífero detrítico no se ha detectado una diferencia notable de resistividades para construir un modelo multicapa. Los materiales acuíferos existentes corresponden a una alternancia heterogénea de material detrítico con variabilidad en el tamaño de grano, cuya disposición pseudo-horizontal confiere una disminución en la permeabilidad vertical con respecto a la horizontal.

El mallado del modelo se ha realizado (**Figura 5-92**) tratando de obtener el menor tamaño posible de celdas, de forma que el modelo tenga el mayor nivel de detalle posible, para que los elementos incorporados (captaciones) no se solapen unas con otras y puedan ser analizadas de forma independiente.

Asimismo, el modelo consta de 499 columnas y 241 filas, con tamaño de celdas de 220x220 metros y orientación norte-sur. La zona modelada ocupa una superficie de 53x110 km.

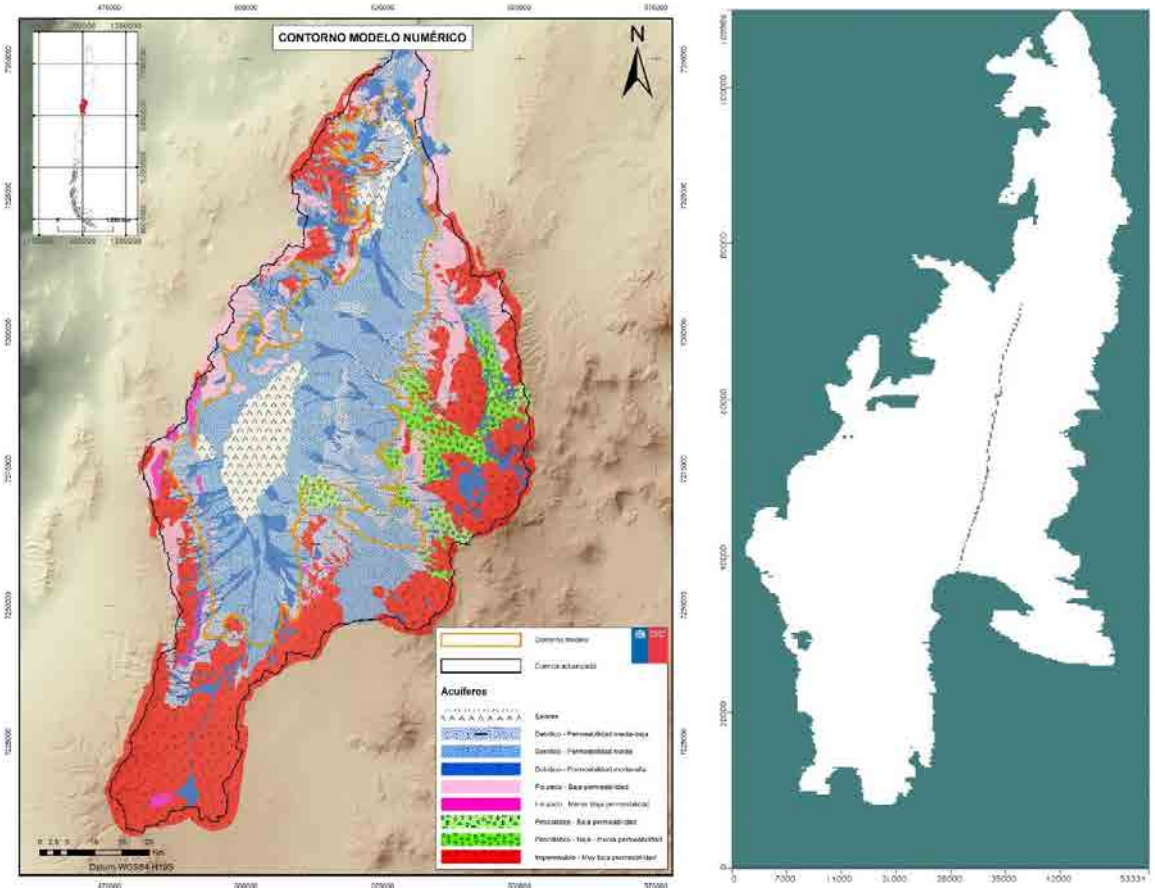


Figura 5-92. Mallado y celdas activas del modelo. Acuífero cuencas salar Punta Negra y salar Imilac. Fuente: elaboración propia.

La definición de celdas activas e inactivas ha sido basada en la delimitación de acuífero realizada en la caracterización hidrogeológica. En la **Figura 5-92** izquierda se muestra la geometría del modelo sobre el mapa hidrogeológico y en la derecha la geometría introducida en el modelo con las celdas activas en blanco y las inactivas en verde.

5.11.2 GEOMETRÍA DEL MODELO

Tal y como se ha mencionado anteriormente, el modelo numérico se ha desarrollado en una única capa acuífera, delimitada por el basamento definido en el **numeral 5.7** a partir de los datos recopilados y de geofísica.

La topografía ha sido obtenida del modelo digital del terreno de la NASA (ASTER). Cuya resolución es de 30x30 m.

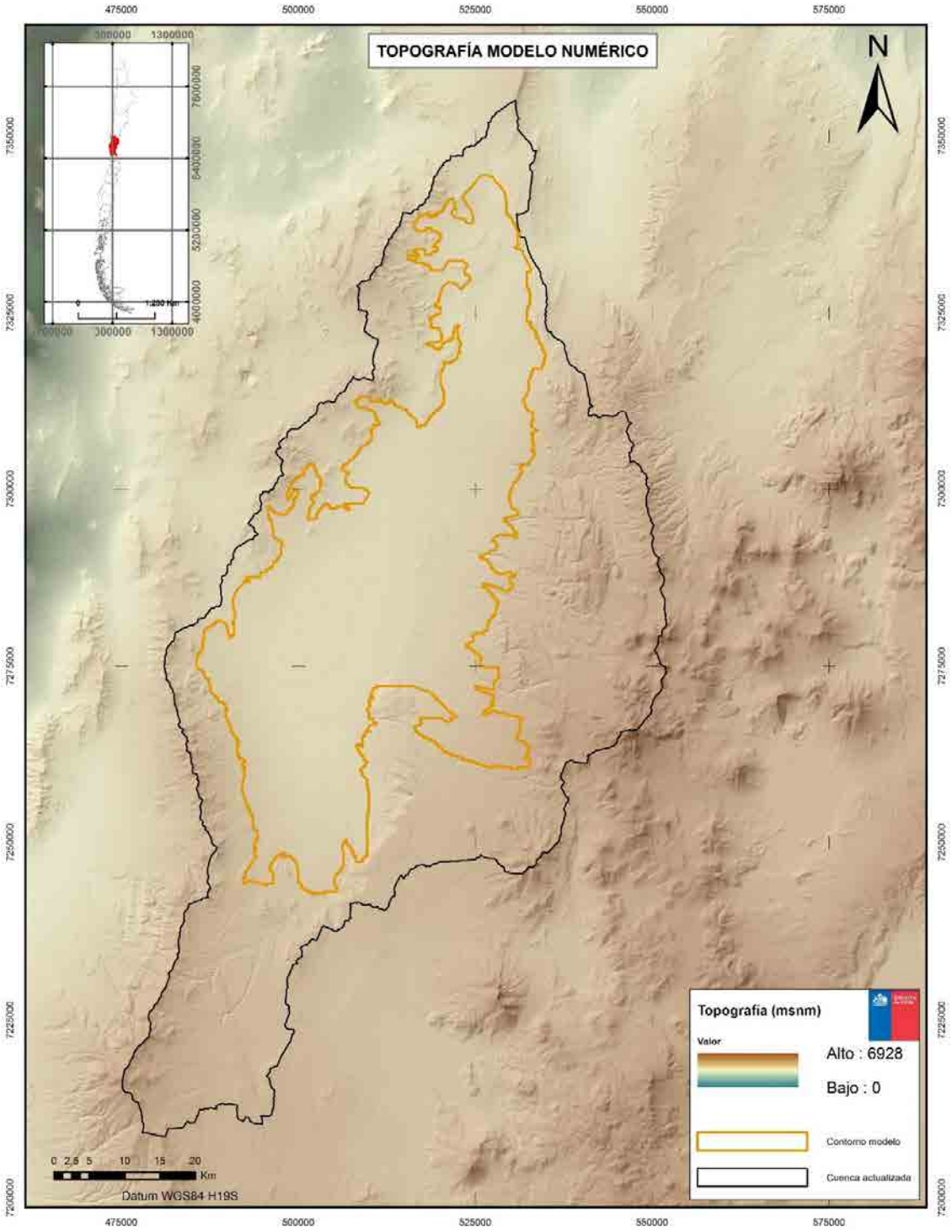


Figura 5-93. Topografía introducida en el modelo. Fuente: elaboración propia.

La geometría del basamento se ha calculado utilizando los resultados geofísicos obtenidos en dos campañas. Ambos resultados se han integrado mediante ARCGIS confeccionando la geometría actual del basamento. La segunda campaña geofísica entregó una mayor resolución en el sector ubicado entre las dos cuencas mostrando una divisoria del basamento más marcada que la observada con los datos de la primera campaña.

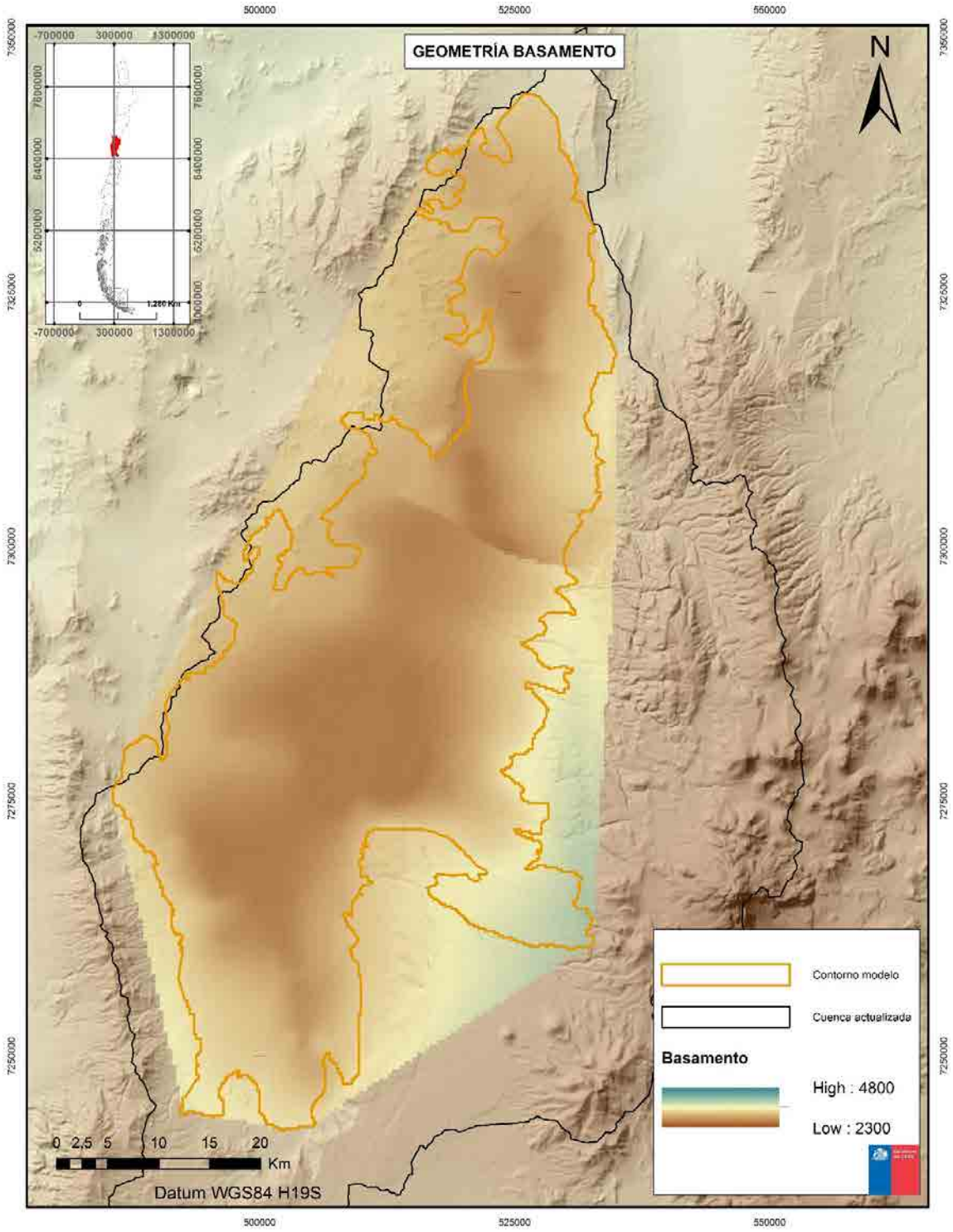


Figura 5-94. Basamento calculado mediante ARCGIS e introducido en modelo numérico. Fuente: elaboración propia.

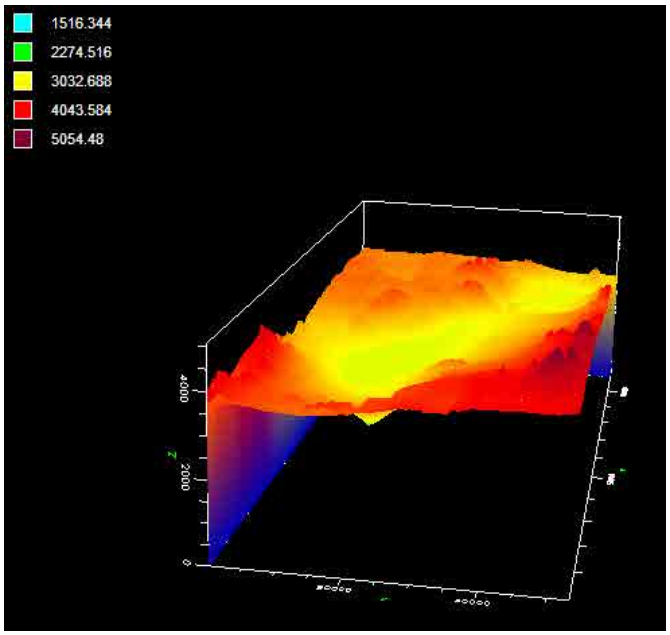


Figura 5-95. Imagen de la geometría del basamento introducida en el modelo. Fuente: elaboración propia.

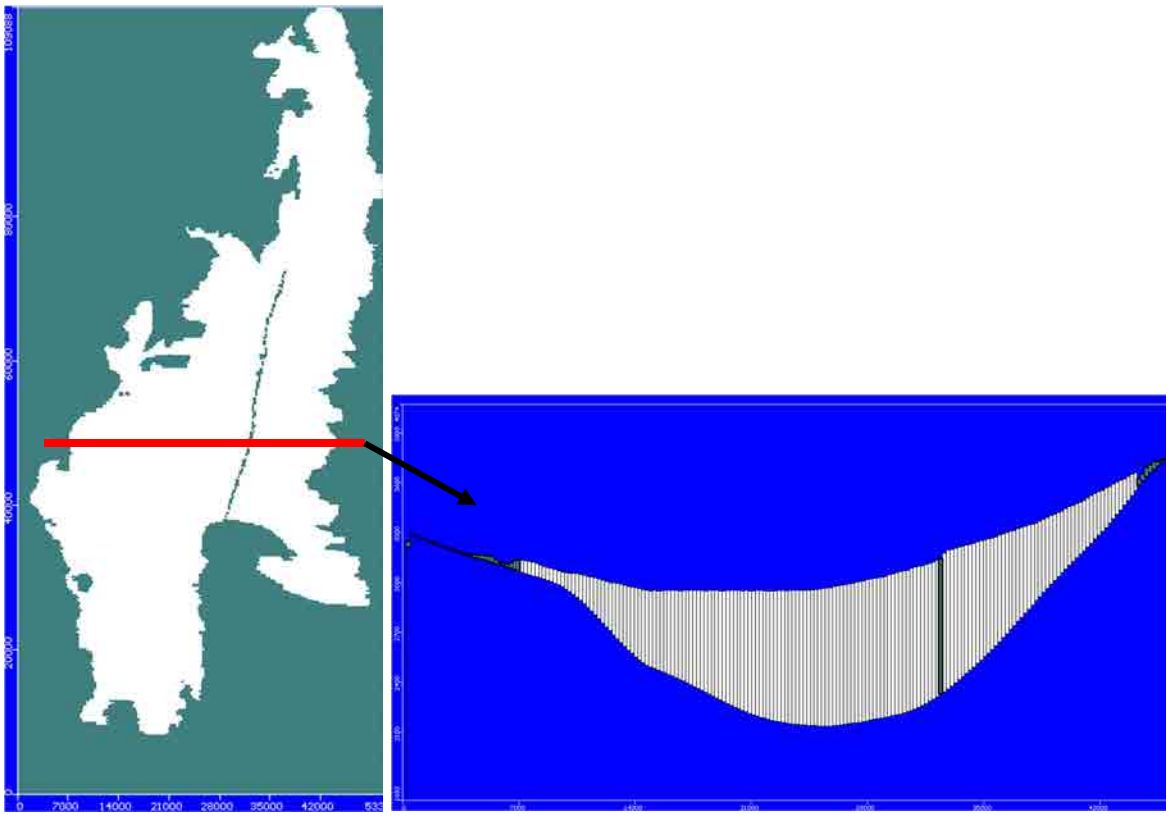


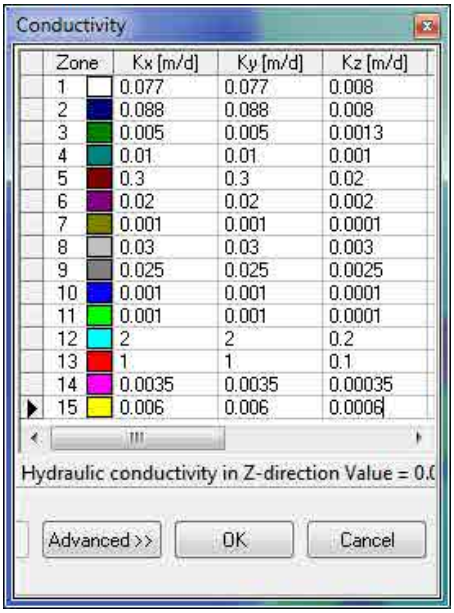
Figura 5-96. Corte del acuífero E-W con mallado (escala vertical x10). Fuente: elaboración propia.

5.11.3 PARÁMETROS ELÁSTICOS

Los parámetros elásticos introducidos han sido la conductividad hidráulica y el coeficiente de almacenamiento, ambos parámetros modificados durante el proceso de calibración para tener un mejor ajuste. Desde el punto de vista del comportamiento hidráulico, el acuífero se ha considerado heterogéneo e isótropo en la horizontal y heterogéneo y anisótropo en la vertical.

La zonificación de la conductividad hidráulica se realizó atendiendo a los datos recopilados y fue modificada durante la calibración para ajustar los niveles observados a los calculados. Asimismo, para el coeficiente de almacenamiento se realizó la misma zonificación espacial, con algunas modificaciones, cuyos valores fueron introducidos de forma iterativa hasta obtener un buen ajuste en el modelo.

La distribución de conductividad hidráulica obtenida y del coeficiente de almacenamiento se presentan a continuación:



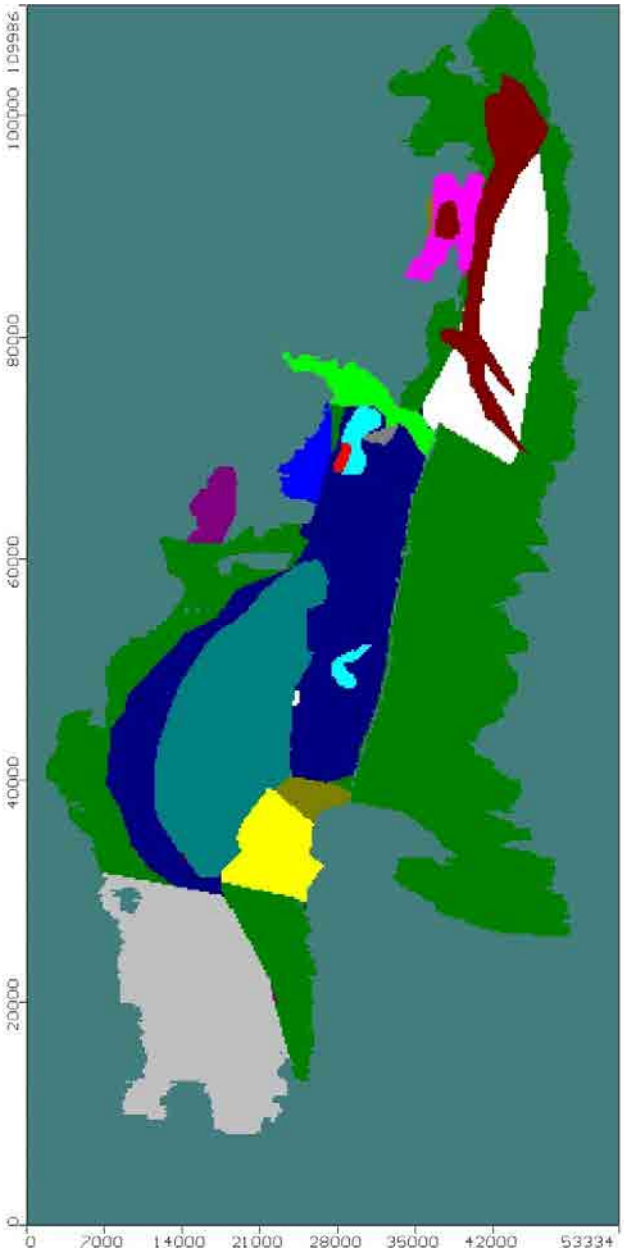
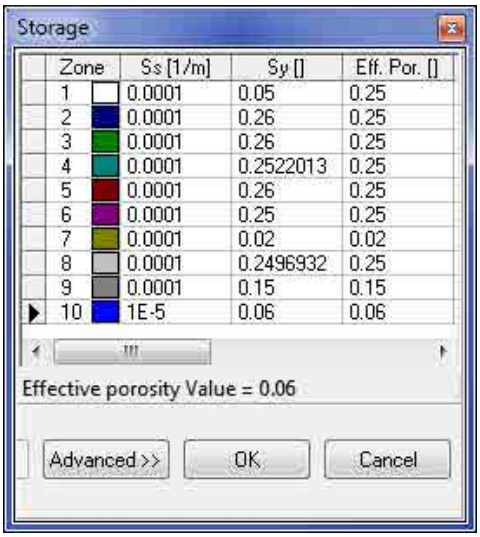


Figura 5-97. Distribución de las conductividades hidráulicas introducidas en el modelo. Fuente: elaboración propia.



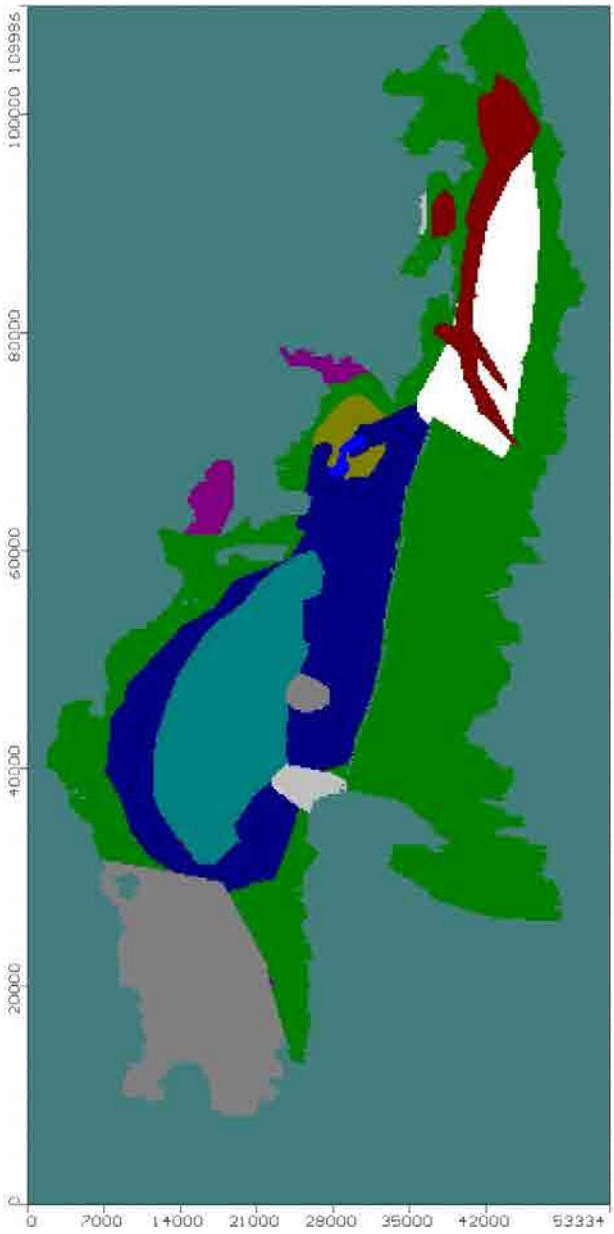


Figura 5-98. Distribución del coeficiente de almacenamiento introducido en el modelo. Fuente: elaboración propia.

En la tabla **Tabla 5-50** se indican los valores de transmisividad (T) obtenidos en ensayos de bombeo, traducidos a permeabilidad hidráulica (K) a través del espesor saturado (b) del acuífero, comparados con la permeabilidad hidráulica obtenida tras la calibración del modelo.

Zona modelo	Transmisividad ensayo bombeo (m^2/d)	Espesor acuífero (m)	Permeabilidad ensayo bombeo (m/d)	Permeabilidad promedio zona ensayo bombeo (m/d)	Permeabilidad calibrada (m/d)
2	980	490	20,000	0,5659	0,0880
	19	858	0,0221		
	249,6	835	0,2989		
	18	507	0,0355		
	275,76	625	0,4412		
	282	472	0,5975		
3	20	500	0,0400	0,0777	0,0050
	0,26	617	0,0004		
	4	65	0,0615		
	14	67	0,2090		
5	167	209	0,7990	0,7990	0,3000
8	1,11	236	0,0047	0,2112	0,0300
	29	361	0,0803		
	199,68	364	0,5486		
12	229,68	150	15,312	15,312	20,000
14	16	404	0,0396	0,0465	0,0035
	26	487	0,0534		
15	121,34	260	0,4667	0,4602	0,0060
	117,98	260	0,4538		

Tabla 5-50 Tabla comparativa entre los parámetros hidráulicos introducidos en el modelo y los obtenidos tras la calibración. Fuente: elaboración propia.

De la tabla **Tabla 5-50** se deduce que los valores de permeabilidad obtenidos tras la calibración son del orden de magnitud de los calculados a partir de los ensayos de bombeo, si bien, hay diferencias más significativas en algunos casos, tales como en la zona 15, aun así asumibles, ya que los ensayos de bombeo ofrecen datos puntuales y no de comportamiento global tal y como se tratan de incorporar al modelo de flujo.

5.11.4 CONDICIONES INICIALES

En todo modelo numérico es necesario incorporar unas condiciones piezométricas iniciales, si bien, para modelos de flujo en régimen estacionario basta con incorporar la superficie del terreno y el modelo ajusta los niveles hasta encontrar entrar en régimen estacionario, en los modelos de flujo en régimen transiente el modelo requiere partir de una piezometría que corresponda con la fecha de inicio del modelo. Es por ello que en

este caso se ha generado un mapa de isopiezas con para comenzar corriendo el modelo con fecha 31 de agosto de 2004.

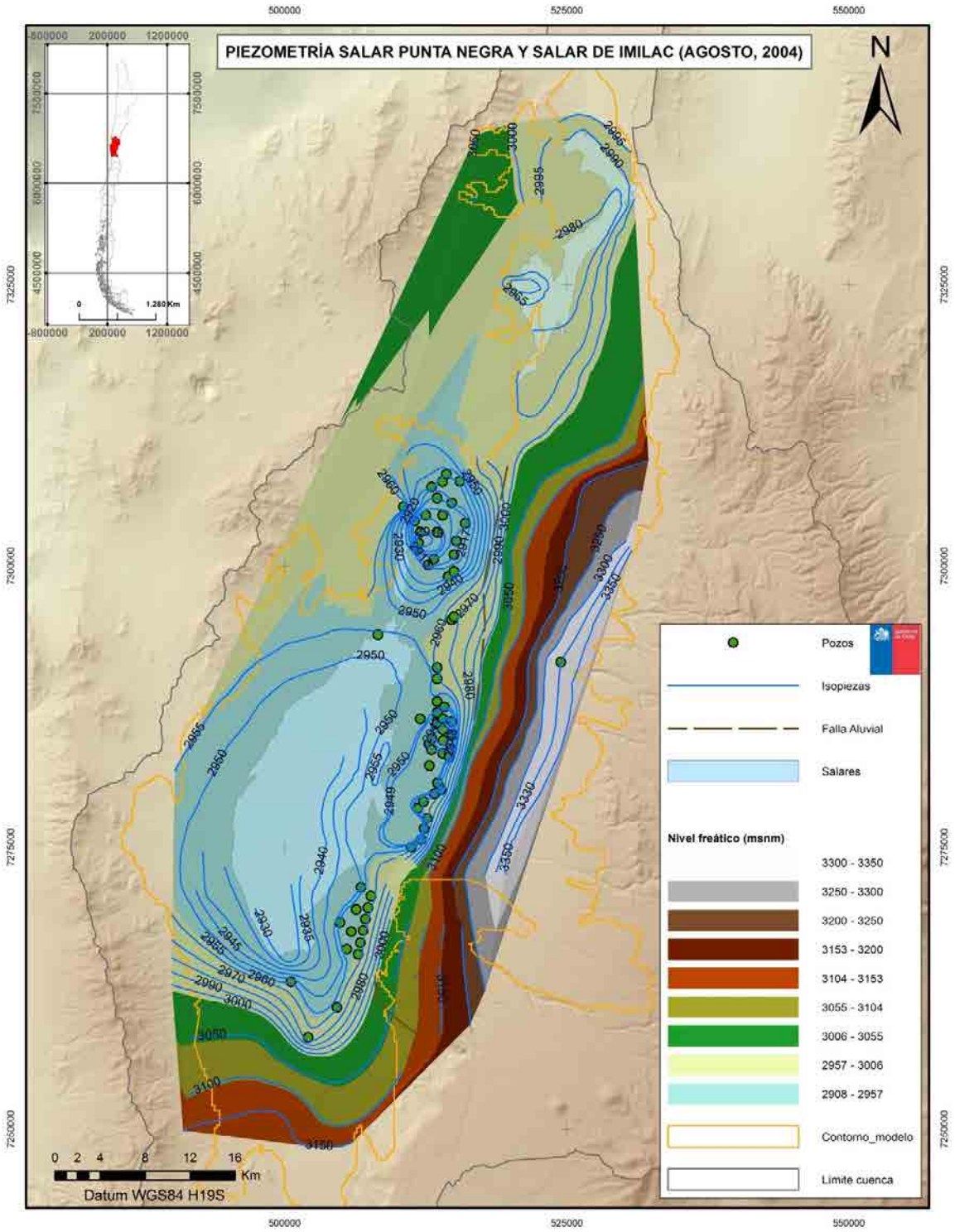


Figura 5-99. Piezometría de agosto de 2004 utilizada como referencia de inicio del modelo. Fuente: elaboración propia.

5.11.5 CONDICIONES DE CONTORNO

BORDE IMPERMEABLE

Se ha definido un borde de tipo impermeable para todo el contorno del acuífero. Este borde representa el contacto entre la formación acuífera y el basamento. Para simular esta condición se han desactivado las celdas que corresponden con los límites impermeables.

RECARGA

La recarga por precipitación directa ha sido zonificada en el acuífero atendiendo al mapa de isoyetas generado en el **capítulo 5.4.1**.

Asimismo, las entradas laterales procedentes de las cabeceras de las cuencas en la zona este se han incorporado como recarga en el borde del acuífero aluvial. Los valores incorporados al modelo han sido las series mensuales del periodo simulado cuya tasa de infiltración corresponde a la calculada en la zona oriental de la cuenca. Para este cálculo se ha asumido que de toda la infiltración que se produce en la cabecera acaba recargando el acuífero y que los cursos superficiales que se forman en eventos de precipitación, acaban infiltrándose al llegar a los depósitos aluviales. Por el contrario, en la zona oeste se ha introducido la recarga mediante una serie de pozos de inyección (9) situados en el borde del modelo, ya que la recarga está más concentrada espacialmente. Por otro lado, también se ha incorporado la infiltración por precipitación directa en toda la superficie del acuífero aluvial.

Los valores de recarga introducidos al modelo han sido los siguientes:

Mes	Zona 1 (Borde Este)	Zona 2 (Borde Sur)	Zona 3 (Franja Este)	Zona 4 (Zona interior)	Zona 5 (Borde Oeste)	Zona 6 (Borde Noroeste)
Enero	582,90	333,83	85,10	272,49	1,20	1,76
Febrero	854,46	498,57	134,61	450,53	0,39	0,60
Marzo	492,78	294,65	85,25	299,28	0,50	0,69
Abril	51,97	29,73	7,55	24,10	1,50	2,13
Mayo	93,65	55,62	15,80	54,79	19,63	27,48
Junio	162,74	96,10	26,86	92,15	30,18	43,28
Julio	112,03	65,97	18,29	62,41	18,49	27,28
Agosto	61,33	35,85	9,73	32,67	1,75	2,44
Septiembre	32,43	19,29	5,50	19,14	3,46	5,06
Octubre	9,57	5,93	1,88	6,97	5,92	8,62
Noviembre	14,93	8,51	2,13	6,74	4,05	5,87
Diciembre	43,29	25,06	6,60	21,70	2,18	3,13
Media anual (L/s)	**209,34**	**122,42**	**33,28**	**111,91**	**7,44**	**10,69**
Total medio anual (L/s)	**495,09**					

Tabla 5-51. Series de recarga introducidos al modelo. Fuente: elaboración propia.

La distribución de las zonas de recarga de la 1 a la 4 están se incluyen en la Figura 5-101 y las zonas 5 y 6 corresponden a las zonas donde se encuentran los pozos de inyección (Figura 5-100).



Figura 5-100. Pozos de inyección para simular la recarga que se produce en el sector oeste del modelo (6 pozos en zona 5 y, al NE de la anterior, 3 pozos en zona 6). Fuente: elaboración propia.

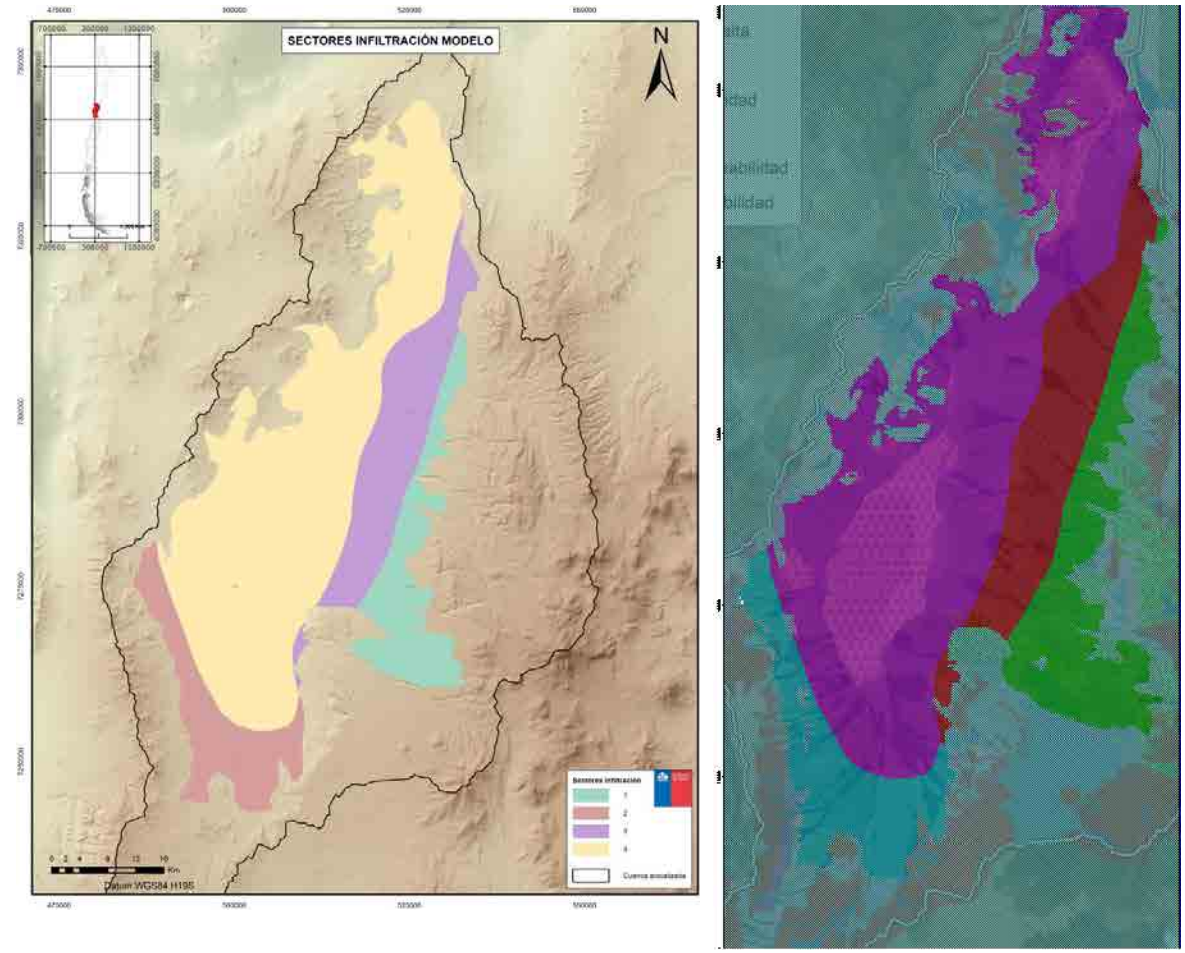


Figura 5-101. Sectores introducidos en el modelo con un valor de tasa de infiltración (mm/a) asignada. En la figura de la izquierda, equivale a la recarga producida desde el margen este de la cuenca (color celeste, zona 1), margen sur (color rojo, zona 2) y la recarga directa sobre el aluvial (colores morado para la zona 3 y amarillo para la zona 4). Fuente: elaboración propia.

DISCONTINUIDADES

Tal y como se presentó en apartado de caracterización hidrogeológica, en la zona este del acuífero aluvial hay una falla de orientación N-S cuyo escarpe aflora en superficie. Ésta falla dificulta el flujo a su través, haciendo que haya un salto piezométrico a un lado y a otro de la misma. Este elemento ha sido incorporado al modelo como celdas de tipo impermeable, pero con el objetivo de evitar un aislamiento entre el bloque este y oeste del acuífero, la falla se ha dibujado de forma discontinua creando de esta forma una franja que dificulta el flujo pero no lo impide (**Figura 5-92**).

EXTRACCIONES POR BOMBEO

Se han introducido series de explotación por bombeo de 46 captaciones de aguas subterráneas cuyos datos han sido facilitados por Minera Escondida.

Los periodos para los cuales se dispone de información son dos, el primero comprendido entre septiembre de 2004 hasta marzo de 2007, y el segundo entre julio de 2012 y diciembre de 2015.

Para el periodo en el cual no se dispone de información (abril 2007-junio de 2012), se ha incorporado un caudal de bombeo para cada pozo igual a la media de su registro conocido.

Los pozos de bombeo se ubican en dos zonas, ambas en la cuenca del salar de Punta Negra: campo de bombeo norte y campo de bombeo central.

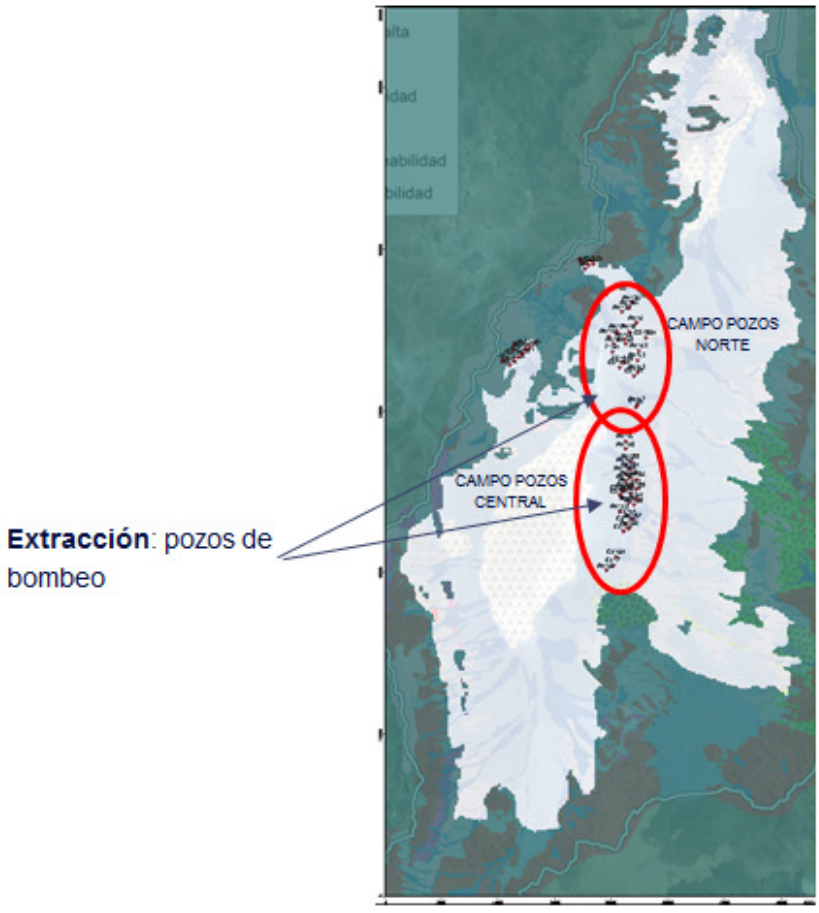


Figura 5-102. Ubicación pozos de extracción en el acuífero aluvial. Fuente: elaboración propia.



Figura 5-103. Caudal total de los pozos incorporados al modelo. Fuente: elaboración propia.

El caudal medio de bombeo asciende a 310,10 L/s para el periodo simulado.

RECARGA ARTIFICIAL

El sistema VCL-2 se alimenta de forma artificial desde una batería de pozos de inyección (**Figura 5-104**) introducidos por Minera Escondida. MEL decidió intervenir[1] en el mantenimiento de las lagunas al observar que el caudal de las mismas disminuía con el tiempo. Para reflejar la situación actual del área de estudio, se han introducido pozos de inyección con un caudal variable que sea similar al que inyecta MEL (7.2 L/s en el último

[1] "Según el informe de MEL, debido a la disminución del caudal que alimenta las vegas del salar de Punta Negra, a partir del año 2000, se llevó a cabo una medida de remediación que consistía en inyectar agua para recuperar el caudal original de las vertientes.

periodo). En la siguiente tabla se muestran los caudales introducidos para los diferentes periodos.

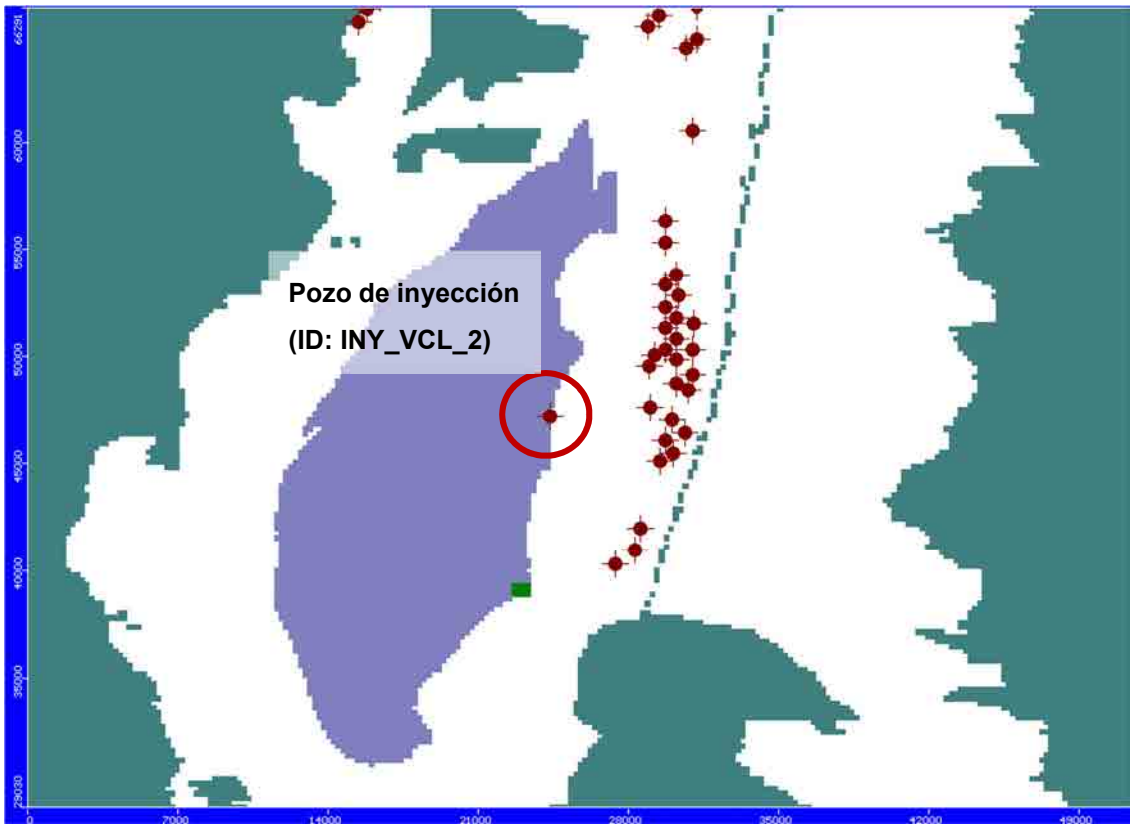


Figura 5-104. Ubicación del pozo de inyección incorporado al modelo. Fuente: elaboración propia.

FECHA	Q inyección (L/s)
sep-2004/ago-2005	3,93
sep-2005/ago-2006	4,80
sep-2006/ago-2007	5,63
sep-2007/ago-2008	6,45
sep-2008/ago-2009	7,20
sep-2009/ago-2010	7,20
sep-2010/ago-2011	7,20
sep-2011/ago-2012	7,20
sep-2012/ago-2013	7,20
sep-2013/ago-2014	7,20
sep-2014/ago-2015	7,20
sep-2015/dic-2015	7,20

Tabla 5-52. Caudales de inyección. Fuente: elaboración propia basado en información de MEL.

DRENES

A los efectos de simular las salidas naturales del acuífero a través de las vertientes que alimentan las lagunas, éstas han sido incorporadas como drenes, cuya cota de drenaje ha sido introducida como la cota del terreno.

Asimismo, se han incorporado tres drenes:

- VCL-2. Vertiente en zona centro-este del salar de Punta Negra, cuya surgencia fue natural pero actualmente surge porque Minera Escondida realiza una operación de recarga artificial en sus inmediaciones para que ésta siga surgiendo.
- VCL-3. Vertiente en zona sureste del salar de Punta Negra, de surgencia natural.
- VI-1. Vertiente en el borde oeste del salar de Imilac, de surgencia natural.

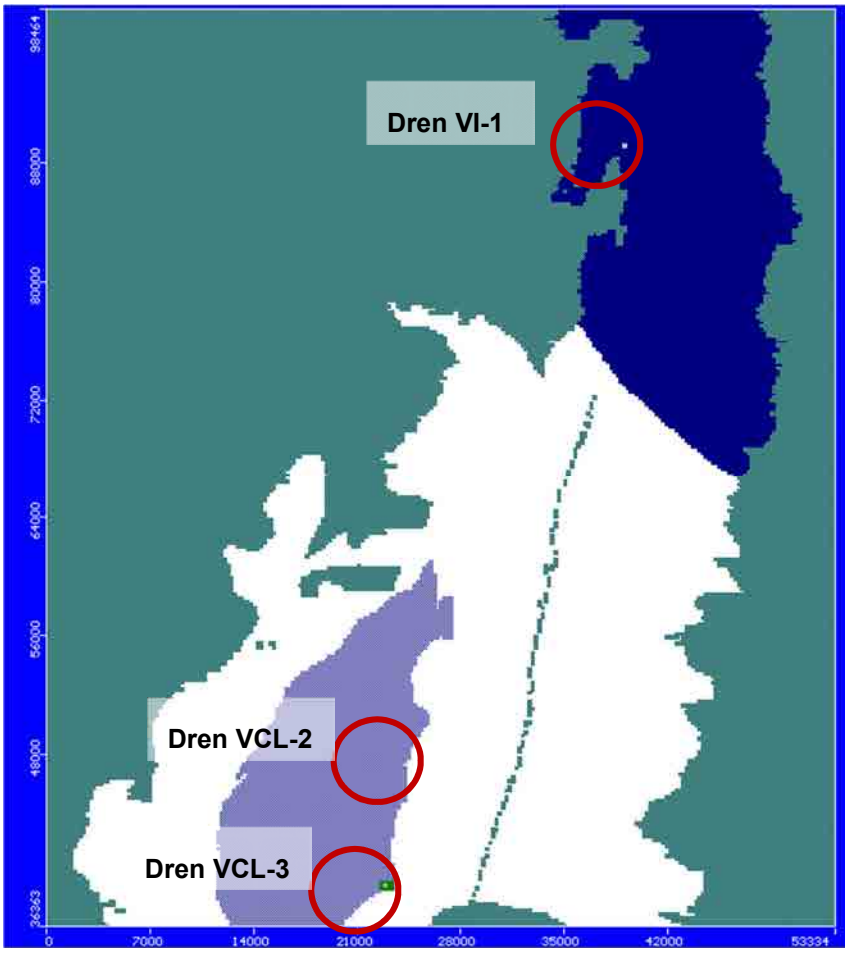


Figura 5-105. Ubicación de los drenes incorporados al modelo. Fuente: elaboración propia.

EVAPORACIÓN

La descarga por evaporación se ha introducido utilizando los polígonos presentados en el **numeral 5.4**. A cada polígono se le ha otorgado un valor de tasa de evaporación (mm/a) calculado utilizando los datos de los lisímetros instalados en terreno.

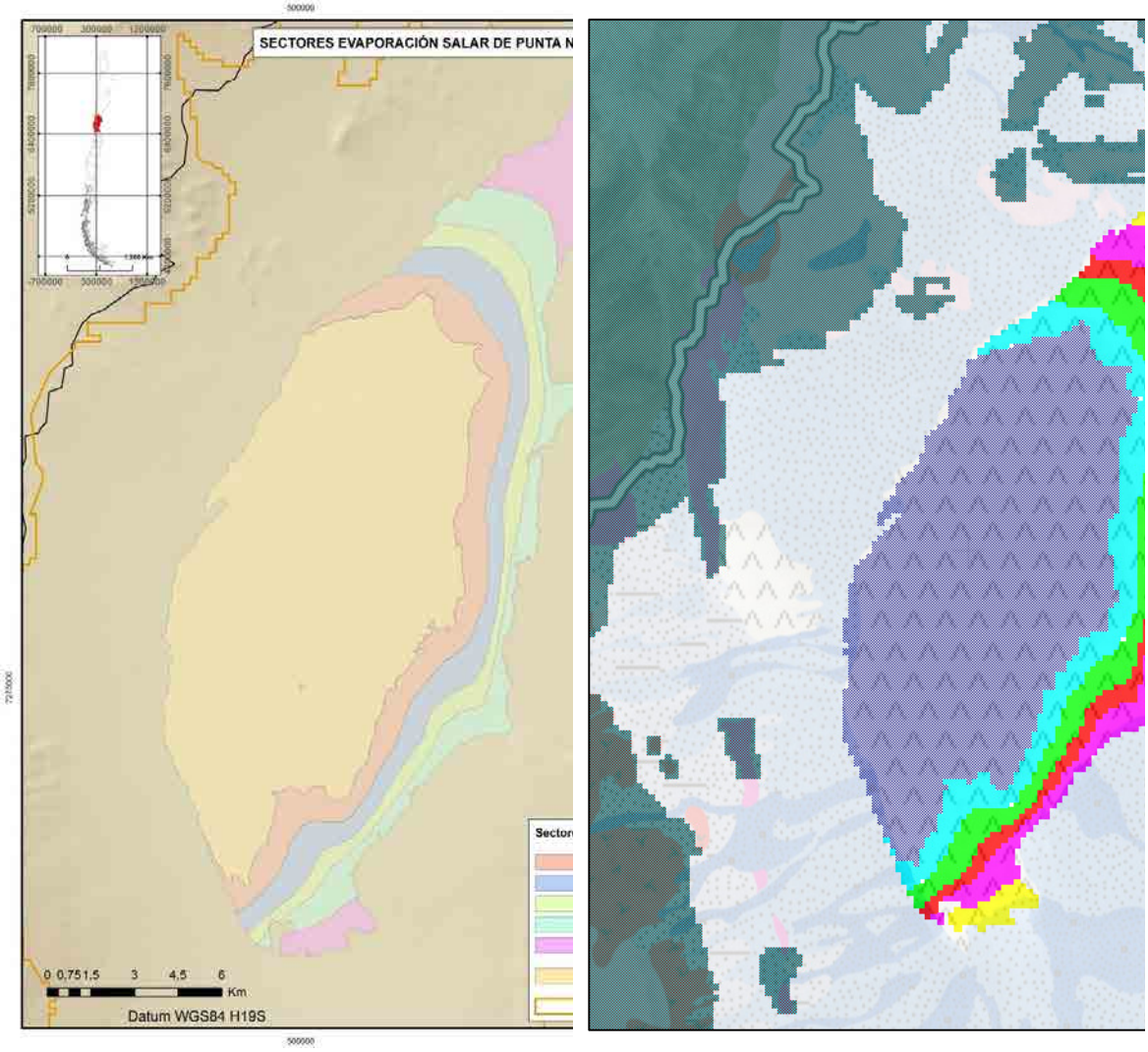


Figura 5-106. Sectores de evaporación en el salar de Punta Negra. Fuente: elaboración propia.

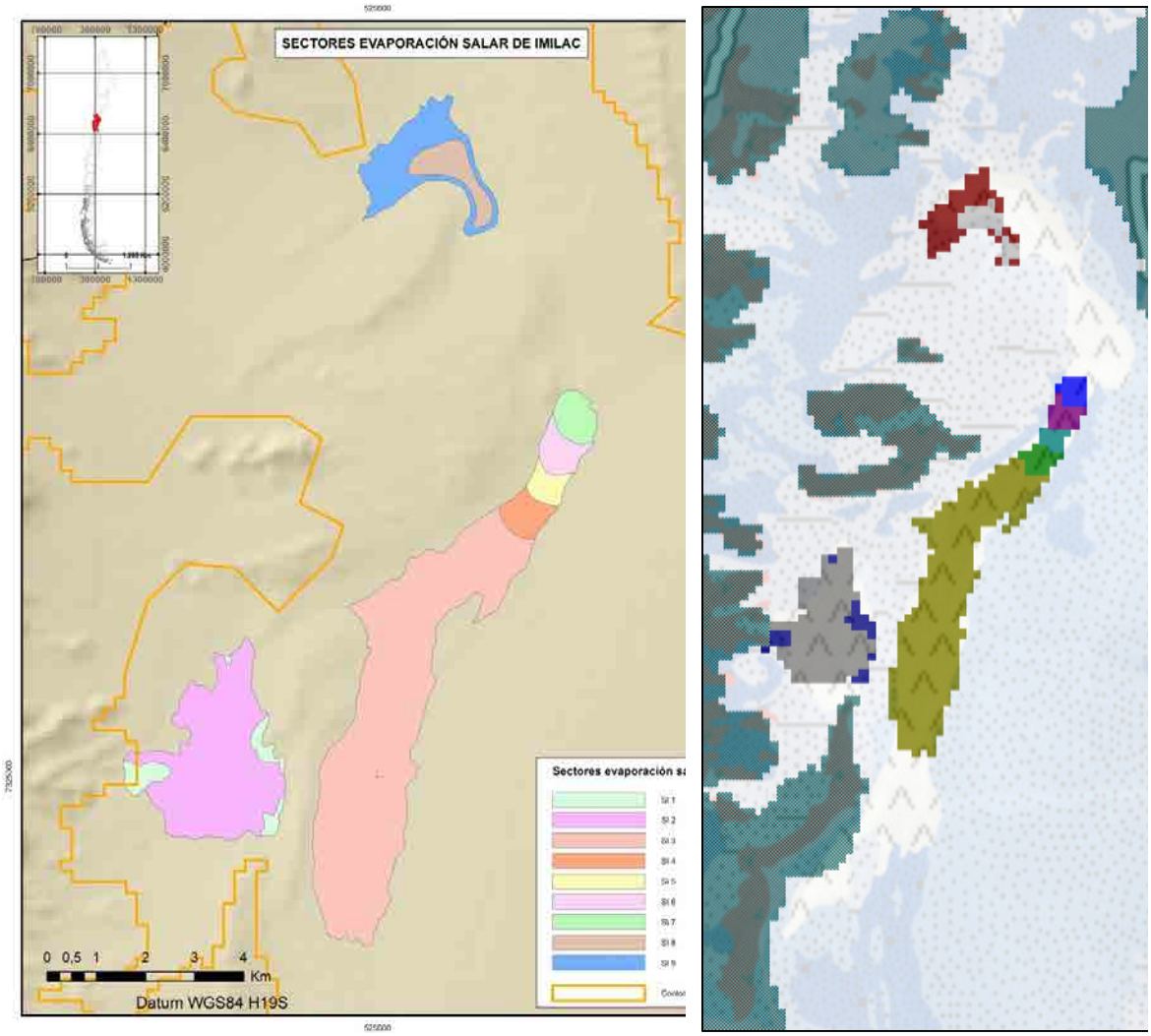


Figura -5-107. Sectores de evaporación en el salar de Imilac. Fuente: elaboración propia.

5.11.6 PUNTOS DE OBSERVACIÓN

Para que un modelo numérico pueda reproducir el funcionamiento hidráulico de un acuífero éste debe ser calibrado a partir de información conocida. Los datos que mejor reflejan el comportamiento de un acuífero son aquellos referentes a información piezométrica. En el caso que nos ocupa se han utilizado 86 puntos de observación, 83 corresponden a pozos y 3 a surgencias naturales (vertientes de alimentación a lagunas).

La mayor parte de los puntos disponibles están ubicados en los sectores campo de pozos norte, centro y sur. No habiendo ningún punto de observación procedente de pozos en el salar de Imilac, excepto un pozo surgente y el de una vertiente (surgencia de agua natural) en el borde oeste, justo en la falda de la cordillera de Domeyko.

A los efectos de controlar, a la hora de simular escenarios, las salidas de agua naturales en las vertientes que alimentan a las lagunas, éstas se han incorporado como puntos de observación ya que proporcionan información de la cota a la cual surge el agua en tales puntos.

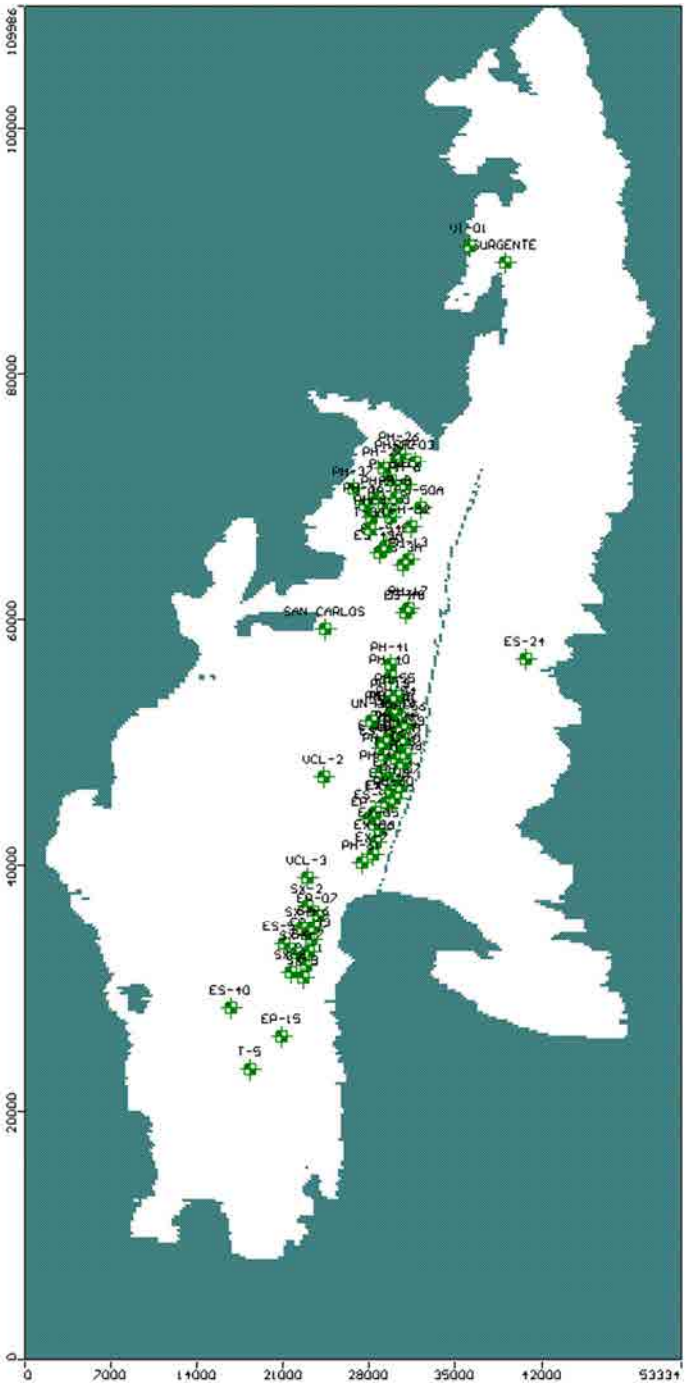


Figura 5-108. Puntos de observación utilizados para la calibración del modelo. Fuente: elaboración propia.

5.11.7 EJECUCIÓN DEL MODELO

El modelo ha sido ejecutado en régimen transitorio, con fecha de inicio el 31 de agosto de 2004 y finalización el 31 de diciembre de 2015. El motor de cálculo empleado ha sido MODFLOW 2005 y WHS como "solver".

El modelo resulta convergente, no detectándose por tanto problemas de conectividad entre celdas.

5.11.8 CALIBRACIÓN DEL MODELO

La calibración del modelo se ha realizado principalmente de forma manual, zonificando los parámetros hidráulicos e incorporando valores de forma iterativa hasta obtener un error cuadrático medio (RMS) en régimen transiente del 1,46 % para todo el periodo simulado, lo cual se considera una buena calibración para este tipo de modelos.

Asimismo, el error medio absoluto (MAE) es de 4,23 m, lo que supone un 0,72 % de la diferencia máxima de niveles observados en la zona (590,1 m), y la "Guía para el Uso de Modelos de Aguas Subterráneas en el SEIA" realizado por la Dirección General de Aguas, establece como criterio de aceptación para la calibración del modelo que el error medio absoluto sea igual o menor al 5% a la diferencia de niveles mencionada.

En la figuras siguientes se muestran los resultados de la calibración para tres periodos: inicial (punto de partida, **Figura 5-109**), para el periodo final (diciembre de 2015, **Figura 5-110**) y para todo el periodo (septiembre 2004-diciembre 2015, **Figura 5-111**). Tales figuras son gráficos de correlación, en los cuales el eje de ordenadas corresponde a los valores obtenidos en el modelo y el eje de abscisas a los valores calculados, siendo lo deseable que los puntos se ajusten a la recta, lo cual quiere decir que los valores calculados se aproximan a los valores observados. Cada punto corresponde a un pozo de observación para un momento dado.

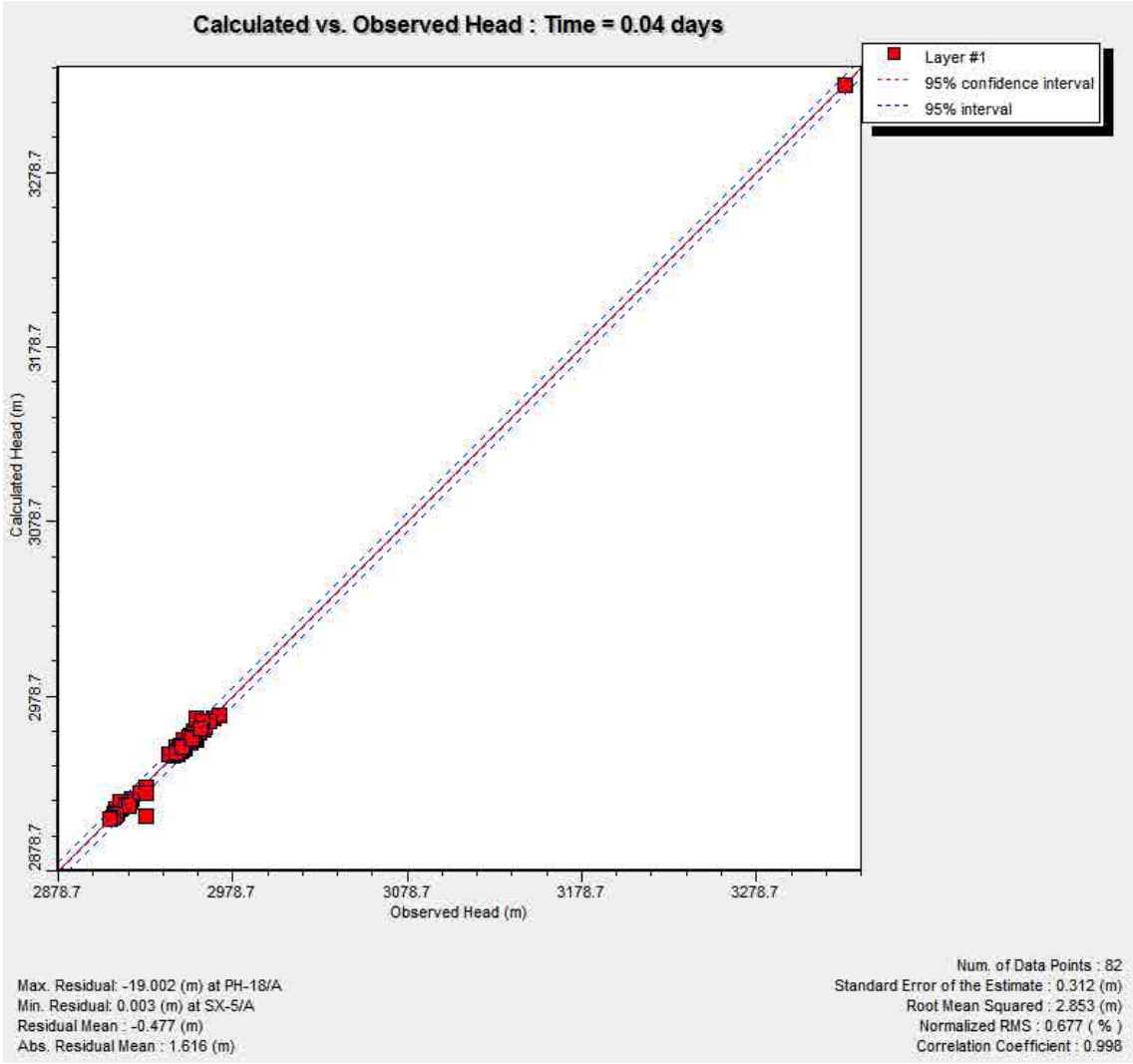


Figura 5-109. Valores calculados vs observados en periodo inicial. Fuente: elaboración propia.

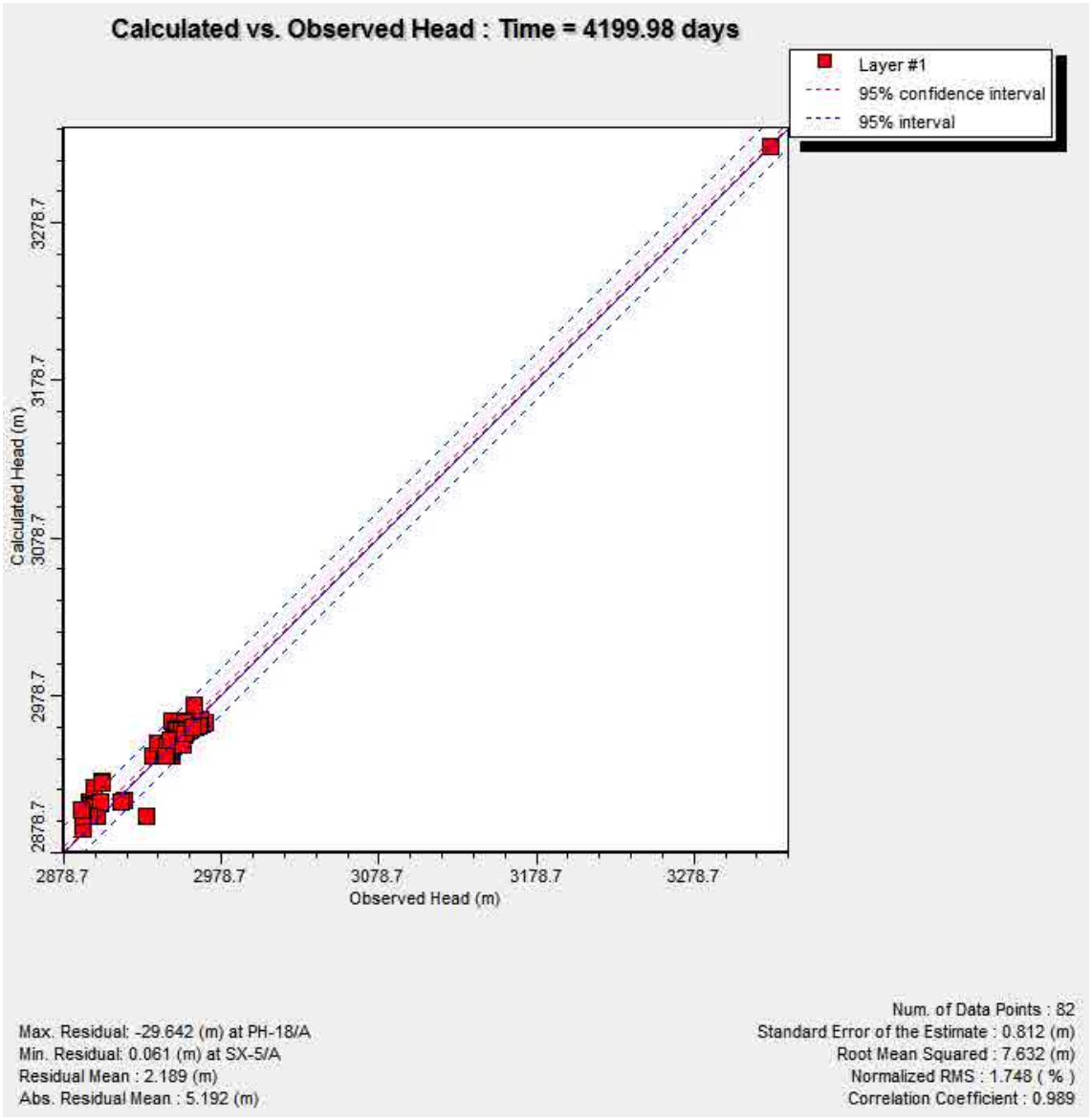


Figura 5-110. Valores calculados vs observados al final del periodo de simulación. Fuente: elaboración propia.

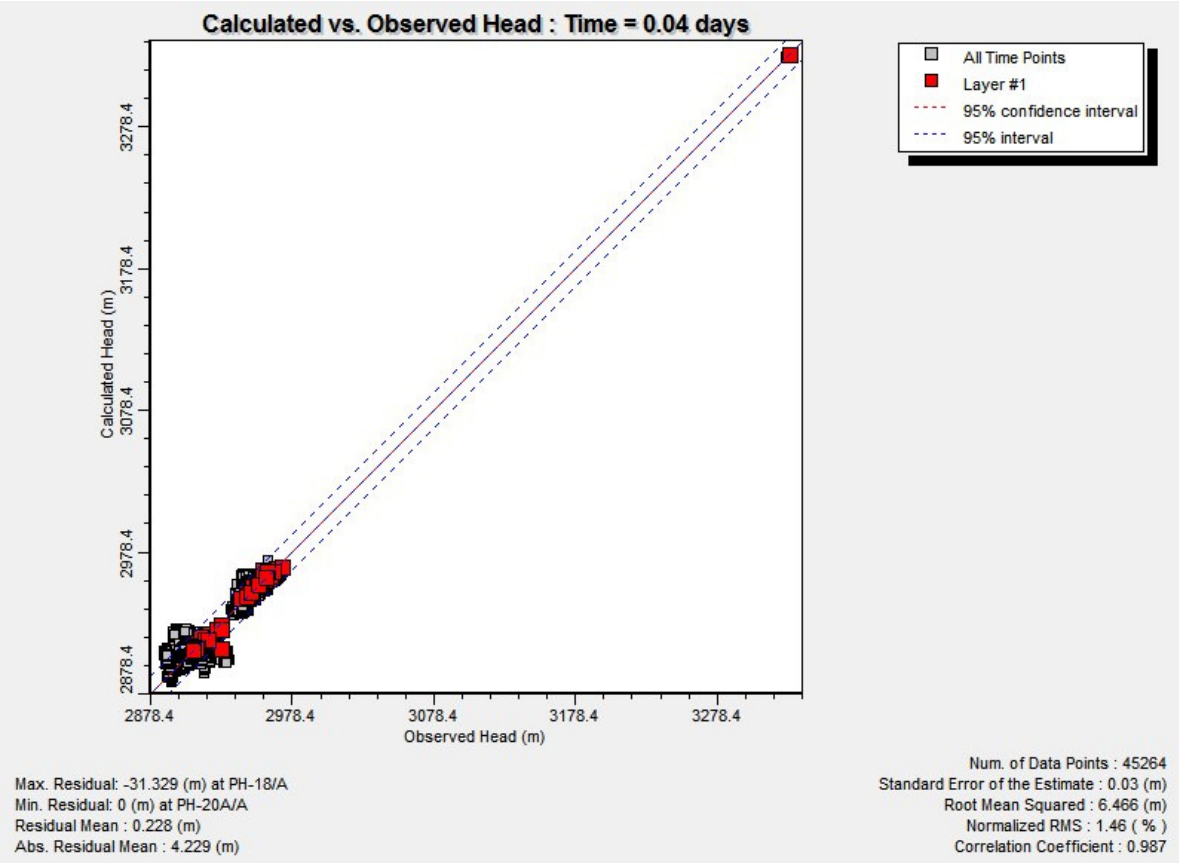


Figura 5-111. Valores calculados vs observados para todo el periodo de simulación. Fuente: elaboración propia.

Asimismo, se han extraído resultados de forma individual para los puntos más representativos de cada zona del acuífero, por lo que en las figuras siguientes se observan los valores calculados (cuadrados rojos) frente a los simulados (cuadrados rojos unidos por línea continua) para todo el periodo simulado.

Pozos de observación del campo de pozos norte:

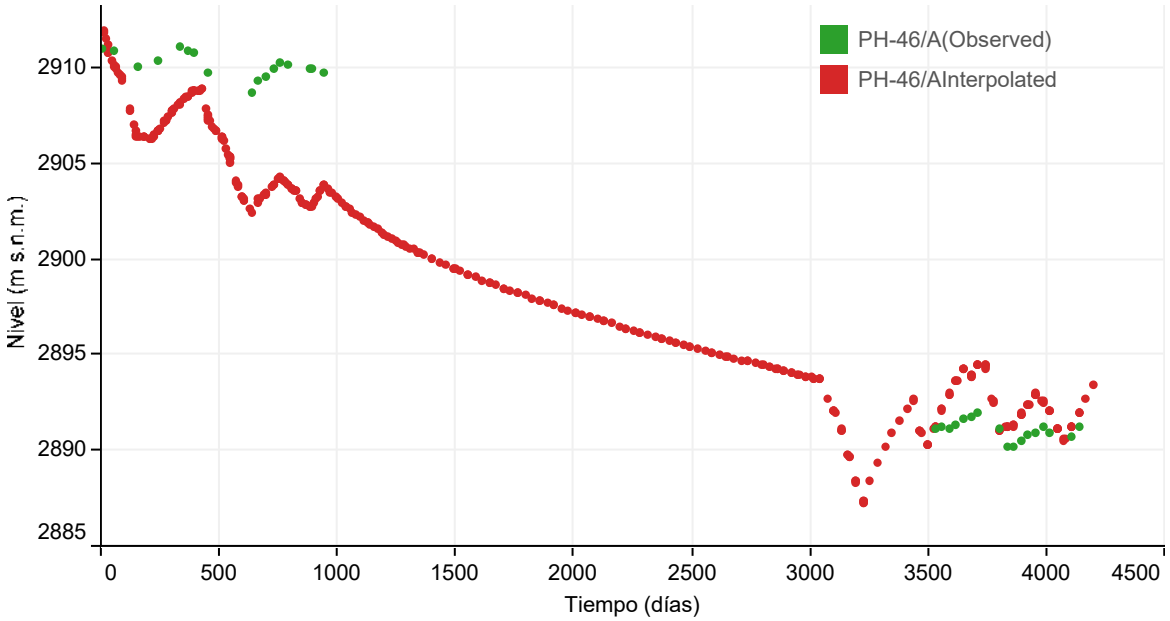


Figura 5-112. Valores simulados vs calculados en el pozo PH-46. Fuente: elaboración propia.

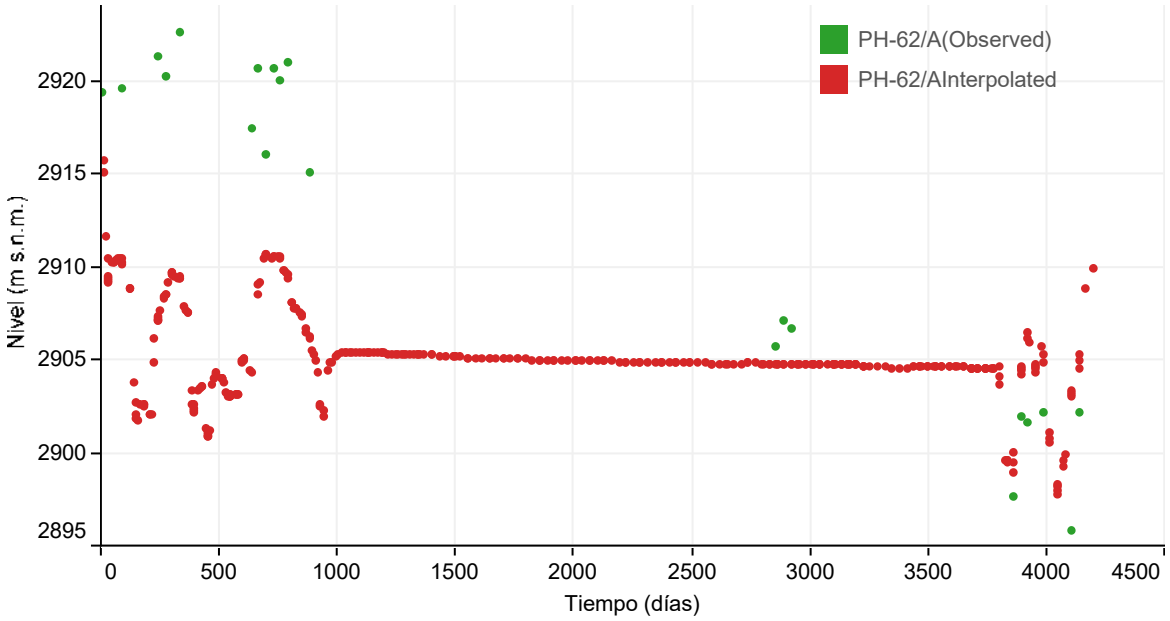


Figura 5-113. Valores simulados vs calculados en el pozo PH-62. Fuente: elaboración propia.

Entre el campo de pozos norte y central

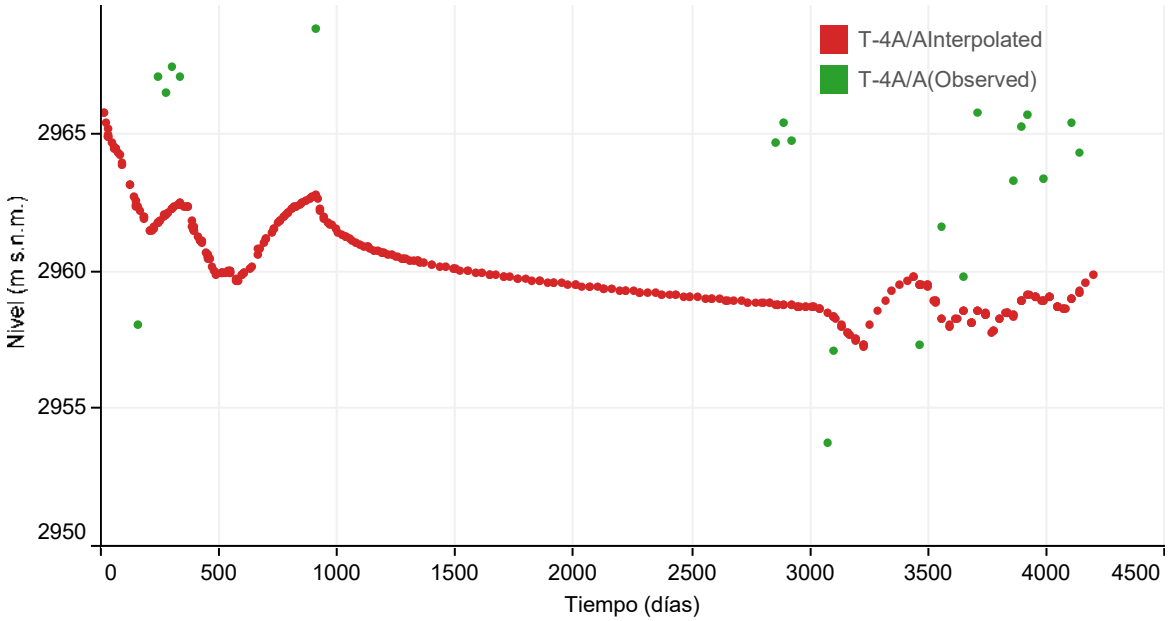


Figura 5-114. Valores simulados vs calculados en el pozo T-4A. Fuente: elaboración propia.

Campo bombeo central, parte norte:

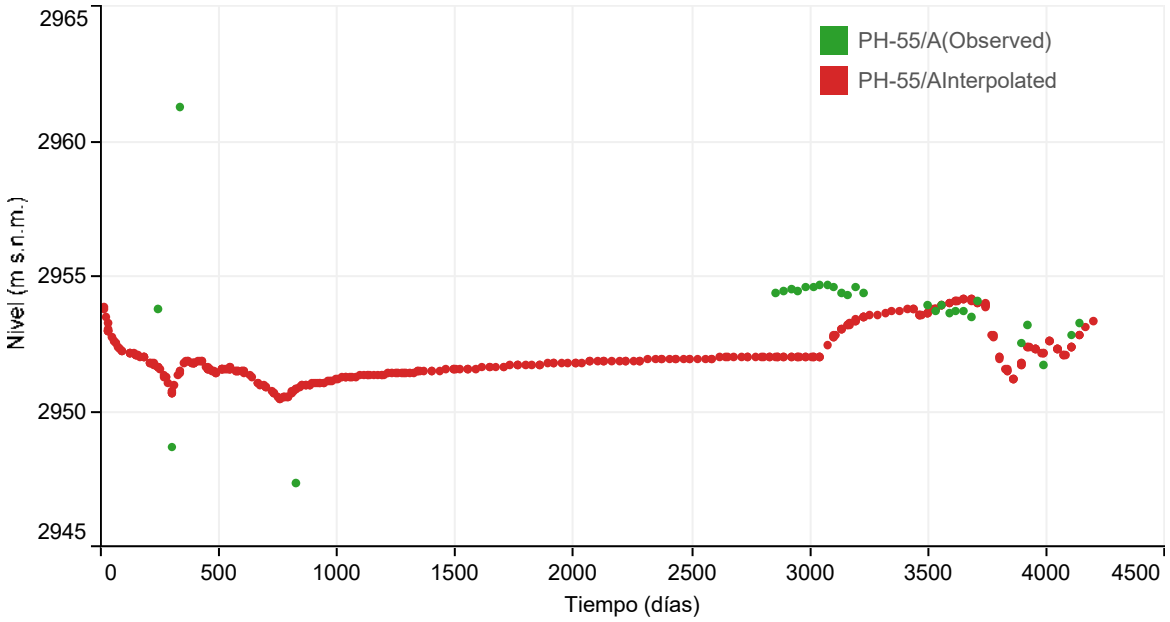


Figura 5-115. Valores simulados vs calculados en el pozo PH-55. Fuente: elaboración propia.

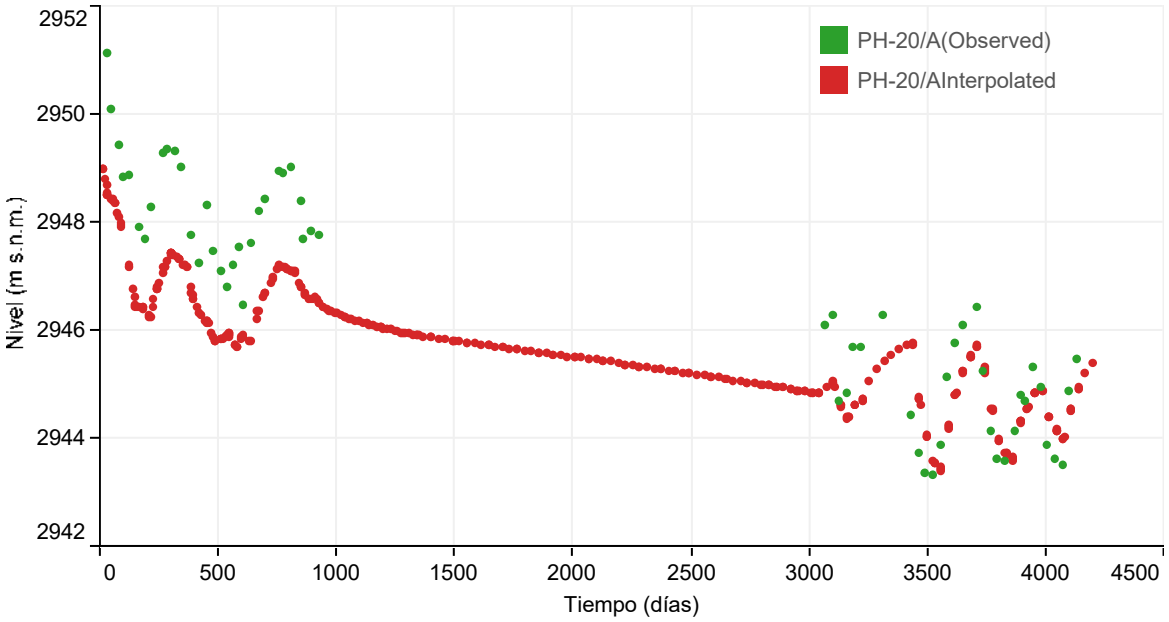


Figura 5-116. Valores simulados vs calculados en el pozo PH-20. Fuente: elaboración propia.

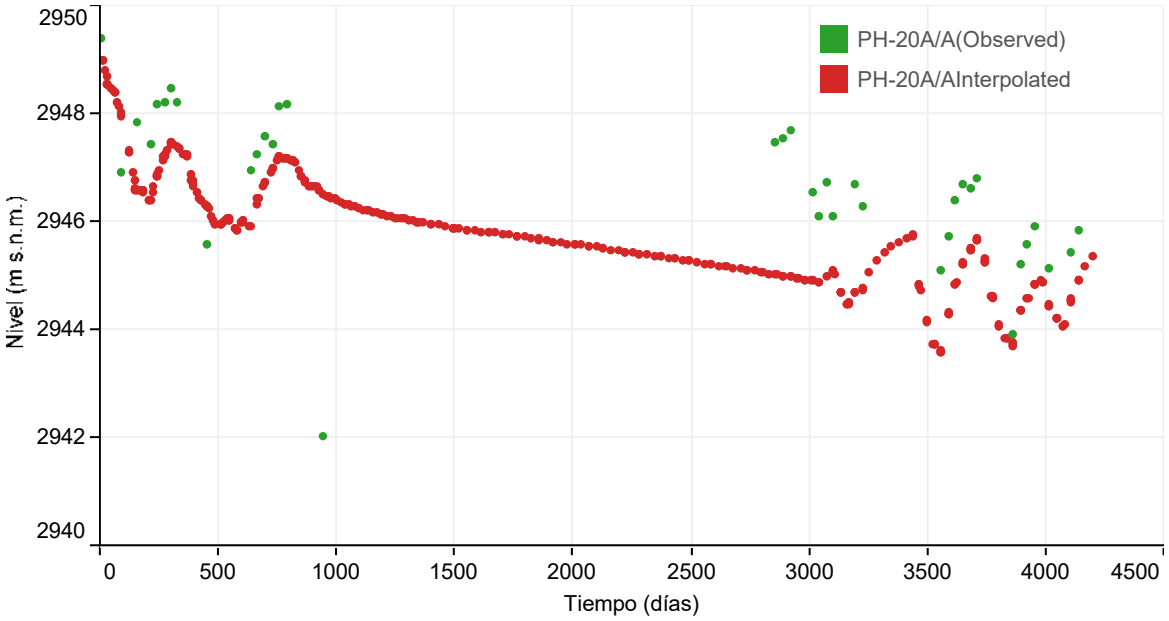


Figura 5-117. Valores simulados vs calculados en el pozo PH-20A. Fuente: elaboración propia.

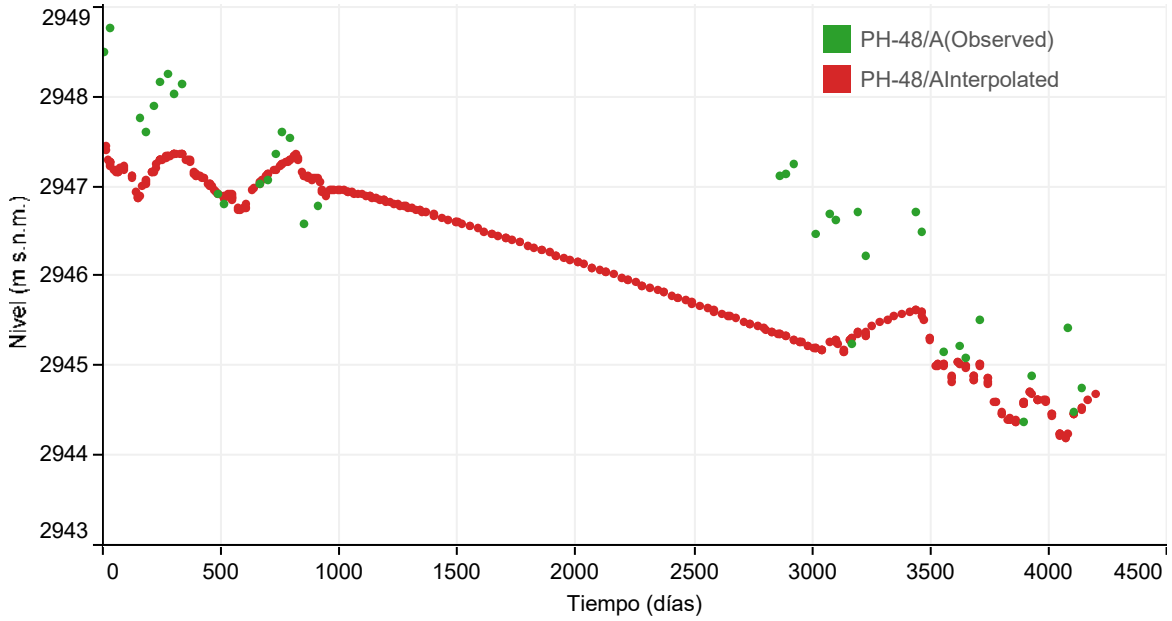


Figura 5-118. Valores simulados vs calculados en el pozo PH-48. Fuente: elaboración propia.

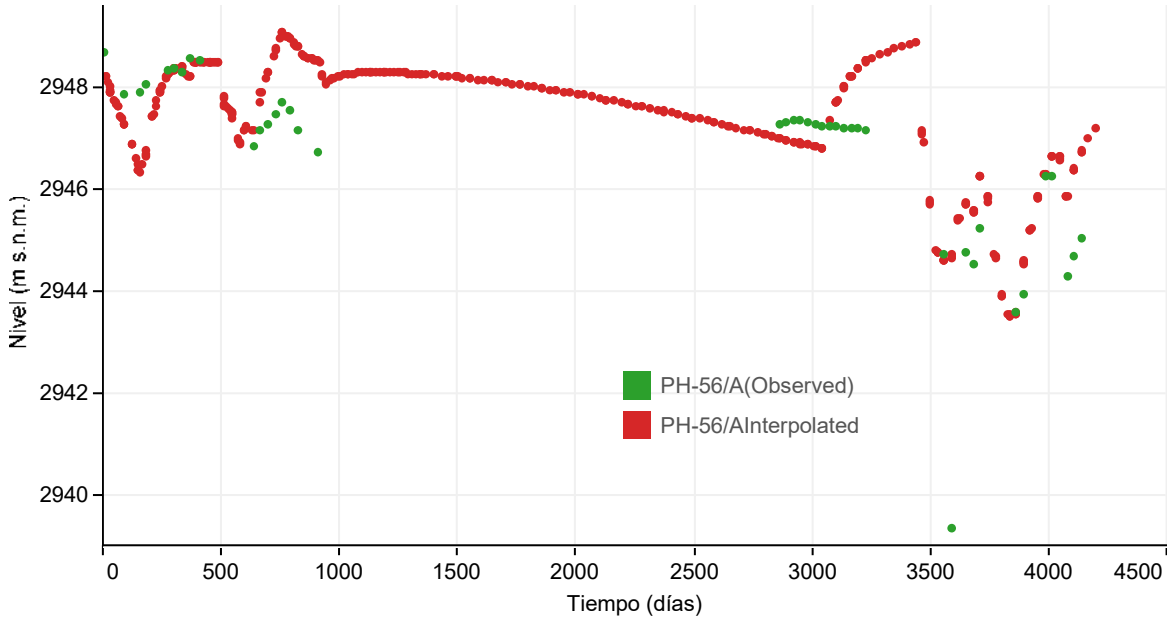


Figura 5-119. Valores simulados vs calculados en el pozo PH-56. Fuente: elaboración propia.

Campo bombeo central, parte central:

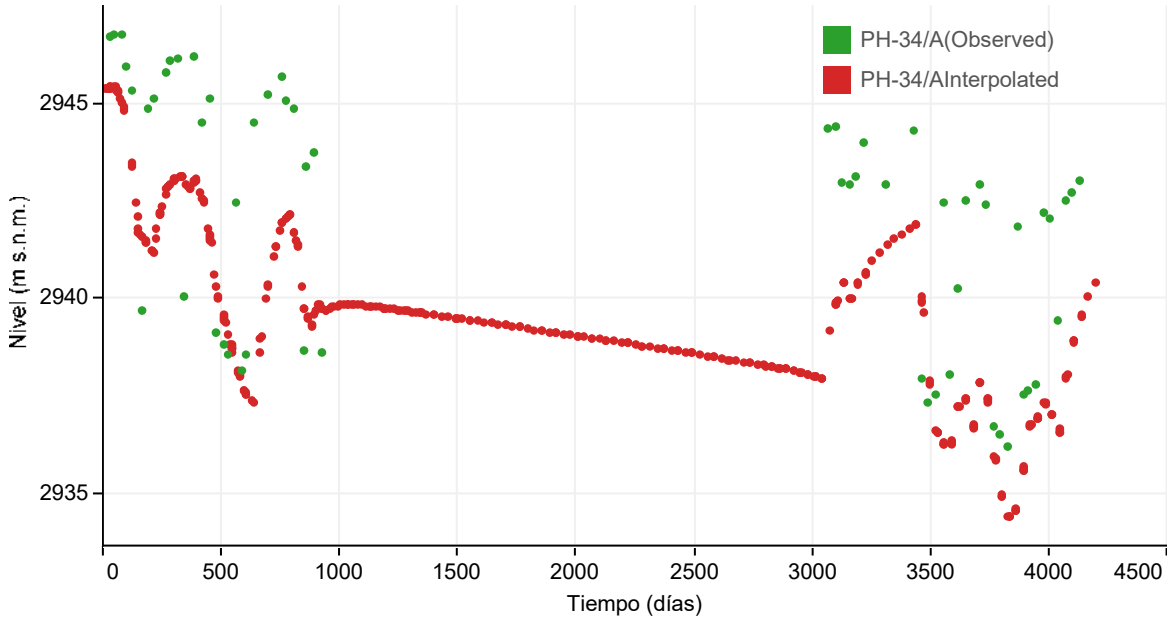


Figura 5-120. Valores simulados vs calculados en el pozo PH-34. Fuente: elaboración propia.

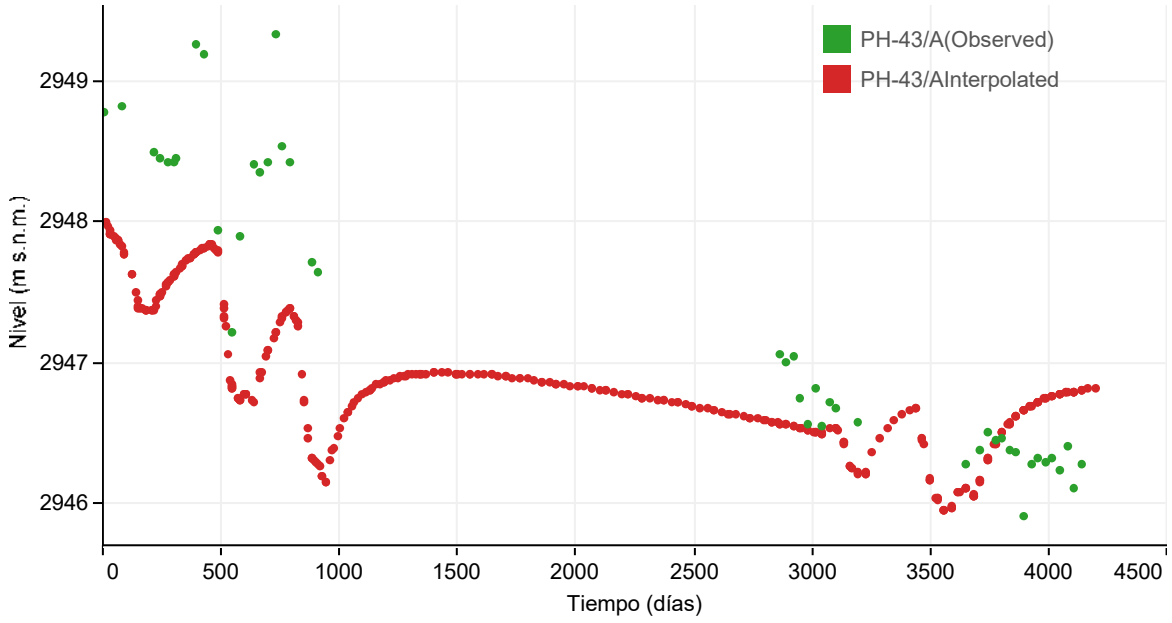


Figura 5-121. Valores simulados vs calculados en el pozo PH-43. Fuente: elaboración propia.

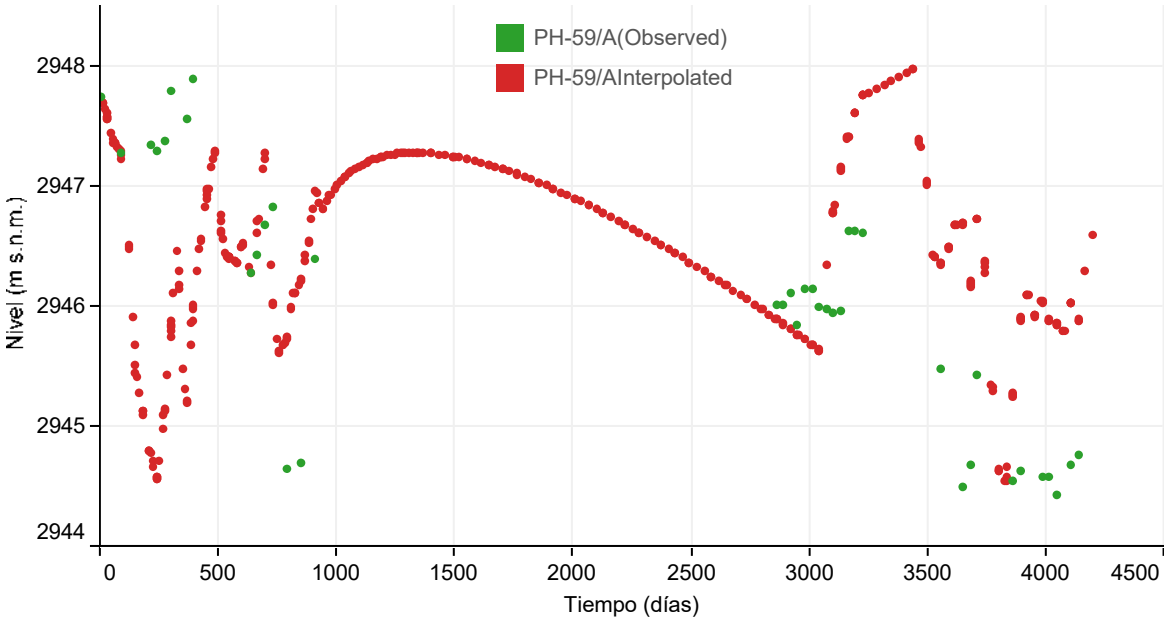


Figura 5-122. Valores simulados vs calculados en el pozo PH-59. Fuente: elaboración propia.

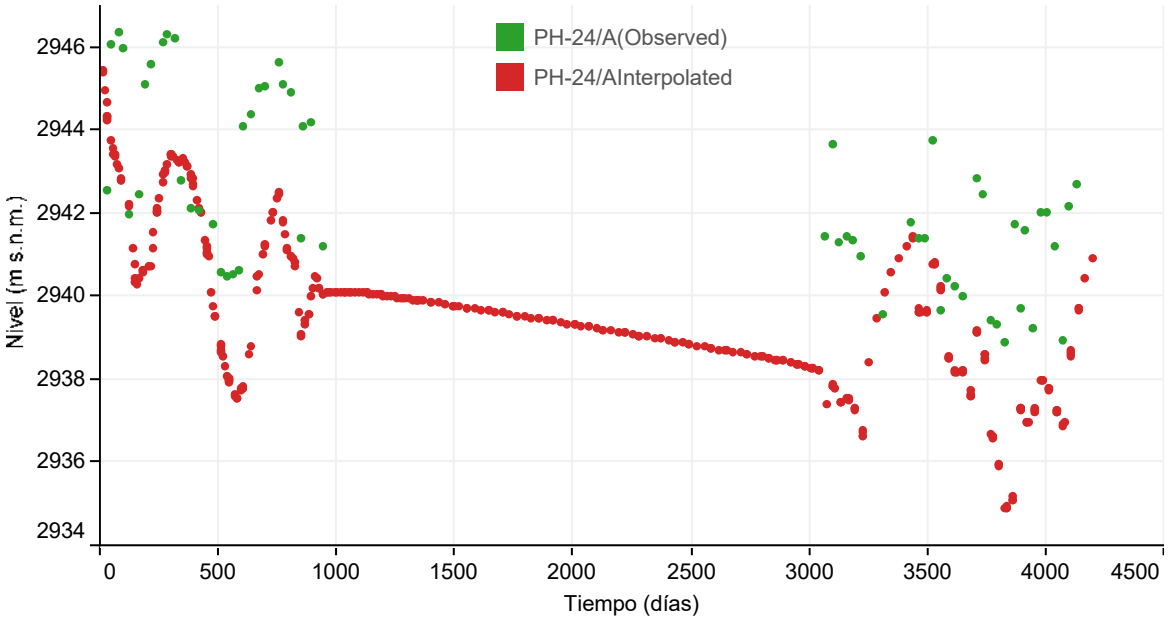


Figura 5-123. Valores simulados vs calculados en el pozo PH-24. Fuente: elaboración propia.

Parte sur del campo de bombeos central

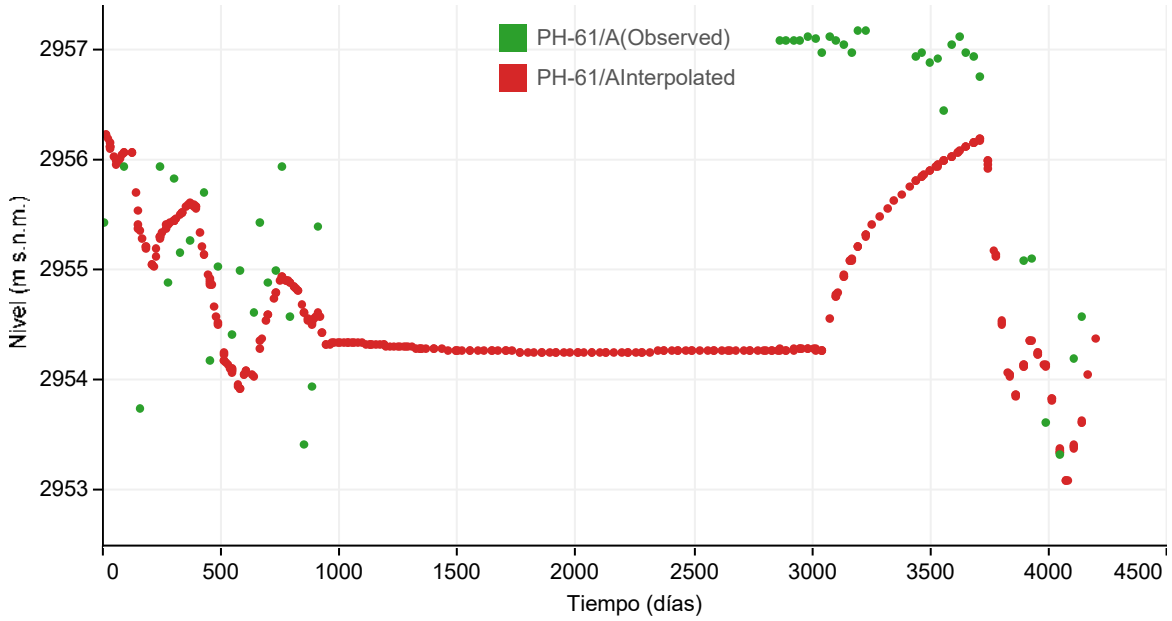


Figura 5-124. Valores simulados vs calculados en el pozo PH-61. Fuente: elaboración propia.

5.11.9 VALIDACIÓN DEL MODELO

Debido a que los datos disponibles para la construcción del modelo son muy escasos (dos periodos de 3 años cada uno, separados por un vacío de 5 años), se decidió emplear todo el registro conocido para la calibración del modelo, ya que con un solo periodo para calibrar no se podría observar el comportamiento general del acuífero.

Ahora bien, en términos de validación del modelo, puesto que existen 5 años sin datos, el hecho de que la piezometría calculada coincida con la última parte del primer periodo y con la primera del segundo periodo, se considera que el modelo reproduce el comportamiento del acuífero, no siendo por tanto imprescindible una validación del mismo. No obstante, esto no exime de que en caso de conseguir los datos de explotación y piezometría del periodo faltante, estos sean incorporados al modelo para verificar la calibración realizada en el mismo.

5.11.10 RESULTADOS OBTENIDOS

Se presentan a continuación los resultados obtenidos tras la ejecución del modelo una vez calibrado.

BALANCE HÍDRICO

Una vez calibrado el modelo se ha obtenido el balance hídrico para cada año desde septiembre de 2004 a diciembre de 2015. Se han introducido como entradas la recarga por precipitación y la inyección de agua realizada por parte de Minera Escondida en el sistema VCL-2. Las salidas se han calculado sumando la evaporación desde agua subterránea, las descargas producidas en las vertientes y las extracciones siendo la última la más significativa con diferencia. A continuación, en la **Tabla 5-53** se presenta el balance hídrico.

FECHA	ENTRADAS		SALIDAS			VARIACIÓN ALMACENAMIENTO
	Recarga	Inyección	Evaporación	Vertientes	Extracciones	
	L/s	L/s	L/s	L/s	L/s	L/s
sep-2004/ ago-2005	167,20	3,92	10,80	0,04	260,34	-100,03
sep-2005/ ago-2006	220,89	4,76	10,23	0,08	354,02	-138,61
sep-2006/ ago-2007	195,09	5,62	9,70	0,13	306,64	-115,64
sep-2007/ ago-2008	195,07	6,52	9,21	0,19	315,28	-122,90
sep-2008/ ago-2009	171,04	7,17	8,81	0,24	315,29	-145,90
sep-2009/ ago-2010	180,43	7,20	8,48	0,25	315,28	-136,14
sep-2010/ ago-2011	180,43	7,20	8,21	0,26	315,28	-135,87
sep-2011/ ago-2012	171,10	7,20	7,97	0,26	319,61	-149,29
sep-2012/ ago-2013	193,85	7,20	7,81	0,26	295,70	-102,47
sep-2013/ ago-2014	248,41	7,20	7,65	0,26	328,47	-80,51
sep-2014/ ago-2015	188,20	7,20	7,57	0,26	324,72	-136,89
sep-2015/ dic-2015	25,14	7,20	6,67	0,23	221,62	-195,96
Promedio (2004/ 2014)	178,07	6,53	8,59	0,20	306,02	-130,02

Tabla 5-53. Balance hídrico acuífero salar Punta Negra-Imilac. Fuente: elaboración propia.

Como se observa, los elementos del balance que mayor peso tienen son la recarga y las extracciones, y para cada año hay un déficit hídrico (variación de almacenamiento negativo) que oscila entre -80,51 L/s y –195,96 L/s.

También se ha calculado el balance para diferentes zonas del modelo con el objetivo de observar la situación actual por sectores. Las zonas 1 y 2 corresponden a los sistemas de vegas VCL-3 y VCL-2 respectivamente, la zona 3 al salar de Punta Negra, la zona 4 a la cuenca del salar de Punta Negra exceptuando las vegas y el salar (zonas 1, 2 y 3), y la zona 5 corresponde a la cuenca del salar de Imilac (**Figura 5-125**).

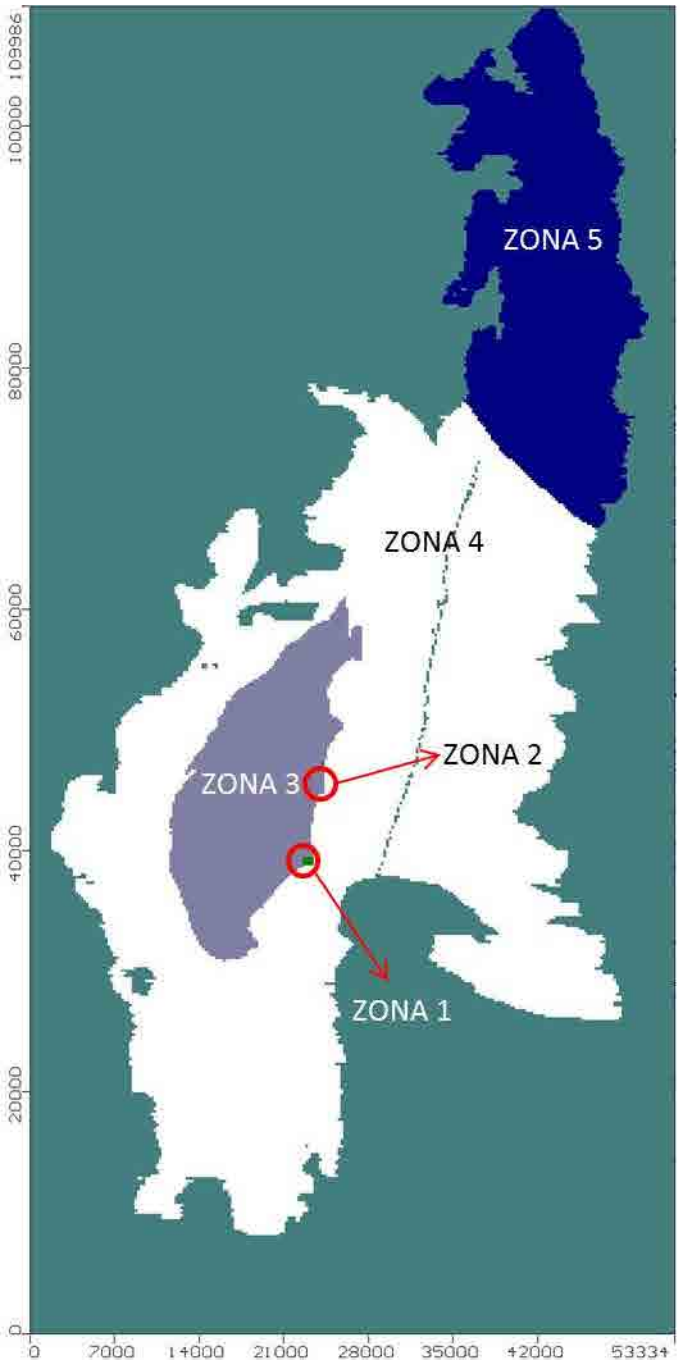


Figura 5-125. Zonas del modelo donde se ha calculado el balance hídrico. Fuente: elaboración propia.

En los sectores VCL-3 y VCL-2 se ha calculado el balance para una serie de celdas que agrupan cada uno de los sistemas con el objetivo de conocer las salidas naturales (drenes) para posteriormente, cuando se simulen escenarios futuros, ver si hay o no afección a los mismos.

Los resultados se presentan en las siguientes tablas (**Tabla 5-54**, **Tabla 5-55**, **Tabla 5-56**).

ZONA 1 – Sistema VCL-3

FECHA	ENTRADAS			SALIDAS			VARIACIÓN ALMACENAMIENTO
	Desde el Salar	Desde acuífero aluvial	Recarga	Hacia Salar	Hacia acuífero aluvial	Evaporación	
	L/s	L/s	L/s	L/s	L/s	L/s	L/s
sep-2004/ ago-2005	0,010	0,009	0,001	0,058	0,009	0,160	-0,208
sep-2005/ ago-2006	0,008	0,009	0,002	0,067	0,008	0,158	-0,213
sep-2006/ ago-2007	0,007	0,010	0,002	0,071	0,007	0,155	-0,215
sep-2007/ ago-2008	0,006	0,011	0,002	0,074	0,006	0,152	-0,215
sep-2008/ ago-2009	0,004	0,011	0,001	0,075	0,006	0,149	-0,214
sep-2009/ ago-2010	0,004	0,011	0,001	0,076	0,006	0,147	-0,212
sep-2010/ ago-2011	0,003	0,012	0,001	0,076	0,005	0,144	-0,210
sep-2011/ ago-2012	0,002	0,012	0,001	0,076	0,005	0,142	-0,208
sep-2012/ ago-2013	0,001	0,012	0,002	0,076	0,005	0,140	-0,206
sep-2013/ ago-2014	0,000	0,012	0,002	0,075	0,005	0,137	-0,203
sep-2014/ ago-2015	0,000	0,012	0,002	0,075	0,005	0,135	-0,201
sep-2015/ dic-2015	0,000	0,012	0,000	0,075	0,005	0,118	-0,186
Promedio (2004/2014)	0,004	0,011	0,001	0,073	0,006	0,145	-0,207

Tabla 5-54. Resultados balance sistema VCL-3. Fuente: elaboración propia.

El sistema VCL-3 recibe a portes principalmente desde el acuífero aluvial y por recarga directa por precipitación. La salida principal es por evaporación y como recarga del salar. La variación de almacenamiento es negativa, como consecuencia se estima una reducción paulatina del caudal en las vertientes del sistema VCL-3.

ZONA 2 – Sistema VCL-2

FECHA	ENTRADAS			
	Desde el Salar	Desde acuífero aluvial	Recarga	Pozos inyección
	L/s	L/s	L/s	L/s
sep-2004/ago-2005	0,002	0,000	0,007	3,918
sep-2005/ago-2006	0,000	0,000	0,009	4,756
sep-2006/ago-2007	0,000	0,000	0,008	5,616
sep-2007/ago-2008	0,000	0,000	0,008	6,523
sep-2008/ago-2009	0,000	0,000	0,007	7,167
sep-2009/ago-2010	0,000	0,000	0,008	7,200
sep-2010/ago-2011	0,000	0,000	0,008	7,200
sep-2011/ago-2012	0,000	0,000	0,007	7,200
sep-2012/ago-2013	0,000	0,000	0,008	7,200
sep-2013/ago-2014	0,000	0,000	0,011	7,200
sep-2014/ago-2015	0,000	0,000	0,008	7,200
sep-2015/dic-2015	0,000	0,000	0,001	7,200
Promedio (2004/2014)	0,000	0,000	0,008	6,532

Tabla 5-55. Resultados entradas balance sistema VCL-2. Fuente: elaboración propia.

FECHA	SALIDAS				VARIACIÓN ALAMCENAMIENTO
	Hacia el Salar	Hacia el acuífero aluvial	Evaporación	Drenes	
	L/s	L/s	L/s	L/s	L/s
sep-2004/ago-2005	2,094	1,401	0,038	0,036	0,360
sep-2005/ago-2006	2,691	1,928	0,038	0,081	0,028
sep-2006/ago-2007	3,161	2,240	0,038	0,126	0,060
sep-2007/ago-2008	3,654	2,557	0,039	0,186	0,096
sep-2008/ago-2009	4,041	2,800	0,040	0,241	0,053
sep-2009/ago-2010	4,081	2,820	0,040	0,252	0,014
sep-2010/ago-2011	4,086	2,820	0,041	0,255	0,005
sep-2011/ago-2012	4,088	2,820	0,041	0,257	0,002
sep-2012/ago-2013	4,088	2,822	0,041	0,257	0,000
sep-2013/ago-2014	4,089	2,823	0,041	0,257	0,001
sep-2014/ago-2015	4,087	2,826	0,041	0,256	-0,003
sep-2015/dic-2015	4,095	2,836	0,036	0,256	-0,022
Promedio (2004/2014)	3,688	2,558	0,039	0,205	0,050

Tabla 5-56. Resultados salidas balance sistema VCL-2. Fuente: elaboración propia.

El sistema VCL-2 recibe principalmente aportes de la recarga artificial que realiza Minera Escondida, y en menor medida por recarga directa. No se han observado aportes de desde el acuífero aluvial o desde el acuífero del salar, ya que los conos de bombeo deprimen el nivel en las inmediaciones del mismo.

La salida principal se da hacia el acuífero aluvial y el acuífero del salar. En menor medida por evaporación y en forma de vertiente (dren). La variación de almacenamiento es positiva por lo que el sistema seguirá funcionando siempre que se mantenga la recarga artificial en la zona.

ZONA 3 – Salar de Punta Negra

FECHA	ENTRADAS				SALIDAS				VARIACIÓN ALAMCENAMIENTO
	Desde VCL-2	Desde VCL-3	Desde acuífero aluvial	Recarga	Hacia VCL-2	Hacia VCL-3	Hacia acuífero aluvial	EV	
	L/s	L/s	L/s	L/s	L/s	L/s	L/s	L/s	L/s
sep-2004/ago-2005	2,094	0,058	23,082	17,667	0,002	0,010	6,414	4,155	32,320
sep-2005/ago-2006	2,691	0,067	20,333	23,335	0,000	0,008	6,636	3,863	35,919
sep-2006/ago-2007	3,161	0,071	19,472	20,625	0,000	0,007	6,464	3,587	33,271
sep-2007/ago-2008	3,654	0,074	19,028	20,731	0,000	0,006	6,381	3,329	33,772
sep-2008/ago-2009	4,041	0,075	18,802	18,259	0,000	0,004	6,401	3,113	31,659
sep-2009/ago-2010	4,081	0,076	18,623	19,258	0,000	0,004	6,400	2,933	32,701
sep-2010/ago-2011	4,086	0,076	18,478	19,258	0,000	0,003	6,404	2,777	32,715
sep-2011/ago-2012	4,088	0,076	18,343	18,282	0,000	0,002	6,431	2,633	31,724
sep-2012/ago-2013	4,088	0,076	18,234	20,743	0,000	0,001	6,468	2,539	34,133
sep-2013/ago-2014	4,089	0,075	18,123	26,482	0,000	0,000	6,532	2,439	39,798
sep-2014/ago-2015	4,087	0,075	18,038	19,979	0,000	0,000	6,579	2,393	33,208
sep-2015/dic-2015	4,095	0,075	17,972	2,634	0,000	0,000	6,629	2,095	16,051
Promedio (2004/2014)	3,688	0,073	19,044	18,938	0,000	0,004	6,478	2,988	32,273

Tabla 5-57. Resultados salidas balance sistema VCL-2. Fuente: elaboración propia.

Las entradas se producen principalmente desde el acuífero aluvial (Zona 4) y por recarga directa. En menor medida desde el sistema VCL-2 y VCL-3. Las salidas se dan por evaporación y hacia el acuífero aluvial. La variación de almacenamiento en el salar de positiva.

ZONA 4 – Cuenca salar de Punta Negra

FECHA	ENTRADAS					SALIDAS					VARIACIÓN ALMACENAMIENTO
	Desde el Salar	Desde VCL-2	Desde VCL-1	Desde Imilac	Recarga	Extracciones	Hacia Salar	Hacia VCL-2	Hacia VCL-1	Hacia Imilac	
	L/s	L/s	L/s	L/s	L/s	L/s	L/s	L/s	L/s	L/s	L/s
sep-2004/ ago-2005	6,41	1,40	0,00	58,51	121,94	260,34	23,08	0,00	0,00	34,95	-138,40
sep-2005/ ago-2006	6,64	1,93	0,00	55,77	161,21	354,02	20,33	0,00	0,00	35,62	-192,81
sep-2006/ ago-2007	6,46	2,24	0,00	54,33	142,32	306,64	19,47	0,00	0,00	35,66	-164,33
sep-2007/ ago-2008	6,38	2,56	0,00	53,24	142,12	315,28	19,03	0,00	0,00	35,62	-173,16
sep-2008/ ago-2009	6,40	2,80	0,00	52,31	124,43	315,29	18,80	0,00	0,00	35,56	-190,86
sep-2009/ ago-2010	6,40	2,82	0,00	51,48	131,29	315,28	18,62	0,00	0,00	35,49	-184,00
sep-2010/ ago-2011	6,40	2,82	0,00	50,75	131,29	315,28	18,48	0,00	0,00	35,41	-184,00
sep-2011/ ago-2012	6,43	2,82	0,00	50,03	124,45	319,62	18,34	0,00	0,00	35,32	-195,17
sep-2012/ ago-2013	6,47	2,82	0,00	49,42	140,98	295,70	18,23	0,00	0,00	35,23	-154,72
sep-2013/ ago-2014	6,53	2,82	0,00	48,73	180,93	328,47	18,12	0,00	0,00	35,11	-147,54
sep-2014/ ago-2015	6,58	2,83	0,00	48,21	137,14	324,72	18,04	0,00	0,00	35,02	-187,58
sep-2015/ dic-2015	6,63	2,84	0,00	47,79	18,15	221,62	17,97	0,00	0,00	34,94	-203,48
Promedio (2004/2014)	6,48	2,56	0,00	51,71	129,69	306,02	19,04	0,00	0,00	35,33	-176,34

Tabla 5-58. Resultados balance cuenca salar de Punta Negra. Fuente: elaboración propia.

Las entradas se producen principalmente por recarga directa y desde la cuenca del salar de Imilac (Zona 5). Las salidas principalmente por extracciones y en menor medida por aportes desde la cuenca del salar de Imilac y desde el acuífero del salar de Punta Negra. La variación de almacenamiento es claramente negativa con un promedio de -176,34 L/s reduciéndose cada año el almacenamiento de forma significativa.

ZONA 5 – Cuenca salar de Imilac

FECHA	ENTRADAS		SALIDAS		VARIACIÓN ALAMCENAMIENTO
	Desde aluvial Punta Negra	Recarga	Hacia aluvial Punta Negra	Evaporación	
	L/s	L/s	L/s	L/s	L/s
sep-2004/ago-2005	34,95	27,54	58,51	6,45	21,09
sep-2005/ago-2006	35,62	36,28	55,77	6,17	30,11
sep-2006/ago-2007	35,66	32,09	54,33	5,92	26,17
sep-2007/ago-2008	35,62	32,16	53,24	5,69	26,47
sep-2008/ago-2009	35,56	28,30	52,31	5,51	22,79
sep-2009/ago-2010	35,49	29,83	51,48	5,36	24,47
sep-2010/ago-2011	35,41	29,83	50,75	5,25	24,58
sep-2011/ago-2012	35,32	28,32	50,03	5,16	23,16
sep-2012/ago-2013	35,23	32,06	49,42	5,09	26,97
sep-2013/ago-2014	35,11	40,93	48,73	5,04	35,90
sep-2014/ago-2015	35,02	31,03	48,21	5,00	26,02
sep-2015/dic-2015	34,94	4,35	47,79	4,43	-0,07
Promedio (2004/2014)	35,33	29,39	51,71	5,42	23,97

Tabla 5-59. Resultados balance cuneca salar de Imilac. Fuente: elaboración propia.

Las entradas se producen por recarga directa y desde la cuenca del salar de Punta Negra y salidas por evaporación y por transferencia hacia la cuenca del salar de Punta Negra. Si bien, existe un intercambio entre la cuenca del salar de Imilac y la cuenca del salar de Punta Negra, donde la primera cede un caudal mayor que la segunda, la variación de almacenamiento no resulta negativa. En esta caso la recarga juega un papel importante en el equilibrio de la cuenca manteniendo el almacenamiento a pesar del caudal cedido a la cuenca vecina.

VOLUMEN ALMACENADO

Se ha calculado el volumen almacenado en el acuífero en base a los siguientes parámetros:

- Posición del basamento
- Nivel piezométrico calculado para el último periodo simulado (diciembre 2015)
- Coeficiente de almacenamiento calibrado en el modelo

En primer lugar se ha calculado, a partir de operaciones geográficas con ArcGIS, el volumen existente entre el basamento y el nivel piezométrico del acuífero (423.892 hm^3) y posteriormente ha sido multiplicado por el coeficiente de almacenamiento medio (0,17), obteniendo por tanto un volumen almacenado de **72.062 hm^3**.

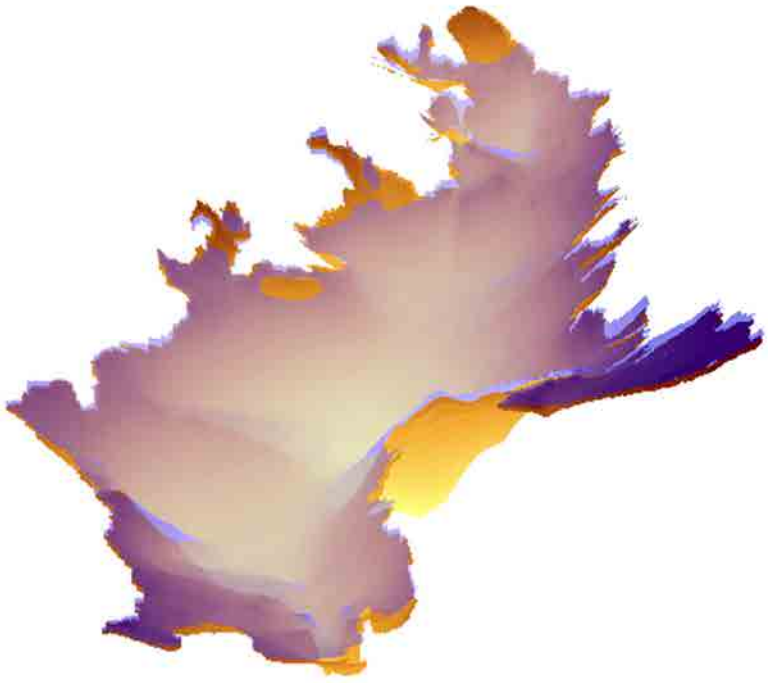


Figura 5-126. Imagen tridimensional del basamento (tonos naranjas) y superficie piezométrica (tonos azules). Fuente: elaboración propia.

Asimismo, conociendo la superficie del acuífero (2.201 km^2), y el volumen existente entre la superficie piezométrica y el basamento (423.892 hm^3), se ha obtenido un valor de 193 m de espesor saturado medio.

NIVELES CALCULADOS

Los niveles calculados se distribuyen en el acuífero de acuerdo a las siguientes figuras.

- Isopiezas para periodo inicial (1 de septiembre de 2014):

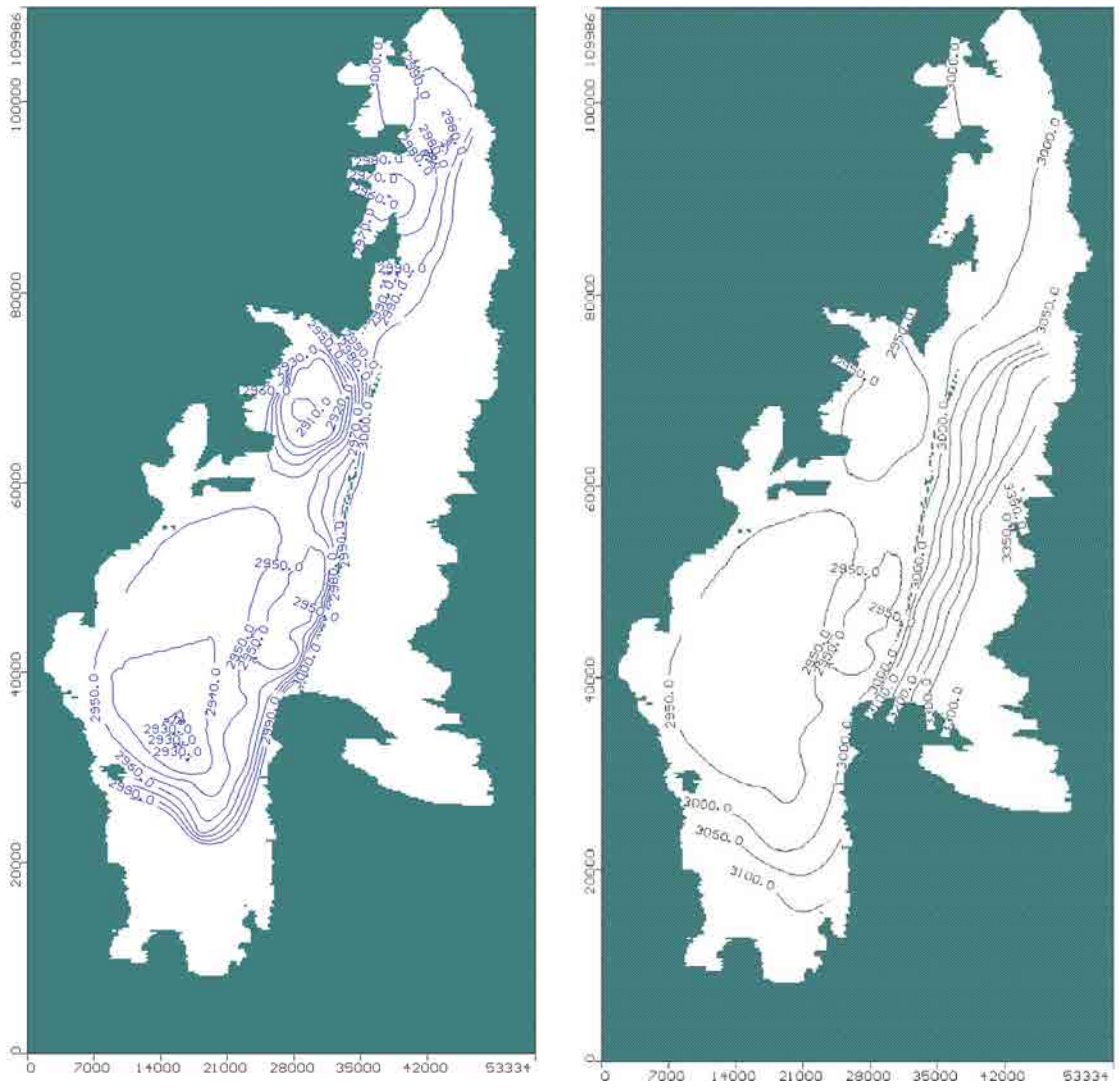


Figura 5-127. Isopiezas obtenidas septiembre. 2014. Figura izquierda: Contornos cada 10 m entre 2900 y 3000 m. Figura derecha: Contornos cada 50 m entre 2900 y 3400 m. Fuente: elaboración propia.

- Isopiezas obtenidas después de un año de simulación (1 septiembre de 2005):

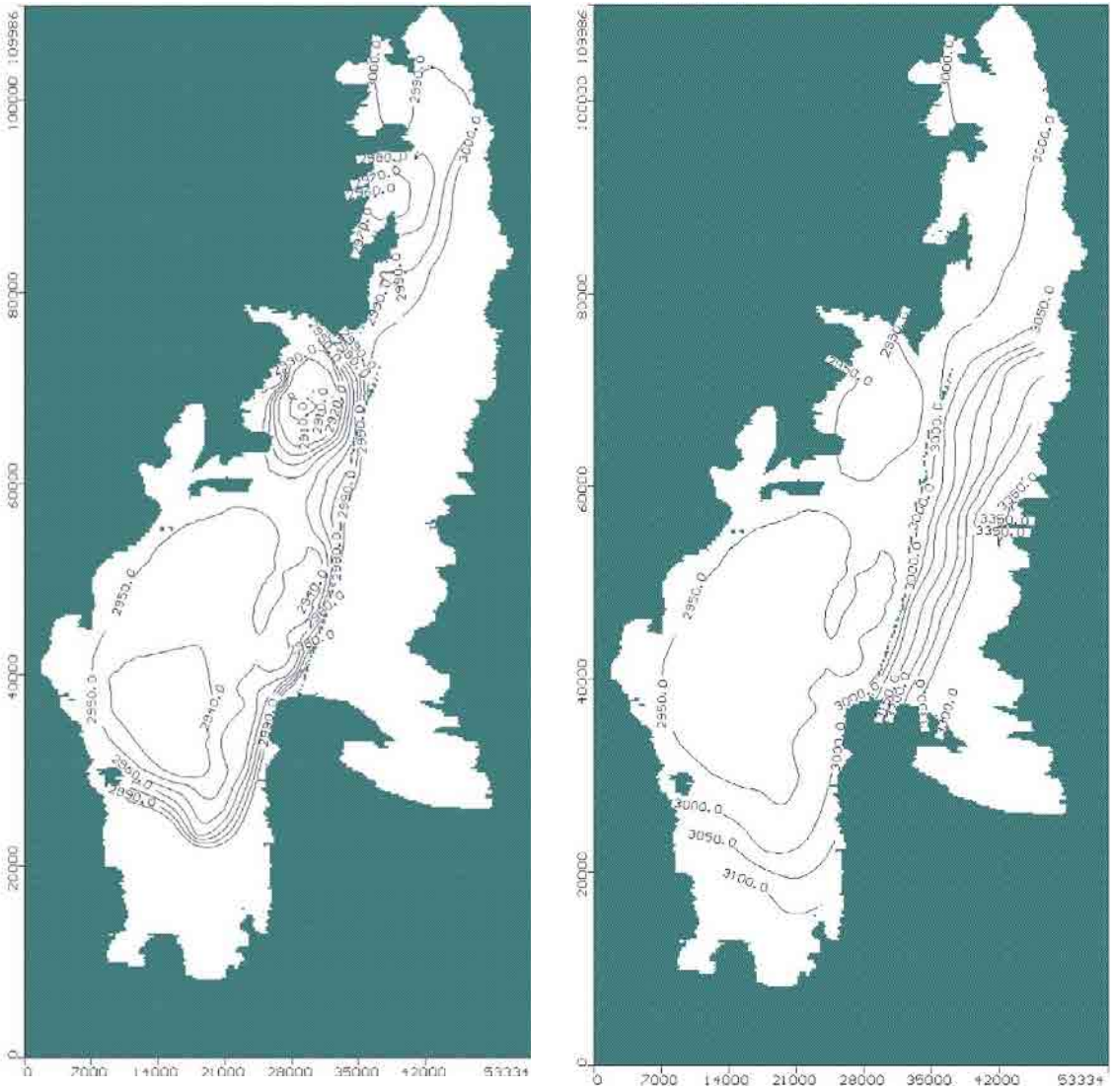


Figura 5-128. Isopiezas obtenidas septiembre 2005. Figura izquierda: Contornos cada 10 m entre 2900 y 3000 m. Figura derecha: Contornos cada 50 m entre 2900 y 3400 m. Fuente: elaboración propia.

- Isopiezas obtenidas después de cinco años de simulación (1 septiembre de 2009):

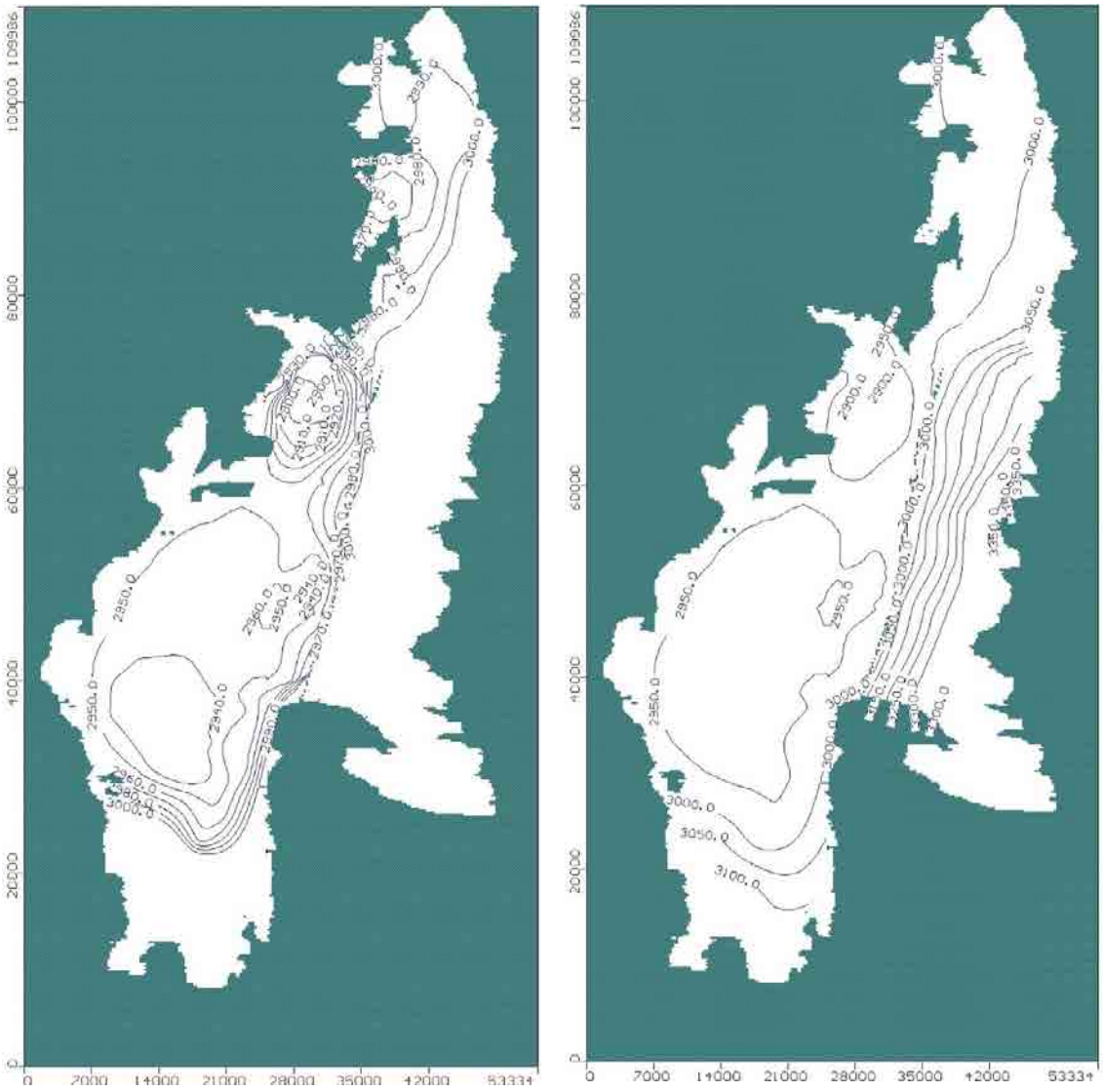


Figura 5-129. Isopiezas obtenidas septiembre 2009. Figura izquierda: Contornos cada 10 m entre 2900 y 3000 m. Figura derecha: Contornos cada 50 m entre 2900 y 3400 m. Fuente: elaboración propia.

- Isopiezas obtenidas después de diez años de simulación (1 septiembre de 2014):

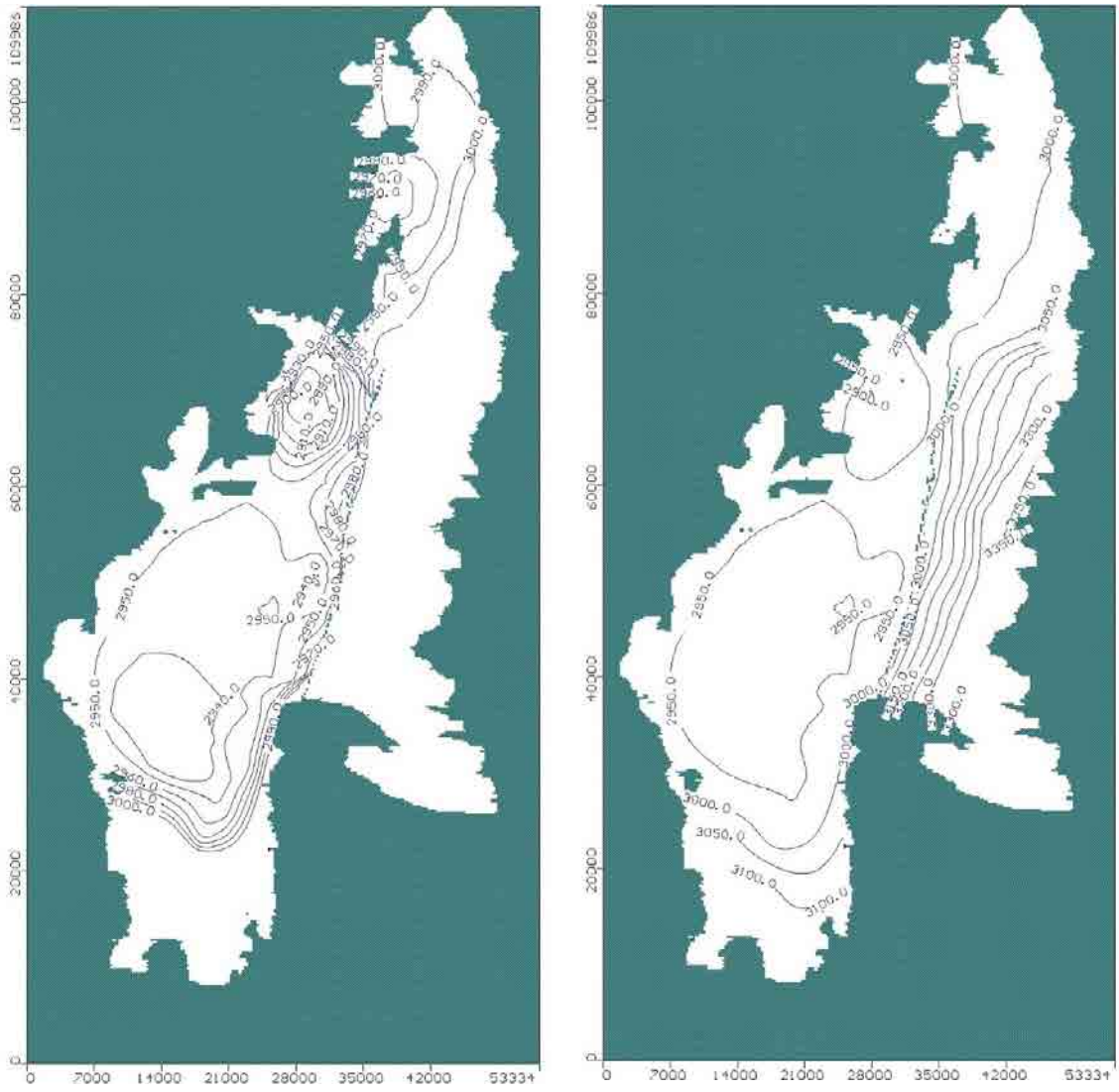


Figura 5-130. Isopiezas obtenidas septiembre 2014. Figura izquierda: Contornos cada 10 m entre 2900 y 3000 m. Figura derecha: Contornos cada 50 m entre 2900 y 3400 m. Fuente: elaboración propia.

- Isopiezas obtenidas al final del periodo de simulación (31 diciembre de 2015):



Figura 5-131. Isopiezas obtenidas diciembre 2015. Figura izquierda: Contornos cada 10 m entre 2900 y 3000 m. Figura derecha: Contornos cada 50 m entre 2900 y 3400 m. Fuente: elaboración propia.

Para entender mejor la evolución piezométrica en el acuífero dentro del periodo simulado, se ha generado un mapa de descensos en el cual se observan conos de descensos en determinadas zonas, concretamente en el campo de bombeos norte, en la parte sur del campo de bombeos central, en algunas partes del salar de Punta Negra y en otras del Salar de Imilac:

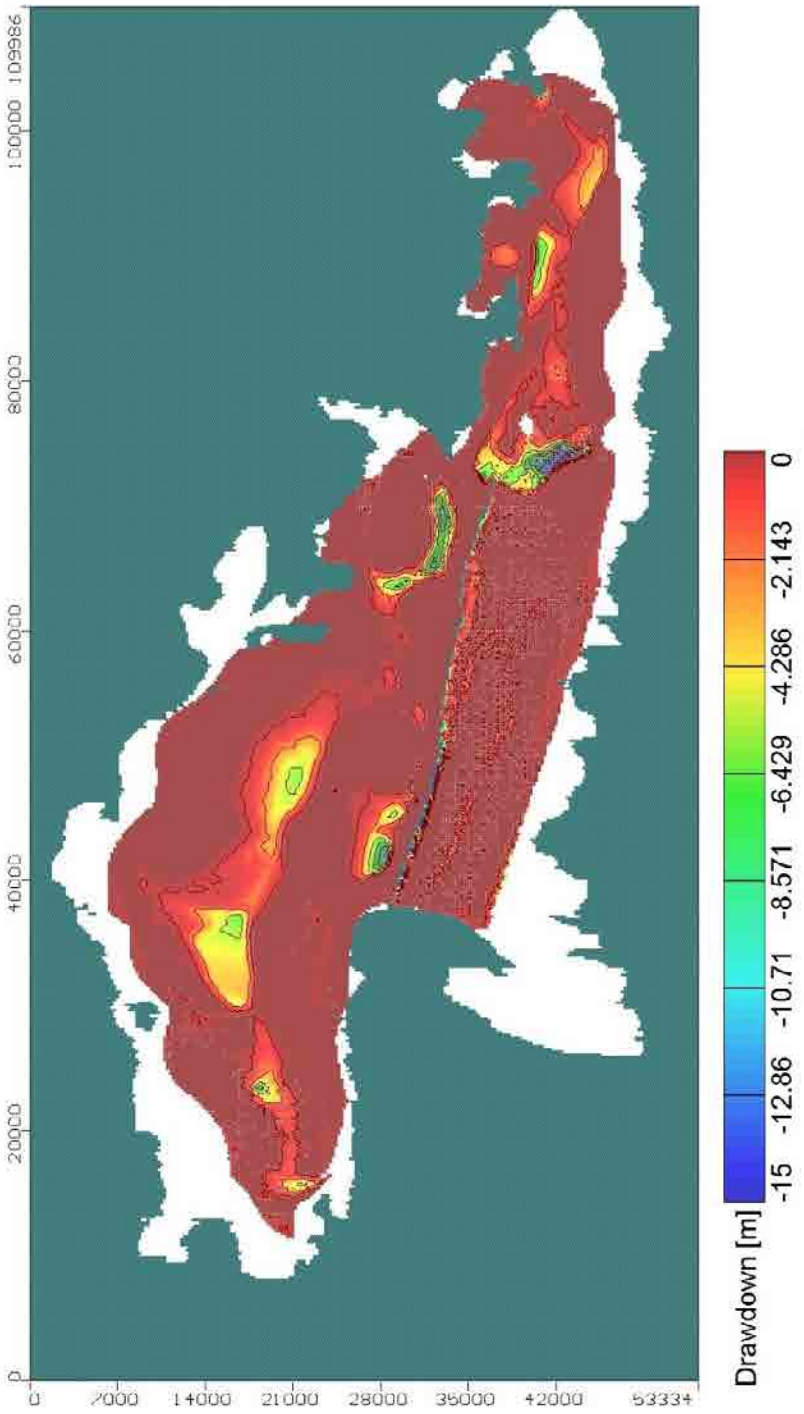


Figura 5-132. Descensos piezométricos al final del periodo de simulación. Fuente: elaboración propia.

Tambien se presentan los perfiles equivalentes E-W y N-S donde se observa la distribución de la piezometría calculada para el ultimo periodo simulado (diciembre 2015). En el primer perfil se distingue un cambio en el gradiente hidráulico producto de la influencia de la falla sobre la piezometría. La presencia de una zona con menor permeabilidad produce un aumento del gradiente en este punto. Por el contrario el gradiente disminuye al acercarse al salar, llegando a ser practicamente nulo.

El segundo perfil empieza en la cuenca del salar de Imilac y llega hasta la zona sur de la cuenca del salar de Punta Negra. Destacar por un lado la presencia de una divisoria de aguas subterránea entre ambas cuencas y por otro la diferencia entre el espesor saturado en una cuenca y otra. Aparentemente la cuenca del salar de Punta Negra dispone de un volumen almacenado mayor al de Imilac.

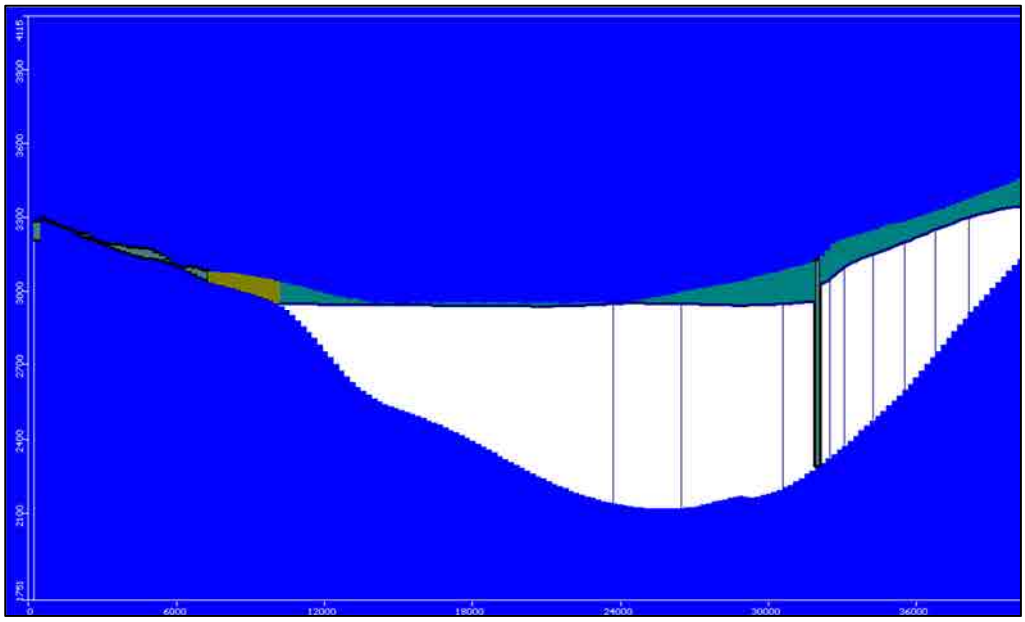


Figura 5-133. Perfil oeste-este a la altura del salar de Punta Negra. Fuente: elaboración propia.

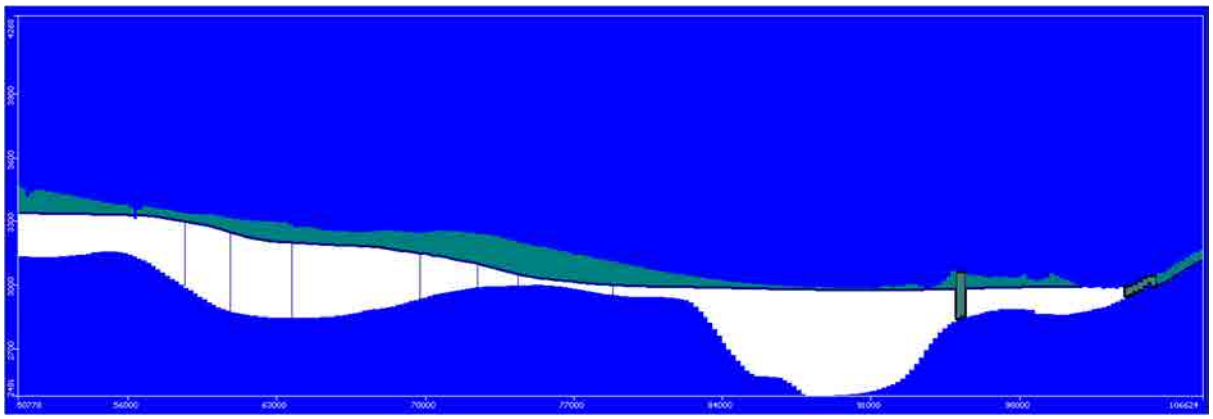


Figura 5-134. Perfil oeste-este a la altura del salar de Punta Negra. Fuente: elaboración propia.

5.11.11 ESCENARIOS FUTUROS

Uno de los objetivos de la construcción de modelos numéricos, además de emplearlos como herramientas de gestión en tiempo real, es la simulación de escenarios futuros basados en situaciones que podrían darse o en la definición de reglas de explotación que tengan como finalidad el uso sustentable de las aguas subterráneas.

Para ello, partiendo de la calibración del modelo, se han simulado 4 escenarios futuros, consistentes en lo siguiente:

Escenario 1: totalidad de **derechos otorgados**. En este escenario se incorporan los caudales de bombeo otorgados.

Escenario 2: totalidad de **derechos otorgados y en trámite**. En este escenario se incluyen tanto los derechos otorgados como los que se encuentran en trámite.

Escenario 3: **sustentabilidad hídrica**. Este escenario pretende definir el volumen de explotación sustentable en el acuífero sin que afecte al acuífero teniendo en cuenta los siguientes criterios:

- No afección a la demanda.
- No afección a las captaciones.
- No afección al sistema superficial.
- No afección al estado cuantitativo del acuífero.

Escenario 4: **sustentabilidad hídrica, según explotación actual**. En este escenario se pretende verificar si el volumen de explotación e inyección actual es sustentable a largo plazo (50 años).

Escenario 5: **sustentabilidad hídrica, variando la explotación actual**. Este último escenario pretende definir el volumen de explotación sustentable en el acuífero sin que afecte al acuífero teniendo en cuenta las captaciones que actualmente explotan (atendiendo al catastro realizado), así como la operación de inyección que se realiza, modificando, de forma homogénea, el caudal de explotación hasta encontrar el régimen de explotación sustentable.

ESCENARIO 1. TOTALIDAD DE LOS DERECHOS OTORGADOS

El primer escenario simulado consiste en mantener todas las condiciones simuladas para la situación actual (recarga, evaporación, etc.), pero cambiando los pozos de explotación actuales por aquellos con derechos constituidos, e incluyendo los caudales de bombeo otorgados, lo que supone un caudal de 1.566 L/s.

Código modelo	Expediente captación	X	Y	Q Otorgado (L/s)	Q otorgado m^3/d	Cuenca
1UA-0203-1	UA-0203-1	528.425	7.333.150	22,0	1.900,8	Salar Imilac
2UA-0203-1	UA-0203-1	522.789	7.323.835	1,0	86,4	Salar Imilac
3UA-0203-806146	UA-0203-806146	505.794	7.267.653	17,5	1.512,0	Salar Punta Negra
4UA-0203-1	UA-0203-1	512.817	7.284.356	36,0	3.110,4	Salar Punta Negra
5UA-0203-1	UA-0203-1	513.818	7.307.280	16,0	1.382,4	Salar Punta Negra
6UA-0203-1	UA-0203-1	511.641	7.301.688	25,0	2.160,0	Salar Punta Negra
7UA-0203-1	UA-0203-1	514.579	7.294.940	24,0	2.073,6	Salar Punta Negra
8UA-0203-1	UA-0203-1	501.871	7.257.788	16,0	1.382,4	Salar Punta Negra
9UA-0203-1	UA-0203-1	514.308	7.298.713	13,0	1.123,2	Salar Punta Negra
10UA-0203-1	UA-0203-1	512.588	7.283.898	12,0	1.036,8	Salar Punta Negra
11UA-0203-1	UA-0203-1	518.486	7.271.824	5,0	432,0	Salar Punta Negra
12UA-0203-1	UA-0203-1	524.263	7.291.138	1,0	86,4	Salar Punta Negra
13UA-0203-1	UA-0203-1	512.806	7.284.333	26,0	2.246,4	Salar Punta Negra
14UA-0203-1	UA-0203-1	500.359	7.262.741	33,0	2.851,2	Salar Punta Negra
15UA-0203-1	UA-0203-1	514.599	7.294.881	15,0	1.296,0	Salar Punta Negra
16UA-0203-1	UA-0203-1	513.794	7.307.288	20,0	1.728,0	Salar Punta Negra
17UA-0203-1	UA-0203-1	511.624	7.301.677	25,0	2.160,0	Salar Punta Negra
18UA-0203-1	UA-0203-1	512.082	7.278.753	2,0	172,8	Salar Punta Negra
19UA-0203-1	UA-0203-1	504.673	7.267.987	9,0	777,6	Salar Punta Negra
20UA-0203-1	UA-0203-1	511.795	7.286.117	14,0	1.209,6	Salar Punta Negra
21UA-0203-1	UA-0203-1	510.561	7.298.756	2,0	172,8	Salar Punta Negra
22UA-0203-1	UA-0203-1	508.044	7.293.552	20,0	1.728,0	Salar Punta Negra
23ND-0203-245	ND-0203-245	513.794	7.307.152	5,6	483,8	Salar Punta Negra
24ND-0203-245	ND-0203-245	520.793	7.305.652	7,0	604,8	Salar Punta Negra
25ND-0203-245	ND-0203-245	513.294	7.305.652	14,1	1.218,2	Salar Punta Negra
26ND-0203-245	ND-0203-245	514.794	7.305.652	7,0	604,8	Salar Punta Negra
27ND-0203-245	ND-0203-245	512.294	7.304.152	8,4	725,8	Salar Punta Negra
28ND-0203-245	ND-0203-245	513.794	7.304.152	4,4	380,2	Salar Punta Negra
29ND-0203-245	ND-0203-245	511.794	7.302.652	35,1	3.032,6	Salar Punta Negra
30ND-0203-245	ND-0203-245	513.294	7.302.652	2,2	190,1	Salar Punta Negra

Código modelo	Expediente captación	X	Y	Q Otorgado (L/s)	Q otorgado m^3/d	Cuenca
31ND-0203-280	ND-0203-280	513.794	7.307.152	32,4	2.799,4	Salar Punta Negra
32ND-0203-280	ND-0203-280	514.794	7.300.649	26,2	2.263,7	Salar Punta Negra
33ND-0203-280	ND-0203-280	514.293	7.308.153	28,0	2.419,2	Salar Punta Negra
34ND-0203-280	ND-0203-280	513.294	7.305.652	13,9	1.201,0	Salar Punta Negra
35ND-0203-293	ND-0203-293	511.794	7.305.652	33,0	2.851,2	Salar Punta Negra
36ND-0203-293	ND-0203-293	512.294	7.304.152	28,6	2.471,0	Salar Punta Negra
37ND-0203-293	ND-0203-293	511.794	7.302.652	44,9	3.879,4	Salar Punta Negra
38ND-0203-293	ND-0203-293	512.794	7.288.653	15,0	1.296,0	Salar Punta Negra
39ND-0203-317	ND-0203-317	515.294	7.307.152	19,0	1.641,6	Salar Punta Negra
40ND-0203-317	ND-0203-317	514.794	7.305.652	10,0	864,0	Salar Punta Negra
41ND-0203-317	ND-0203-317	513.794	7.304.152	13,7	1.183,7	Salar Punta Negra
42ND-0203-317	ND-0203-317	513.294	7.302.652	17,8	1.537,9	Salar Punta Negra
43ND-0203-317	ND-0203-317	514.794	7.299.152	19,0	1.641,6	Salar Punta Negra
44ND-0203-317	ND-0203-317	514.790	7.295.158	21,0	1.814,4	Salar Punta Negra
45ND-0203-317	ND-0203-317	513.294	7.288.653	19,2	1.658,9	Salar Punta Negra
46ND-0203-317	ND-0203-317	513.297	7.287.655	34,0	2.937,6	Salar Punta Negra
47ND-0203-317	ND-0203-317	513.294	7.286.653	5,0	432,0	Salar Punta Negra
48ND-0203-317	ND-0203-317	513.294	7.285.655	37,2	3.214,1	Salar Punta Negra
49ND-0203-317	ND-0203-317	513.294	7.284.653	31,0	2.678,4	Salar Punta Negra
50ND-0203-317	ND-0203-317	513.794	7.285.153	25,0	2.160,0	Salar Punta Negra
51ND-0203-317	ND-0203-317	512.792	7.306.653	19,5	1.684,8	Salar Punta Negra
52ND-0203-317	ND-0203-317	513.820	7.284.183	30,0	2.592,0	Salar Punta Negra
53ND-0203-317	ND-0203-317	510.315	7.304.909	0,1	12,1	Salar Punta Negra
54ND-0203-317	ND-0203-317	511.494	7.300.802	14,1	1.218,2	Salar Punta Negra
55ND-0203-317	ND-0203-317	510.770	7.299.619	2,1	181,4	Salar Punta Negra
56ND-0203-317	ND-0203-317	513.294	7.289.652	21,5	1.857,6	Salar Punta Negra
57ND-0203-317	ND-0203-317	513.294	7.290.652	12,5	1.080,0	Salar Punta Negra
58ND-0203-317	ND-0203-317	512.794	7.283.353	1,8	155,5	Salar Punta Negra
59ND-0203-317	ND-0203-317	512.795	7.282.353	33,1	2.859,8	Salar Punta Negra
60ND-0203-317	ND-0203-317	511.282	7.303.631	65,3	5.641,9	Salar Punta Negra
61ND-0203-317	ND-0203-317	513.800	7.286.113	26,0	2.246,4	Salar Punta Negra
62ND-0203-510	ND-0203-510	511.590	7.278.189	18,0	1.555,2	Salar Punta Negra
63ND-0203-510	ND-0203-510	507.436	7.270.313	25,0	2.160,0	Salar Punta Negra
64ND-0203-510	ND-0203-510	506.506	7.266.198	25,5	2.203,2	Salar Punta Negra
65ND-0203-510	ND-0203-510	505.947	7.264.230	55,0	4.752,0	Salar Punta Negra
66ND-0203-510	ND-0203-510	504.419	7.260.454	46,0	3.974,4	Salar Punta Negra
67ND-0203-524	ND-0203-524	513.326	7.280.430	10,2	881,3	Salar Punta Negra
68ND-0203-524	ND-0203-524	513.058	7.279.469	18,9	1.633,0	Salar Punta Negra

Código modelo	Expediente captación	X	Y	Q Otorgado (L/s)	Q otorgado m^3/d	Cuenca
69ND-0203-524	ND-0203-524	512.418	7.277.265	7,0	604,8	Salar Punta Negra
70ND-0203-524	ND-0203-524	512.145	7.276.303	18,0	1.555,2	Salar Punta Negra
71ND-0203-524	ND-0203-524	511.883	7.275.310	21,0	1.814,4	Salar Punta Negra
72ND-0203-524	ND-0203-524	506.557	7.271.098	30,0	2.592,0	Salar Punta Negra
73ND-0203-524	ND-0203-524	506.128	7.269.147	12,0	1.036,8	Salar Punta Negra
74ND-0203-524	ND-0203-524	505.682	7.267.190	17,5	1.512,0	Salar Punta Negra
75ND-0203-524	ND-0203-524	507.157	7.269.299	8,0	691,2	Salar Punta Negra
76ND-0203-524	ND-0203-524	506.743	7.267.268	30,0	2.592,0	Salar Punta Negra
77ND-0203-524	ND-0203-524	505.299	7.265.611	28,0	2.419,2	Salar Punta Negra
78ND-0203-524	ND-0203-524	506.300	7.265.180	40,0	3.456,0	Salar Punta Negra
79ND-0203-524	ND-0203-524	506.939	7.268.276	12,5	1.080,0	Salar Punta Negra
80ND-0203-604	ND-0203-604	506.300	7.265.180	5,0	432,0	Salar Punta Negra
TOTAL				**1.566**	**135.288,5**	

Tabla 5-60. Captaciones con derechos otorgados incorporados al modelo Fuente: elaboración propia a partir de información facilitada por la DGA.

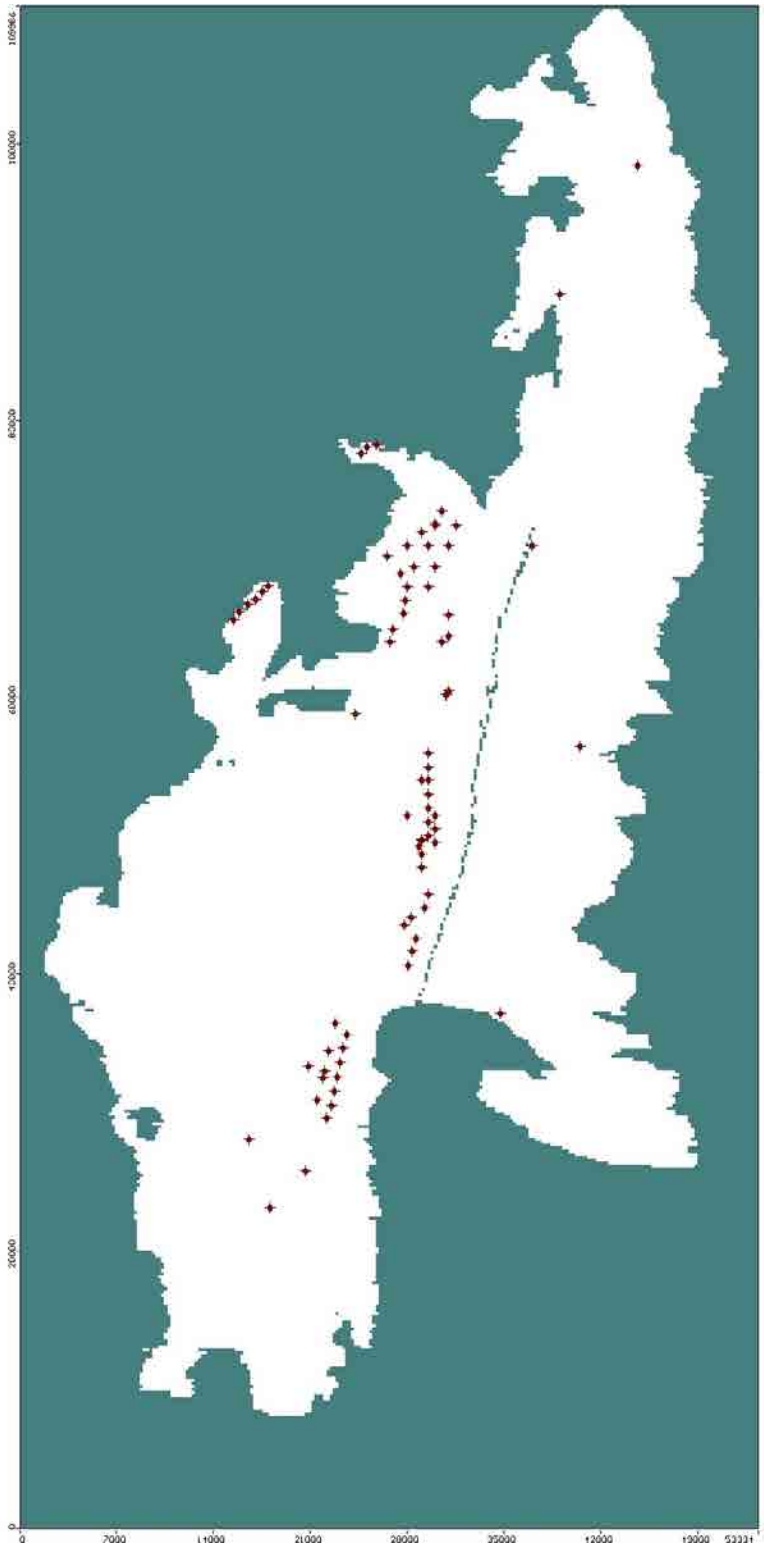


Figura 5-135. Ubicación de los pozos incorporados en el escenario 1. Fuente: elaboración propia.

La simulación se ha realizado para un periodo de 50 años, tomando como punto de partida la situación simulada actual, es decir, los niveles calculados en el modelo para la fecha 31 de diciembre de 2015, incorporándolos al modelo como condición inicial (*initial heads*). Los resultados obtenidos para este escenario han sido los siguientes:

FECHA	ENTRADAS		SALIDAS			VARIACIÓN ALAMCENAMIENTO
	Recarga	Pozos inyección	Evaporación	Drenes	Pozos extracción	
	L/s	L/s	L/s	L/s	L/s	L/s
2016	217,98	0,00	10,66	0,00	1430,64	-1223,32
2017	220,09	0,00	9,91	0,00	1327,51	-1117,33
2018	220,09	0,00	9,33	0,00	1273,34	-1062,59
2019	193,72	0,00	8,86	0,00	1193,56	-1008,70
2020	220,07	0,00	8,40	0,00	1153,84	-942,17
2021	220,02	0,00	8,03	0,00	1072,69	-860,70
2022	220,01	0,00	7,71	0,00	1033,80	-821,50
2023	193,67	0,00	7,45	0,00	1030,54	-844,32
2024	220,01	0,00	7,20	0,00	998,37	-785,56
2025	220,00	0,00	6,99	0,00	985,24	-772,22
2026	220,00	0,00	6,81	0,00	956,54	-743,35
2027	160,58	0,00	6,66	0,00	951,54	-797,62
2028	191,59	0,00	6,51	0,00	933,83	-748,75
2029	191,58	0,00	6,38	0,00	909,04	-723,83
2030	191,58	0,00	6,27	0,00	909,04	-723,73
2031	191,58	0,00	6,18	0,00	909,04	-723,64
2032	191,58	0,00	6,10	0,00	909,04	-723,56
2033	191,58	0,00	6,03	0,00	909,04	-723,49
2034	191,58	0,00	5,97	0,00	909,04	-723,43
2035	191,58	0,00	5,91	0,00	909,04	-723,37
2036	191,58	0,00	5,86	0,00	909,04	-723,32
2037	191,58	0,00	5,82	0,00	909,04	-723,28
2038	191,58	0,00	5,78	0,00	909,04	-723,24
2039	191,58	0,00	5,75	0,00	909,04	-723,20
2040	191,58	0,00	5,72	0,00	909,04	-723,17
2041	191,58	0,00	5,69	0,00	909,04	-723,14
2042	191,58	0,00	5,66	0,00	909,04	-723,12
2043	191,58	0,00	5,64	0,00	909,04	-723,10
2044	191,58	0,00	5,62	0,00	909,04	-723,08

FECHA	ENTRADAS		SALIDAS			VARIACIÓN ALAMCENAMIENTO
	Recarga	Pozos inyección	Evaporación	Drenes	Pozos extracción	
	L/s	L/s	L/s	L/s	L/s	L/s
2045	191,58	0,00	5,60	0,00	909,04	-723,06
2046	191,58	0,00	5,59	0,00	909,04	-723,04
2047	191,58	0,00	5,57	0,00	909,04	-723,02
2048	191,58	0,00	5,55	0,00	905,04	-719,01
2049	191,58	0,00	5,54	0,00	901,04	-715,00
2050	191,58	0,00	5,53	0,00	901,04	-714,99
2051	191,58	0,00	5,52	0,00	901,04	-714,98
2052	191,58	0,00	5,51	0,00	901,04	-714,97
2053	191,58	0,00	5,49	0,00	901,04	-714,96
2054	191,58	0,00	5,48	0,00	901,04	-714,95
2055	191,58	0,00	5,47	0,00	901,04	-714,93
2056	191,58	0,00	5,46	0,00	901,04	-714,92
2057	191,58	0,00	5,45	0,00	901,04	-714,91
2058	191,58	0,00	5,44	0,00	901,04	-714,90
2059	191,58	0,00	5,43	0,00	899,04	-712,90
2060	191,57	0,00	5,43	0,00	889,04	-702,89
2061	191,57	0,00	5,42	0,00	889,04	-702,89
2062	191,57	0,00	5,42	0,00	889,04	-702,88
2063	191,57	0,00	5,41	0,00	889,04	-702,88
2064	191,57	0,00	5,41	0,00	889,04	-702,88
2065	184,90	0,00	5,41	0,00	889,04	-709,54
Promedio (2016/2065)	195,99	0,00	6,28	0,00	955,24	-765,53

Tabla 5-61. Resultados del balance hídirco con caudal de explotación igual a la totalidad de los derechos otorgados, simulado para un periodo de 50 años. Fuente: elaboración propia.

La entrada en el sistema se produce desde la recarga directa por infiltración de la precipitación. No se ha incluido la recarga artificial que realiza Minera Escondida ya que el escenario se ha simulado incorporando únicamente las extracciones con el objetivo de ver los posibles efectos sobre la piezometría.

Los resultados del balance muestran como el caudal otorgado no es sustentable en el tiempo e incluso, dada la distribución de los pozos, algunos de ellos se secan (ver tabla siguiente) y no son capaces de extraer el caudal total otorgado. Por este motivo no ha sido posible simular un caudal constante de 1.566 L/s durante el periodo seleccionado (50 años).

Tampoco las vertientes serian sustentables en el tiempo. El descenso de los niveles reduciría los aportes haciendo que éstas desaparecieran. Como resultado del bombeo, el almacenamiento se reduce del orden de 766 L/s de media, equivalente a 24,1 hm^3/a, lo que, teniendo en cuenta un volumen almacenado de 72.062 hm^3, esta variación supondría, en 50 años, un 1,67 % del volumen total almacenado.

Código Modelo	Expediente captación	X	Y	Q Otorgado (L/s)	Q otorgado m^3/d	Cuenca
11UA-0203-1	UA-0203-1	518486	7271824	5,0	432,0	Salar Punta Negra
16UA-0203-1	UA-0203-1	513794	7307288	20,0	1728,0	Salar Punta Negra
22UA-0203-1	UA-0203-1	508044	7293552	20,0	1728,0	Salar Punta Negra
23ND-0203-245	ND-0203-245	513794	7307152	5,6	483,8	Salar Punta Negra
25ND-0203-245	ND-0203-245	513294	7305652	14,1	1218,2	Salar Punta Negra
26ND-0203-245	ND-0203-245	514794	7305652	7,0	604,8	Salar Punta Negra
31ND-0203-280	ND-0203-280	513794	7307152	32,4	2799,3	Salar Punta Negra
33ND-0203-280	ND-0203-280	514293	7308153	28,0	2419,2	Salar Punta Negra
34ND-0203-280	ND-0203-280	513294	7305652	13,9	1200,9	Salar Punta Negra
35ND-0203-293	ND-0203-293	511794	7305652	33,0	2851,2	Salar Punta Negra
39ND-0203-317	ND-0203-317	515294	7307152	19,0	1641,6	Salar Punta Negra
3UA-0203-806146	UA-0203-806146	505794	7267653	17,5	1512,0	Salar Punta Negra
40ND-0203-317	ND-0203-317	514794	7305652	10,0	864,0	Salar Punta Negra
51ND-0203-317	ND-0203-317	512792	7306653	19,5	1684,8	Salar Punta Negra
5UA-0203-1	UA-0203-1	513818	7307280	16,0	1382,4	Salar Punta Negra
60ND-0203-317	ND-0203-317	511282	7303631	65,3	5641,9	Salar Punta Negra
63ND-0203-510	ND-0203-510	507436	7270313	25,0	2160,0	Salar Punta Negra
64ND-0203-510	ND-0203-510	506506	7266198	25,5	2203,2	Salar Punta Negra
65ND-0203-510	ND-0203-510	505947	7264230	55,0	4752,0	Salar Punta Negra
66ND-0203-510	ND-0203-510	504419	7260454	46,0	3974,4	Salar Punta Negra
72ND-0203-524	ND-0203-524	506557	7271098	30,0	2592,0	Salar Punta Negra
74ND-0203-524	ND-0203-524	505682	7267190	17,5	1512,0	Salar Punta Negra
76ND-0203-524	ND-0203-524	506743	7267268	30,0	2592,0	Salar Punta Negra
77ND-0203-524	ND-0203-524	505299	7265611	28,0	2419,2	Salar Punta Negra
78ND-0203-524	ND-0203-524	506300	7265180	40,0	3456,0	Salar Punta Negra
79ND-0203-524	ND-0203-524	506939	7268276	12,5	1080,0	Salar Punta Negra
80ND-0203-604	ND-0203-604	506300	7265180	5,0	432,0	Salar Punta Negra
8UA-0203-1	UA-0203-1	501871	7257788	16,0	1382,4	Salar Punta Negra

Tabla 5-62. Captaciones afectadas durante la simulación del escenario 1. Fuente: elaboración propia.

Por otro lado, la evaporación, dada la disminución de las reservas hídricas y el consecuente descenso de los niveles, disminuye considerablemente. Si bien aunque la evaporación tiende a descender en el tiempo por la depresión del nivel freático en el salar, el descenso real será más progresivo que el calculado por el modelo. La falta de información en el área de estudio no permite calcular con tanta exactitud la evolución de los niveles en el salar, produciendo un descenso de los niveles que reduce en exceso la tasa de evaporación.

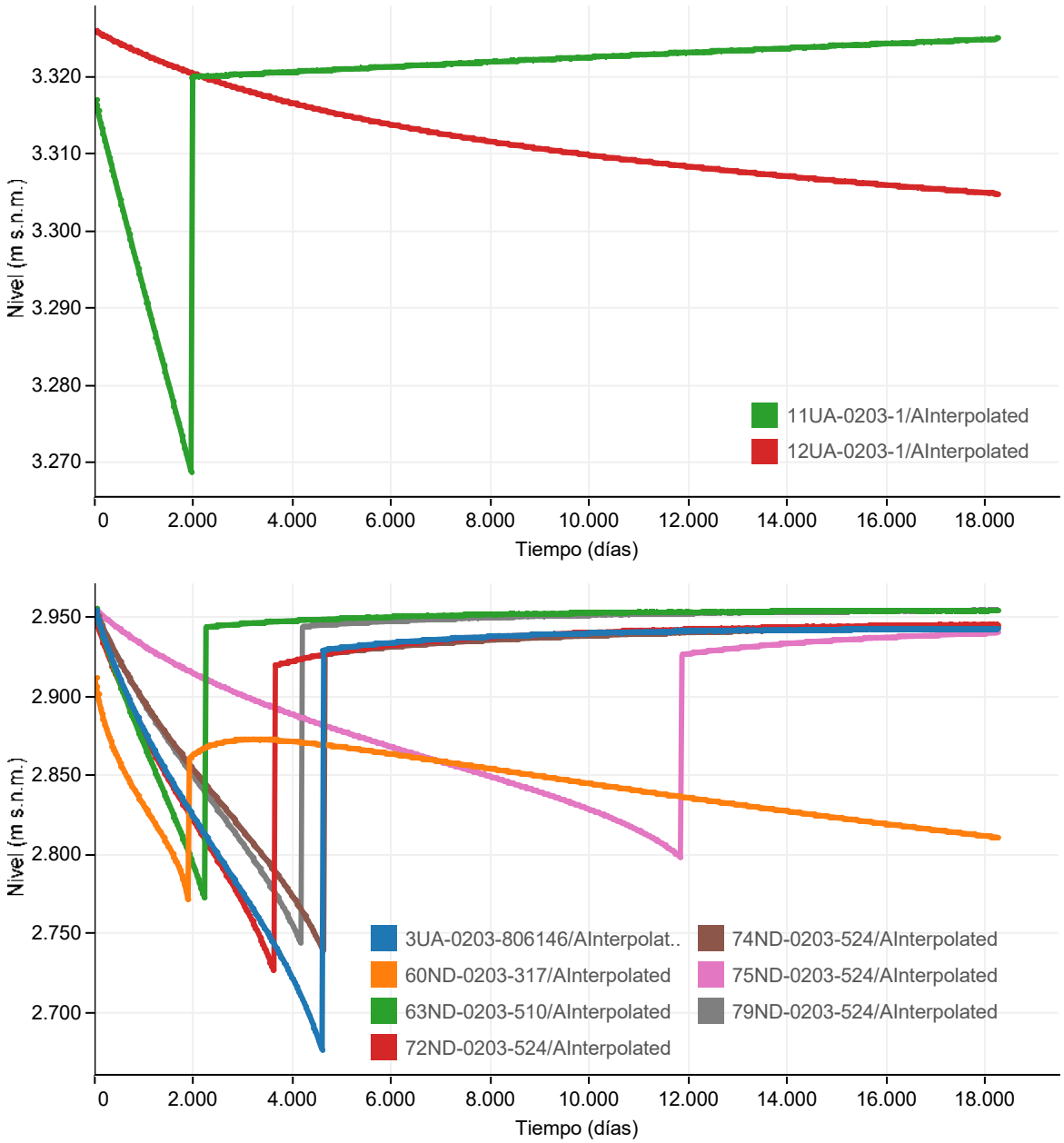


Figura 5-136. Evolución de niveles piezométricos en el escenario 1. Fuente: elaboración propia.

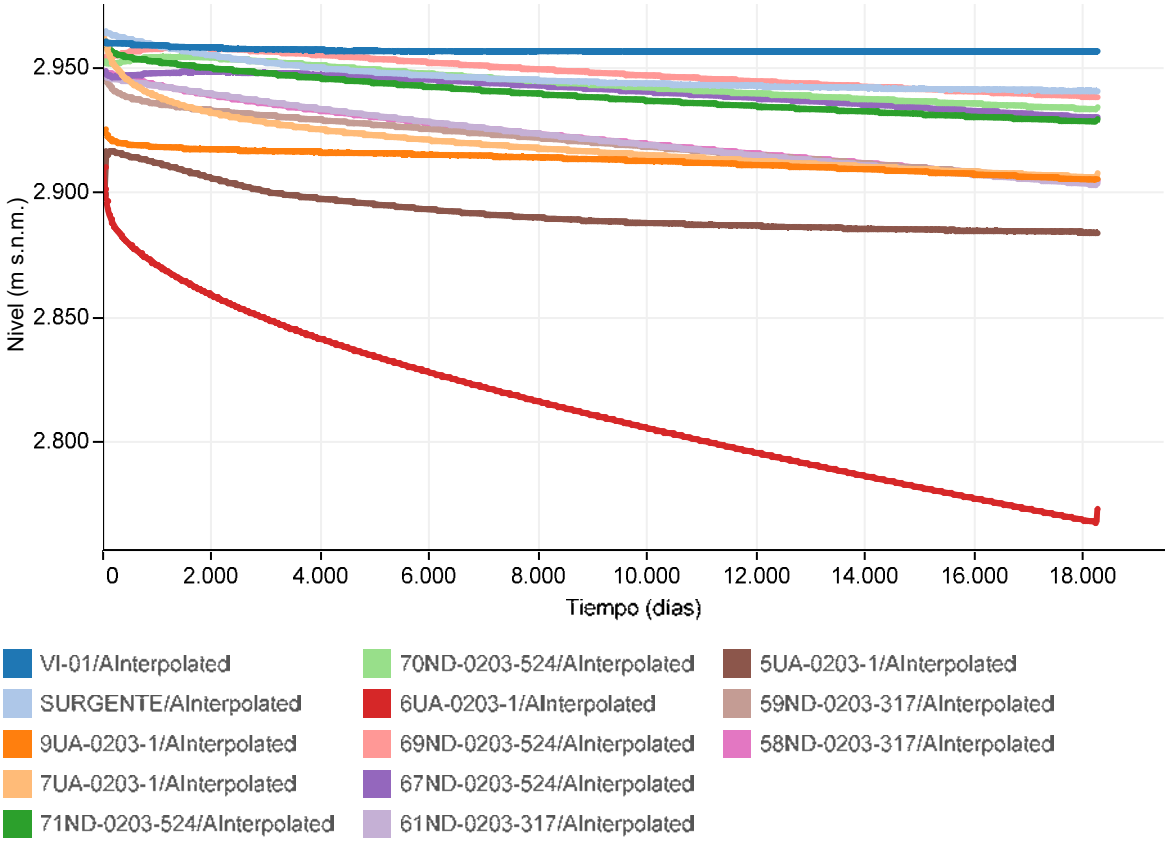


Figura 5-137. Evolución de niveles piezométricos en el escenario 1. Fuente: elaboración propia.

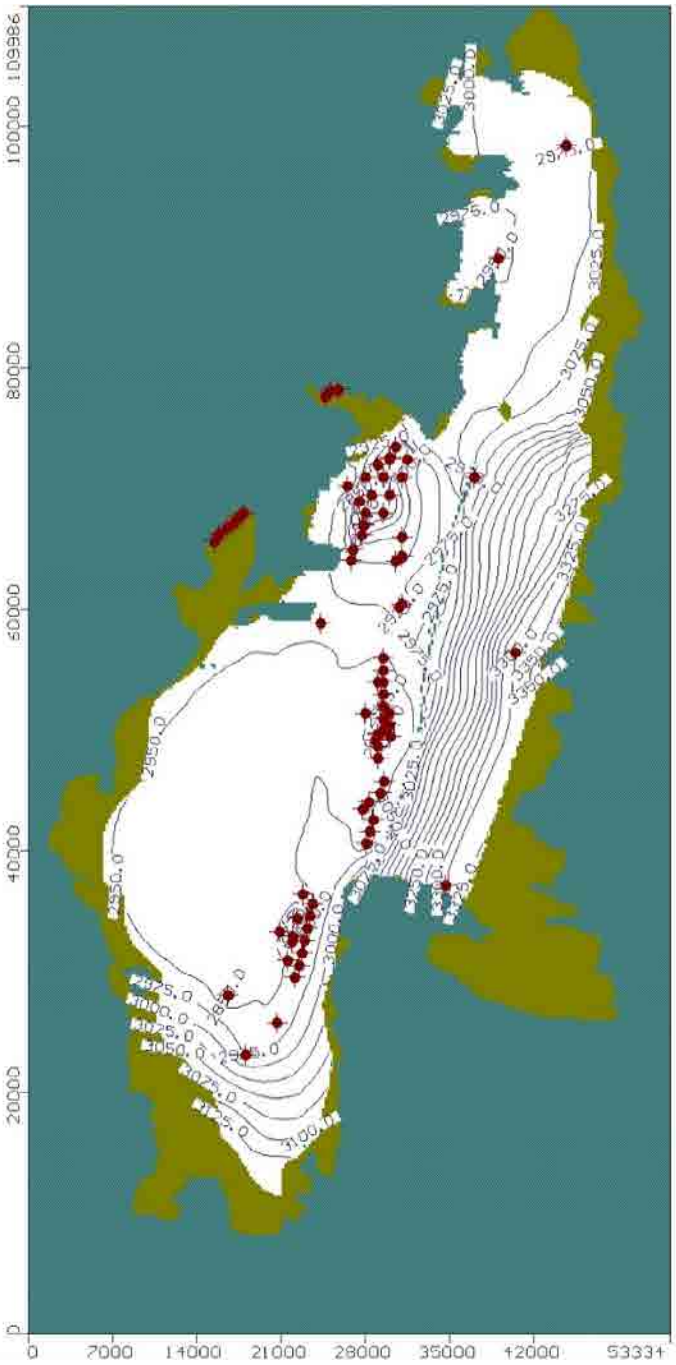


Figura 5-138. Mapa de isopiezas generado a los 50 años de simulación para el escenario 1. Fuente: elaboración propia.

Por tanto, **se considera inviable** desde el punto de vista ambiental la **explotación del 100% de los derechos otorgados** en el acuífero, debido a los siguientes motivos:

- Se produce un descenso muy acusado en los campos de pozos (llegando incluso a los 20 metros de descenso al año, lo que supone un 10% del espesor saturado al año). Sin embargo, en otras partes del acuífero el descenso es menor (menos de 1 metro al año).
- Las vertientes dejan de emanar generando el secado de las lagunas.
- Se produce afección entre captaciones, dejando zonas secas (**Tabla 5-62**).
- Se produce un déficit anual de 766 L/s, equivalente en 50 años a un 1,67 % respecto al volumen almacenado.

ESCENARIO 2. TOTALIDAD DE LOS DERECHOS OTORGADOS Y DERECHOS EN TRÁMITE

El segundo escenario simulado consiste en mantener todas las condiciones simuladas para la situación actual (recarga, evaporación, etc.), pero cambiando los pozos de explotación actuales por aquellos con derechos constituidos y en trámite, incluyendo los caudales de bombeo otorgados y en trámite.

Los derechos otorgados incluidos en el modelo se incluyen en la **Tabla 5-60**, aquellos en trámite en la tabla siguiente:

DERECHOS EN TRÁMITE						
Código modelo	**Expediente captación**	**X**	**Y**	**Q Solicitado (L/s)**	**Q Otorgado m^3/d**	**Cuenca**
1ND-0203-1669	ND-0203-1669	525.593	7.329.465	16,8	580,6	Salar Imilac
2ND-0203-1669	ND-0203-1669	527.854	7.339.015	21,2	732,7	Salar Imilac
3ND-0203-1744	ND-0203-1744	523.771	7.314.535	23,2	800,1	Salar Imilac
4ND-0203-1744	ND-0203-1744	523.201	7.319.332	19,2	661,8	Salar Imilac
5ND-0203-5119	ND-0203-5119	491.044	7.215.401	32,7	1.130,1	Salar Punta Negra
TOTAL				**1.678,8**	**139.193,9**	

Tabla 5-63. Captaciones con derechos en trámite incorporados al modelo Fuente: elaboración propia a partir de información facilitada por la DGA.

Al igual que el anterior, la simulación se ha realizado para un periodo de 50 años, tomando como punto de partida la situación simulada actual, es decir, los niveles calculados en el modelo para la fecha 31 de diciembre de 2015, incorporándolos al modelo como condición inicial (*initial heads*).Los resultados para este escenario son los siguientes:

FECHA	ENTRADAS		SALIDAS			VARIACIÓN ALAMCENAMIENTO
	Recarga	Pozos inyección	Evaporación	Drenes	Pozos extracción	
	L/s	L/s	L/s	L/s	L/s	L/s
2016	217,98	0,00	10,66	0,00	1454,28	-1246,96
2017	220,09	0,00	9,90	0,00	1351,15	-1140,96
2018	220,09	0,00	9,31	0,00	1296,98	-1086,21
2019	193,72	0,00	8,83	0,00	1217,20	-1032,31
2020	220,07	0,00	8,36	0,00	1177,48	-965,77
2021	220,02	0,00	7,99	0,00	1096,33	-884,30
2022	220,01	0,00	7,67	0,00	1057,44	-845,09
2023	193,67	0,00	7,40	0,00	1052,48	-866,21

FECHA	ENTRADAS		SALIDAS			VARIACIÓN ALAMCENAMIENTO
	Recarga	Pozos inyección	Evaporación	Drenes	Pozos extracción	
	L/s	L/s	L/s	L/s	L/s	L/s
2024	220,00	0,00	7,14	0,00	1014,35	-801,49
2025	220,00	0,00	6,93	0,00	1001,22	-788,15
2026	219,99	0,00	6,74	0,00	972,52	-759,27
2027	160,57	0,00	6,59	0,00	967,52	-813,54
2028	191,58	0,00	6,43	0,00	949,81	-764,66
2029	191,58	0,00	6,29	0,00	925,02	-739,74
2030	191,58	0,00	6,18	0,00	925,02	-739,63
2031	191,58	0,00	6,09	0,00	925,02	-739,53
2032	191,58	0,00	6,01	0,00	925,02	-739,45
2033	191,58	0,00	5,93	0,00	925,02	-739,38
2034	191,58	0,00	5,87	0,00	925,02	-739,31
2035	191,58	0,00	5,80	0,00	925,02	-739,25
2036	191,58	0,00	5,75	0,00	925,02	-739,19
2037	191,58	0,00	5,70	0,00	925,02	-739,14
2038	191,58	0,00	5,66	0,00	925,02	-739,10
2039	191,58	0,00	5,62	0,00	925,02	-739,06
2040	191,58	0,00	5,58	0,00	925,02	-739,03
2041	191,58	0,00	5,55	0,00	925,02	-738,99
2042	191,58	0,00	5,52	0,00	925,02	-738,97
2043	191,57	0,00	5,50	0,00	925,02	-738,94
2044	191,57	0,00	5,47	0,00	925,02	-738,92
2045	191,57	0,00	5,45	0,00	925,02	-738,90
2046	191,57	0,00	5,43	0,00	925,02	-738,88
2047	191,56	0,00	5,41	0,00	925,02	-738,86
2048	191,56	0,00	5,39	0,00	921,02	-734,85
2049	191,56	0,00	5,37	0,00	917,02	-730,83
2050	191,56	0,00	5,36	0,00	917,02	-730,82
2051	191,56	0,00	5,34	0,00	917,02	-730,81
2052	191,56	0,00	5,33	0,00	917,02	-730,79
2053	191,56	0,00	5,32	0,00	917,02	-730,78
2054	191,56	0,00	5,30	0,00	917,02	-730,77
2055	191,56	0,00	5,29	0,00	917,02	-730,75
2056	191,56	0,00	5,28	0,00	917,02	-730,74
2057	191,56	0,00	5,26	0,00	917,02	-730,73

FECHA	ENTRADAS		SALIDAS			VARIACIÓN ALAMCENAMIENTO
	Recarga	Pozos inyección	Evaporación	Drenes	Pozos extracción	
	L/s	L/s	L/s	L/s	L/s	L/s
2058	191,56	0,00	5,25	0,00	917,02	-730,72
2059	191,56	0,00	5,24	0,00	915,02	-728,71
2060	191,55	0,00	5,23	0,00	905,02	-718,70
2061	191,55	0,00	5,23	0,00	905,02	-718,69
2062	191,55	0,00	5,22	0,00	905,02	-718,69
2063	191,54	0,00	5,21	0,00	905,02	-718,69
2064	191,54	0,00	5,21	0,00	905,02	-718,68
2065	184,88	0,00	5,20	0,00	905,02	-725,34
Promedio (2016/2065)	195,98	0,00	6,16	0,00	972,41	-782,59

Tabla 5-64. Resultados del balance hídirco con caudal de explotación igual a la totalidad de los derechos otorgados mas los derechos e trámite, simulado para un periodo de 50 años. Fuente: elaboración propia.

El presente escenario no varía significativamente respecto del anterior. La entrada en el sistema se produce desde la recarga directa por infiltración de la precipitación no se ha incluido la recarga artificial que realiza Minera Escondida ya que el escenario se ha simulado incorporando únicamente las extracciones con el objetivo de ver los posibles efectos sobre la piezometría.

Los resultados del balance son similares al escenario anterior con un caudal no sustentable en el tiempo. Tampoco es posible la extracción del total de los derechos otorgados y en trámite debido al secado de algunos pozos (ver tabla siguiente). Con las vertientes sucedería lo mismo, no siendo sustentables en el tiempo. Como resultado del bombeo, el almacenamiento se reduce del orden de 783 L/s de media, equivalente a 24,6 hm^3/a, lo que supone un 1,71% del volumen almacenado.

Código Modelo	Expediente captación	X	Y	Q Otorgado (L/s)	Q otorgado m^3/d	Cuenca
11UA-0203-1	UA-0203-1	518486	7271824	5,0	432,0	Salar Punta Negra
16UA-0203-1	UA-0203-1	513794	7307288	20,0	1728,0	Salar Punta Negra
22UA-0203-1	UA-0203-1	508044	7293552	20,0	1728,0	Salar Punta Negra
23ND-0203-245	ND-0203-245	513794	7307152	5,6	483,8	Salar Punta Negra
25ND-0203-245	ND-0203-245	513294	7305652	14,1	1218,2	Salar Punta Negra

Código Modelo	Expediente captación	X	Y	Q Otorgado (L/s)	Q otorgado m^3/d	Cuenca
26ND-0203-245	ND-0203-245	514794	7305652	7,0	604,8	Salar Punta Negra
31ND-0203-280	ND-0203-280	513794	7307152	32,4	2799,3	Salar Punta Negra
33ND-0203-280	ND-0203-280	514293	7308153	28,0	2419,2	Salar Punta Negra
34ND-0203-280	ND-0203-280	513294	7305652	13,9	1200,9	Salar Punta Negra
35ND-0203-293	ND-0203-293	511794	7305652	33,0	2851,2	Salar Punta Negra
39ND-0203-317	ND-0203-317	515294	7307152	19,0	1641,6	Salar Punta Negra
3UA-0203-806146	UA-0203-806146	505794	7267653	17,5	1512,0	Salar Punta Negra
40ND-0203-317	ND-0203-317	514794	7305652	10,0	864,0	Salar Punta Negra
51ND-0203-317	ND-0203-317	512792	7306653	19,5	1684,8	Salar Punta Negra
5UA-0203-1	UA-0203-1	513818	7307280	16,0	1382,4	Salar Punta Negra
60ND-0203-317	ND-0203-317	511282	7303631	65,3	5641,9	Salar Punta Negra
63ND-0203-510	ND-0203-510	507436	7270313	25,0	2160,0	Salar Punta Negra
64ND-0203-510	ND-0203-510	506506	7266198	25,5	2203,2	Salar Punta Negra
65ND-0203-510	ND-0203-510	505947	7264230	55,0	4752,0	Salar Punta Negra
66ND-0203-510	ND-0203-510	504419	7260454	46,0	3974,4	Salar Punta Negra
72ND-0203-524	ND-0203-524	506557	7271098	30,0	2592,0	Salar Punta Negra
73ND-0203-524	ND-0203-524	506128	7269147	12,0	1.036,8	Salar Punta Negra
74ND-0203-524	ND-0203-524	505682	7267190	17,5	1512,0	Salar Punta Negra
75ND-0203-524	ND-0203-524	507157	7269299	8,0	691,2	Salar Punta Negra
76ND-0203-524	ND-0203-524	506743	7267268	30,0	2592,0	Salar Punta Negra
77ND-0203-524	ND-0203-524	505299	7265611	28,0	2419,2	Salar Punta Negra
78ND-0203-524	ND-0203-524	506300	7265180	40,0	3456,0	Salar Punta Negra
79ND-0203-524	ND-0203-524	506939	7268276	12,5	1080,0	Salar Punta Negra
80ND-0203-604	ND-0203-604	506300	7265180	5,0	432,0	Salar Punta Negra
8UA-0203-1	UA-0203-1	501871	7257788	16,0	1382,4	Salar Punta Negra

Tabla 5-65. Captaciones afectadas durante la simulación del escenario 2 (Derechos ortorgados + en trámite). Fuente: elaboración propia.

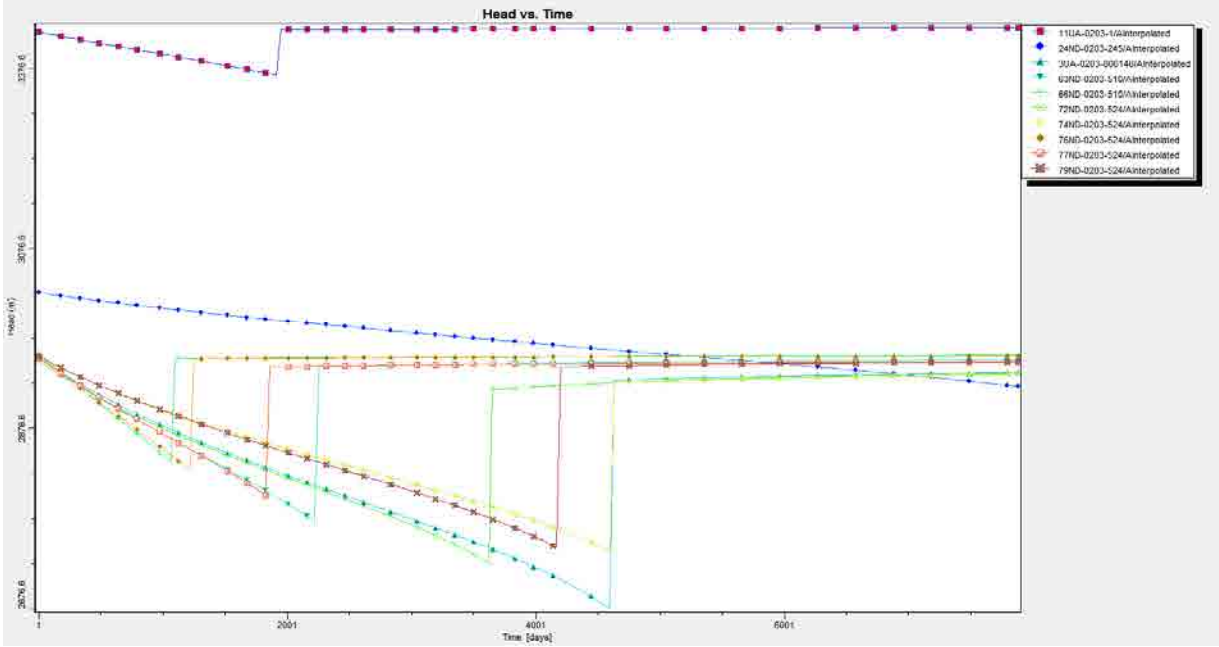


Figura 5-139. Evolución de los niveles piezométricos más representativos en el escenario 2. Fuente: elaboración propia.

En la figura siguiente se observan los descensos generados por la explotación intensiva simulada (campo de bombeos norte):

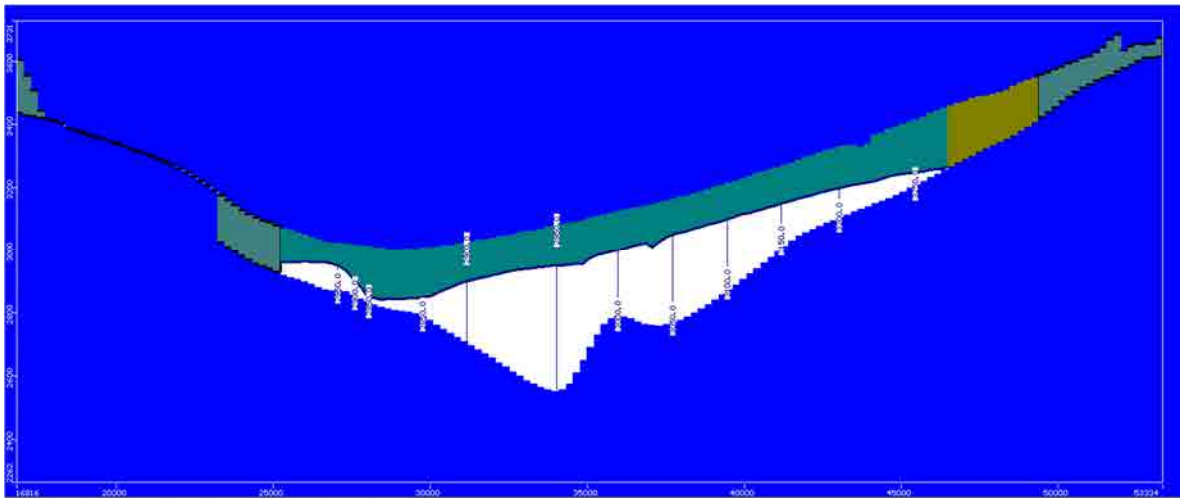


Figura 5-140. Perfil de dirección oeste-este, al norte del salar de Punta Negra para el final del periodo simulado en el escenario 2. Fuente: elaboración propia.

ESCENARIO 3. SUSTENTABILIDAD HÍDRICA.

Este escenario pretende definir el volumen de explotación sustentable en el acuífero sin que afecte al acuífero teniendo en cuenta los siguientes criterios:

- No afección a la demanda.
- No afección a las captaciones.
- No afección al sistema superficial.
- No afección al estado cuantitativo del acuífero.

Se considera afectada la demanda cuando no se atiende en un 5% o más la demanda impuesta, es decir, no se ve afectado en más de un 5% el caudal incorporado en el modelo.

Por otro lado, se consideran que hay afección a captaciones cuando se perjudican en un 5% o más al número de captaciones existentes.

La afección al sistema superficial en este caso ha sido valorada como la afección a la surgencia de las vertientes hacia las lagunas, es decir, se ha considerado afectado en este sentido cuando las vertientes dejan de emanar.

Por último, el criterio del estado cuantitativo se verificaría con el equilibrio del acuífero en términos de piezometría y por tanto, balance, considerando a éste afectado cuando se observen descensos generalizados en el acuífero.

El proceso seguido para este escenario ha sido incorporar las captaciones con derechos otorgados en el acuífero, reproduciendo las condiciones de recarga y evaporación simuladas para la situación actual, extrapolándolas para un periodo de 50 años, y, de forma iterativa, se ha ido cambiando el volumen de explotación total hasta que se cumplieran los 4 criterios de sustentabilidad mencionados anteriormente.

En este sentido, los volúmenes de explotación simulados han sido el 50%, 12,5%, 10% y 4% del total otorgado, a los efectos de observar cual se ajusta mejor al caudal de explotación sustentable.

La simulación se ha realizado en todos los casos para un periodo de 50 años, tomando como punto de partida la situación simulada actual, es decir, los niveles calculados en el

modelo para la fecha 31 de diciembre de 2015, incorporándolos al modelo como condición inicial (*initial heads*).

Se presentan a continuación los resultados obtenidos en este escenario:

Escenario 3.1: Sustentabilidad hídrica con volumen de explotación del 50% de derechos otorgados

En este caso se ha realizado la simulación suponiendo un 50% del caudal otorgado (782,82 L/s), no cumpliendo los criterios de sustentabilidad hídrica por los siguientes motivos:

- No atender la demanda impuesta en un 27,16% (caudal explotado medio en el periodo simulado igual a 570,31 L/s).
- Afectar a las surgencias naturales de agua (vertientes).
- Existir una tendencia descendente general en el acuífero (variación de almacenamiento medio de -385,06 L/s, equivalente a un 0,95% del volumen almacenado).
- Afectar a un 30% de las captaciones (24 captaciones se secan en algún momento de la simulación, ver tabla siguiente).

Código Modelo	Expediente captación	X	Y	Q Otorgado (L/s)	Q otorgado m^3/d	Cuenca
11UA-0203-1	UA-0203-1	518486	7271824	5,0	432,0	Salar Punta Negra
16UA-0203-1	UA-0203-1	513794	7307288	20,0	1728,0	Salar Punta Negra
22UA-0203-1	UA-0203-1	508044	7293552	20,0	1728,0	Salar Punta Negra
23ND-0203-245	ND-0203-245	513794	7307152	5,6	483,8	Salar Punta Negra
25ND-0203-245	ND-0203-245	513294	7305652	14,1	1218,2	Salar Punta Negra
26ND-0203-245	ND-0203-245	514794	7305652	7,0	604,8	Salar Punta Negra
31ND-0203-280	ND-0203-280	513794	7307152	32,4	2799,3	Salar Punta Negra
33ND-0203-280	ND-0203-280	514293	7308153	28,0	2419,2	Salar Punta Negra
34ND-0203-280	ND-0203-280	513294	7305652	13,9	1200,9	Salar Punta Negra

Código Modelo	Expediente captación	X	Y	Q Otorgado (L/s)	Q otorgado m^3/d	Cuenca
35ND-0203-293	ND-0203-293	511794	7305652	33,0	2851,2	Salar Punta Negra
39ND-0203-317	ND-0203-317	515294	7307152	19,0	1641,6	Salar Punta Negra
40ND-0203-317	ND-0203-317	514794	7305652	10,0	864,0	Salar Punta Negra
51ND-0203-317	ND-0203-317	512792	7306653	19,5	1684,8	Salar Punta Negra
5UA-0203-1	UA-0203-1	513818	7307280	16,0	1382,4	Salar Punta Negra
60ND-0203-317	ND-0203-317	511282	7303631	65,3	5641,9	Salar Punta Negra
63ND-0203-510	ND-0203-510	507436	7270313	25,0	2160,0	Salar Punta Negra
64ND-0203-510	ND-0203-510	506506	7266198	25,5	2203,2	Salar Punta Negra
65ND-0203-510	ND-0203-510	505947	7264230	55,0	4752,0	Salar Punta Negra
66ND-0203-510	ND-0203-510	504419	7260454	46,0	3974,4	Salar Punta Negra
76ND-0203-524	ND-0203-524	506743	7267268	30,0	2592,0	Salar Punta Negra
77ND-0203-524	ND-0203-524	505299	7265611	28,0	2419,2	Salar Punta Negra
78ND-0203-524	ND-0203-524	506300	7265180	40,0	3456,0	Salar Punta Negra
79ND-0203-524	ND-0203-524	506939	7268276	12,5	1080,0	Salar Punta Negra
80ND-0203-604	ND-0203-604	506300	7265180	5,0	432,0	Salar Punta Negra

Tabla 5-66. Captaciones afectadas durante la simulación del escenario 3 al 50% de los derechos otorgados. Fuente: elaboración propia.

El balance hídrico obtenido es el siguiente:

FECHA	ENTRADAS		SALIDAS			VARIACIÓN ALMACENAMIENTO
	Recarga	Inyección	Evaporación	Vertientes	Extracciones	
	L/s	L/s	L/s	L/s	L/s	L/s
2016	213,1662	0,0000	10,7030	0,0000	756,4410	-553,98
2017	215,2341	0,0000	9,9645	0,0000	725,7019	-520,43
2018	215,2293	0,0000	9,3467	0,0000	704,8106	-498,93
2019	189,5015	0,0000	8,8786	0,0000	668,4193	-487,80
2020	215,2160	0,0000	8,4258	0,0000	646,5932	-439,80
2021	215,2160	0,0000	8,0672	0,0000	646,1693	-439,02

FECHA	ENTRADAS		SALIDAS			VARIACIÓN ALMACENAMIENTO
	Recarga	Inyección	Evaporación	Vertientes	Extracciones	
	L/s	L/s	L/s	L/s	L/s	L/s
2022	215,2153	0,0000	7,7601	0,0000	639,1693	-431,71
2023	189,4917	0,0000	7,5089	0,0000	617,7110	-435,73
2024	215,1982	0,0000	7,2643	0,0000	587,5932	-379,66
2025	215,1937	0,0000	7,0675	0,0000	585,4193	-377,29
2026	215,1935	0,0000	6,8944	0,0000	585,4193	-377,12
2027	157,0740	0,0000	6,7556	0,0000	583,4193	-433,10
2028	187,3880	0,0000	6,6105	0,0000	580,5860	-399,81
2029	187,3845	0,0000	6,4904	0,0000	568,9193	-388,03
2030	187,3845	0,0000	6,3871	0,0000	568,9193	-387,92
2031	187,3845	0,0000	6,2976	0,0000	568,9193	-387,83
2032	187,3808	0,0000	6,2207	0,0000	568,9193	-387,76
2033	187,3769	0,0000	6,1547	0,0000	558,5026	-377,28
2034	187,3766	0,0000	6,0954	0,0000	556,4193	-375,14
2035	187,3766	0,0000	6,0419	0,0000	556,4193	-375,08
2036	187,3752	0,0000	5,9936	0,0000	556,4193	-375,04
2037	187,3726	0,0000	5,9518	0,0000	556,4193	-375,00
2038	187,3726	0,0000	5,9161	0,0000	556,4193	-374,96
2039	187,3726	0,0000	5,8850	0,0000	556,4193	-374,93
2040	187,3690	0,0000	5,8583	0,0000	556,4193	-374,91
2041	187,3687	0,0000	5,8345	0,0000	556,4193	-374,89
2042	187,3687	0,0000	5,8126	0,0000	556,4193	-374,86
2043	187,3651	0,0000	5,7928	0,0000	556,4193	-374,85
2044	187,3647	0,0000	5,7752	0,0000	556,4193	-374,83
2045	187,3647	0,0000	5,7600	0,0000	556,4193	-374,81
2046	187,3610	0,0000	5,7469	0,0000	556,4193	-374,81
2047	187,3608	0,0000	5,7355	0,0000	556,4193	-374,79
2048	187,3608	0,0000	5,7249	0,0000	556,4193	-374,78
2049	187,3608	0,0000	5,7162	0,0000	556,4193	-374,77
2050	187,3535	0,0000	5,7089	0,0000	556,4193	-374,77
2051	187,3529	0,0000	5,7034	0,0000	556,4193	-374,77
2052	187,3529	0,0000	5,6990	0,0000	556,4193	-374,77
2053	187,3515	0,0000	5,6950	0,0000	556,4193	-374,76
2054	187,3417	0,0000	5,6914	0,0000	545,9193	-364,27
2055	187,3396	0,0000	5,6877	0,0000	540,3360	-358,68
2056	187,3336	0,0000	5,6841	0,0000	531,9193	-350,27
2057	187,3331	0,0000	5,6810	0,0000	527,6693	-346,02
2058	187,3331	0,0000	5,6787	0,0000	527,6693	-346,01
2059	187,3292	0,0000	5,6769	0,0000	527,6693	-346,02

FECHA	ENTRADAS		SALIDAS			VARIACIÓN ALMACENAMIENTO
	Recarga	Inyección	Evaporación	Vertientes	Extracciones	
	L/s	L/s	L/s	L/s	L/s	L/s
2060	187,3292	0,0000	5,6756	0,0000	527,6693	-346,02
2061	187,3278	0,0000	5,6751	0,0000	516,7858	-335,13
2062	187,3252	0,0000	5,6747	0,0000	495,0189	-313,37
2063	187,3252	0,0000	5,6745	0,0000	495,0189	-313,37
2064	187,3216	0,0000	5,6744	0,0000	495,0189	-313,37
2065	180,8097	0,0000	5,6745	0,0000	495,0189	-319,88
Promedio (2016/ 2065)	191,68	0,00	6,43	0,00	570,31	-385,06

Tabla 5-67. Resultados del balance hídirco con caudal de explotación igual al 50% de los derechos otorgados, simulado para un periodo de 50 años. Fuente: elaboración propia.

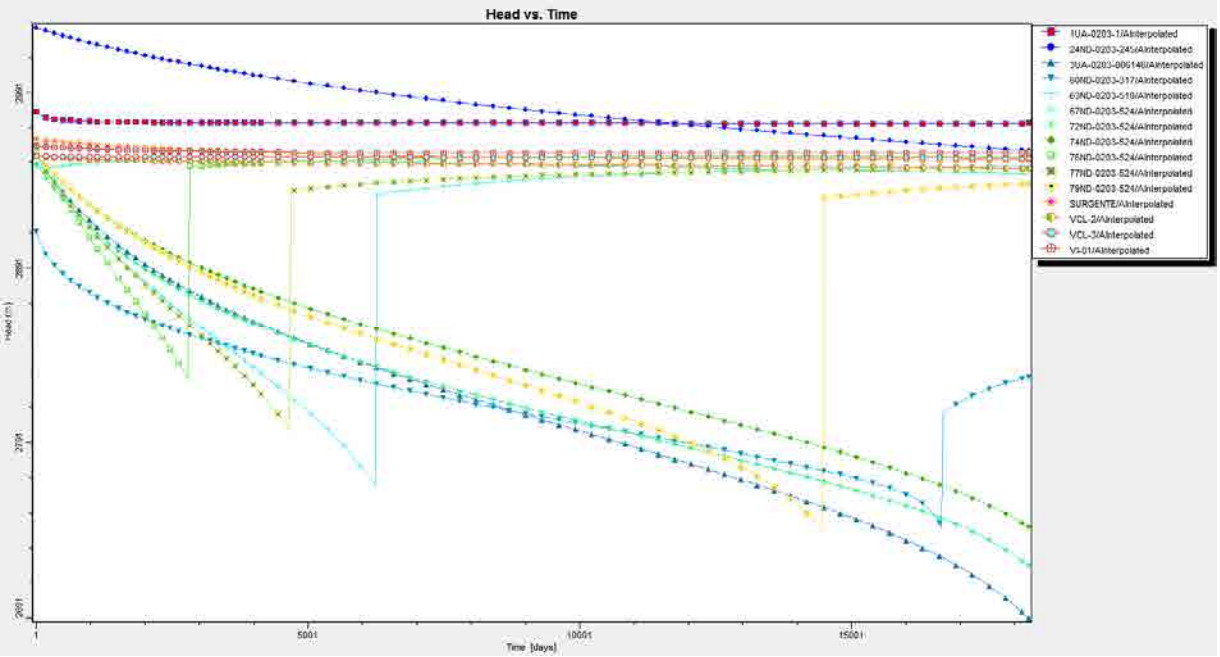


Figura 5-141. Evolución de los niveles piezométricos más representativos en el acuífero para el 50% de derechos otorgados según el escenario 3. Fuente: elaboración propia.

Escenario 3.2: Sustentabilidad hídrica con volumen de explotación del 12,5% de derechos otorgados

En este caso se ha realizado la simulación suponiendo un 12,5% del caudal otorgado (195,73 L/s), no cumpliendo los criterios de sustentabilidad hídrica por los siguientes motivos:

- No atender la demanda impuesta en un 9,11% (caudal explotado medio en el periodo simulado igual a 177,89 L/s).
- Afectar a las surgencias naturales de agua (vertientes).
- Afectar a un 7,50% de las captaciones. 6 captaciones se secan en algún momento de la simulación (ver tabla siguiente).

Código Modelo	Expediente captación	X	Y	Q Otorgado (L/s)	Q otorgado m^3/d	Cuenca
33ND-0203-280	ND-0203-280	514293	7308153	28,0	2419,2	Salar Punta Negra
35ND-0203-293	ND-0203-293	511794	7305652	33,0	2851,2	Salar Punta Negra
39ND-0203-317	ND-0203-317	515294	7307152	19,0	1641,6	Salar Punta Negra
65ND-0203-510	ND-0203-510	505947	7264230	55,0	4752,0	Salar Punta Negra
78ND-0203-524	ND-0203-524	506300	7265180	40,0	3456,0	Salar Punta Negra
80ND-0203-604	ND-0203-604	506300	7265180	5,0	432,0	Salar Punta Negra

Tabla 5-68. Captaciones afectadas durante la simulación del escenario 3 al 12,5% de los derechos otorgados. Fuente: elaboración propia.

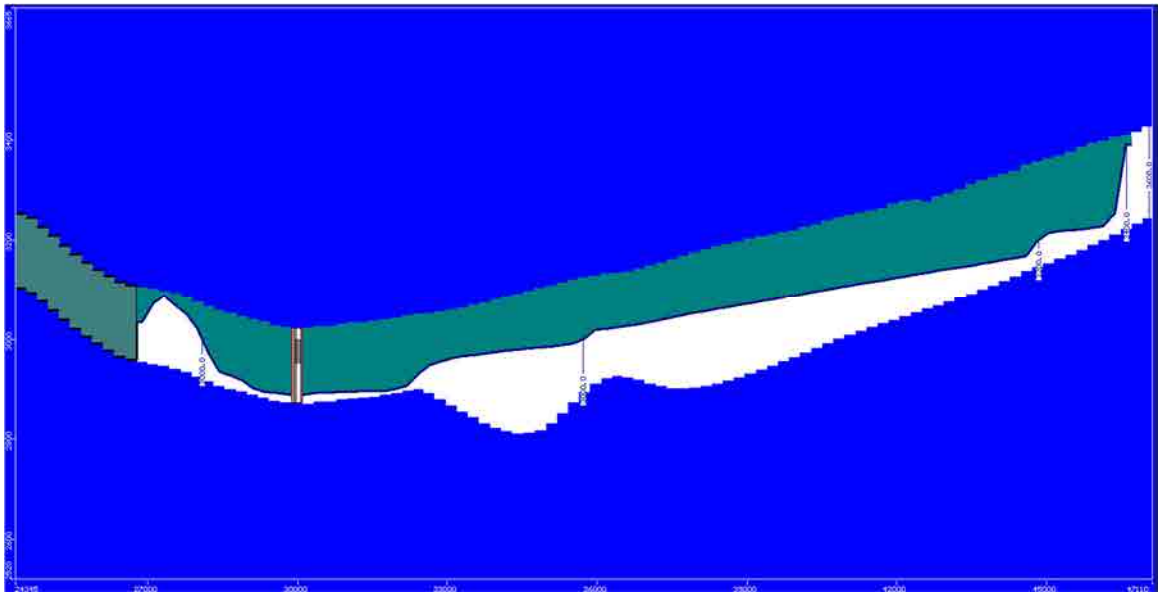


Figura 5-142. Perfil de dirección oeste-este, al norte del salar de Punta Negra para el final del periodo simulado en el escenario 3. Fuente: elaboración propia.

Escenario 3.3: Sustentabilidad hídrica con volumen de explotación del 10% de derechos otorgados

Posteriormente, la simulación se ha llevado a cabo suponiendo un 10% del caudal otorgado (156,58 L/s), no cumpliendo los criterios de sustentabilidad hídrica por los siguientes motivos:

- No atender la demanda impuesta en un 7,72% (caudal explotado medio en el periodo simulado igual a 144,50 L/s).
- Afectar a las surgencias naturales de agua (vertientes).
- Afectar a un 7,50% de las captaciones. 6 captaciones se secan en algún momento de la simulación (ver tabla siguiente).

Código Modelo	Expediente captación	X	Y	Q Otorgado (L/s)	Q otorgado m^3/d	Cuenca
33ND-0203-280	ND-0203-280	514293	7308153	28,0	2419,2	Salar Punta Negra
35ND-0203-293	ND-0203-293	511794	7305652	33,0	2851,2	Salar Punta Negra
39ND-0203-317	ND-0203-317	515294	7307152	19,0	1641,6	Salar Punta Negra
65ND-0203-510	ND-0203-510	505947	7264230	55,0	4752,0	Salar Punta Negra
78ND-0203-524	ND-0203-524	506300	7265180	40,0	3456,0	Salar Punta Negra
80ND-0203-604	ND-0203-604	506300	7265180	5,0	432,0	Salar Punta Negra

Tabla 5-69. Captaciones afectadas durante la simulación del escenario 3 al 10% de los derechos otorgados. Fuente: elaboración propia.

Escenario 3.4: Sustentabilidad hídrica con volumen de explotación del 4% de derechos otorgados

En este caso se ha realizado la simulación suponiendo un 4% del caudal otorgado (62,63 L/s), no cumpliendo los criterios de sustentabilidad hídrica por los siguientes motivos:

- Afectar a las surgencias naturales de agua (vertientes)

En este caso si se cumplirían los otros criterios, ya que de forma concreta, se da lo siguiente:

- Afección a la demanda es del 3,25% (60,60 l/s abastecidos frente a 62,63 l/s demandados)
- Afección a captaciones es de tan solo un 2,50%, ya que se ven afectadas 2 captaciones frente a 80 incorporadas (ver tabla siguiente).

Código Modelo	Expediente captación	X	Y	Q Otorgado (L/s)	Q otorgado m^3/d	Cuenca
35ND-0203-293	ND-0203-293	511794	7305652	33,0	2851,2	Salar Punta Negra
39ND-0203-317	ND-0203-317	515294	7307152	19,0	1641,6	Salar Punta Negra

Tabla 5-70. Captaciones afectadas durante la simulación del escenario 3 al 4% de los derechos otorgados. Fuente: elaboración propia.

- No se observan descensos piezométricos generalizados en el acuífero, tal y como se observa en la figura siguiente:

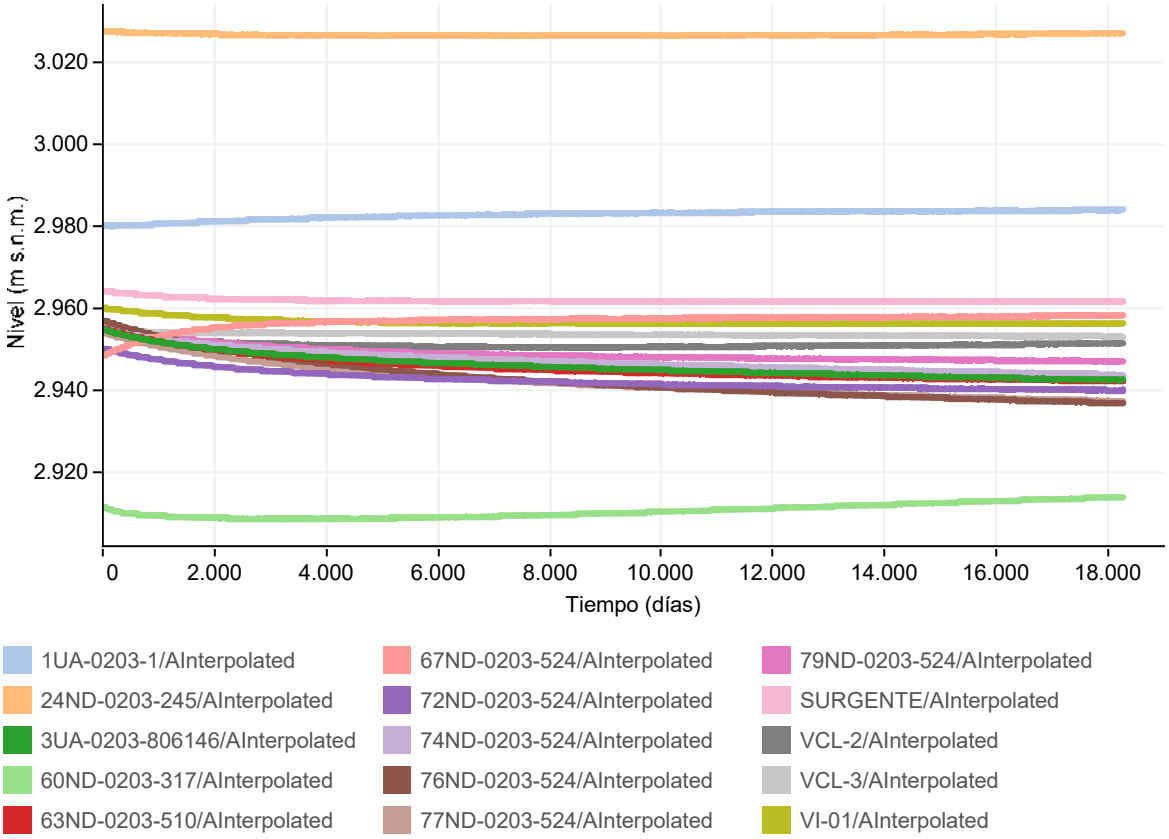


Figura 5-143. Evolución de niveles piezométricos simulados en el marco del escenario 3 con un 4% del volumen de explotación de derechos otorgados. Fuente: elaboración propia.

El balance hídrico obtenido es el siguiente:

FECHA	ENTRADAS		SALIDAS			VARIACIÓN ALMACENAMIENTO
	Recarga	Pozos inyección	Evaporación	Vertientes	Extracciones	
	L/s	L/s	L/s	L/s	L/s	L/s
2016	213,17	0,00	10,74	0,00	61,97	140,46
2017	215,25	0,00	10,06	0,00	61,41	143,77
2018	215,24	0,00	9,47	0,00	60,55	145,22
2019	189,52	0,00	8,99	0,00	60,55	119,97
2020	215,24	0,00	8,53	0,00	60,55	146,16
2021	215,24	0,00	8,17	0,00	60,55	146,52
2022	215,24	0,00	7,86	0,00	60,55	146,83
2023	189,52	0,00	7,61	0,00	60,55	121,36
2024	215,24	0,00	7,36	0,00	60,55	147,33
2025	215,24	0,00	7,17	0,00	60,55	147,52
2026	215,24	0,00	7,00	0,00	60,55	147,69
2027	157,13	0,00	6,87	0,00	60,55	89,72
2028	187,46	0,00	6,73	0,00	60,55	120,18
2029	187,46	0,00	6,61	0,00	60,55	120,30
2030	187,46	0,00	6,52	0,00	60,55	120,39
2031	187,46	0,00	6,43	0,00	60,55	120,48
2032	187,46	0,00	6,36	0,00	60,55	120,55
2033	187,46	0,00	6,30	0,00	60,55	120,61
2034	187,46	0,00	6,25	0,00	60,55	120,66
2035	187,46	0,00	6,20	0,00	60,55	120,71
2036	187,46	0,00	6,16	0,00	60,55	120,75
2037	187,46	0,00	6,13	0,00	60,55	120,78
2038	187,46	0,00	6,10	0,00	60,55	120,81
2039	187,46	0,00	6,08	0,00	60,55	120,83
2040	187,46	0,00	6,06	0,00	60,55	120,85
2041	187,46	0,00	6,04	0,00	60,55	120,87
2042	187,46	0,00	6,03	0,00	60,55	120,88
2043	187,46	0,00	6,02	0,00	60,55	120,89
2044	187,46	0,00	6,01	0,00	60,55	120,90
2045	187,46	0,00	6,01	0,00	60,55	120,90
2046	187,46	0,00	6,00	0,00	60,55	120,91
2047	187,46	0,00	6,00	0,00	60,55	120,91
2048	187,46	0,00	6,00	0,00	60,55	120,91
2049	187,46	0,00	6,01	0,00	60,55	120,90
2050	187,46	0,00	6,01	0,00	60,55	120,90

FECHA	ENTRADAS		SALIDAS			VARIACIÓN ALMACENAMIENTO
	Recarga	Pozos inyección	Evaporación	Vertientes	Extracciones	
	L/s	L/s	L/s	L/s	L/s	L/s
2051	187,46	0,00	6,02	0,00	60,55	120,89
2052	187,46	0,00	6,03	0,00	60,55	120,88
2053	187,46	0,00	6,04	0,00	60,55	120,87
2054	187,46	0,00	6,05	0,00	60,55	120,86
2055	187,46	0,00	6,06	0,00	60,55	120,85
2056	187,46	0,00	6,07	0,00	60,55	120,84
2057	187,46	0,00	6,08	0,00	60,55	120,83
2058	187,46	0,00	6,09	0,00	60,55	120,82
2059	187,46	0,00	6,11	0,00	60,55	120,80
2060	187,46	0,00	6,12	0,00	60,55	120,79
2061	187,46	0,00	6,14	0,00	60,55	120,77
2062	187,46	0,00	6,16	0,00	60,55	120,75
2063	187,46	0,00	6,18	0,00	60,55	120,73
2064	187,46	0,00	6,20	0,00	60,55	120,71
2065	180,95	0,00	6,22	0,00	60,55	114,18
Promedio (2016/2065)	191,77	0,00	6,67	0,00	60,60	124,50

Tabla 5-71. Resultados del balance hídrico con caudal de explotación igual al 4% de los derechos otorgados, simulado para un periodo de 50 años. Fuente: elaboración propia.

Como resultado de este escenario, se ha observado que el caudal máximo admisible conservando un nivel de explotación sustentables es de 62,6 L/s equivalente al 4% de los derechos totales otorgados, aunque no se cumpla el criterio de no afección a las vertientes, ya que éstas se encuentran actualmente afectadas, siendo necesaria la recarga artificial para que continúen funcionando.

Conclusión del escenario 3

Tras las simulaciones realizadas en el escenario de sustentabilidad hídrica utilizando las captaciones con derechos otorgados, tanto en ubicación geográfica como en caudal de explotación, se ha obtenido que se requiere de una disminución global de la explotación muy grande, debiendo explotar menos del 4% del volumen otorgado (62 L/s). No obstante, esto es debido a que el régimen de explotación (caudal constante en el tiempo), así como la distribución geográfica, generan afección entre captaciones de forma que no se cumplen los criterios de sustentabilidad hídrica aquí expuestos.

Por este motivo, y sabiendo que el acuífero tiene unas entradas por recarga de unos 174 L/s de media anual, se han realizado otra serie de simulaciones orientadas a obtener el caudal de explotación sustentable, con otra distribución geográfica, correspondiente a la de las captaciones catastradas durante la campaña de terreno (ver **Tabla 5-12**) y otro régimen de explotación distinto al de los caudales otorgados.

Requisitos cumplimiento	Demanda impuesta	Demanda atendida		Captaciones totales	Captaciones afectadas		Afección sistema superficial	Afección piezometría
	L/s	L/s	%	Nº	Nº	%		
Escenario (50%)	782,8	570,3	27,15	80,0	24	30,0	Si afecta	Si afecta
Escenario (12,5%)	195,7	177,9	9,10	80,0	6	7,5	Si afecta	Si afecta
Escenario (10%)	156,6	144,5	7,70	80,0	6	7,5	Si afecta	Si afecta
Escenario (4%)	62,6	60,6	3,20	80,0	2	2,5	Si afecta	No afecta

Tabla 5-72. Resumen resultados obtenidos en escenario 3. Fuente: elaboración propia.

*Se considera afección a la piezometría cuando se observa un descenso de los niveles generalizado en el acuífero.

ESCENARIO 4. SUSTENTABILIDAD HÍDRICA CON EXPLOTACIÓN ACTUAL

En vista de que los escenarios realizados utilizando los derechos otorgados no cumplían con los requisitos para ser sustentables. Se ha optado por simular dos escenarios adicionales utilizando la distribución de pozos que actualmente opera Minera Escondida para evitar la sobreexplotación que se producía en puntos concretos y que hacía que algunos pozos se secasen.

Las simulaciones realizadas en este sentido, han partido de la ubicación (ver **Tabla 5-12**) y régimen de explotación de las captaciones actuales, extrapolándolo a 50 años, para verificar si el volumen de explotación e inyección actual es sustentable a largo plazo.

Asimismo, se parte de la base de que la vertiente VCL-2 se encuentra afectada, y se debe inyectar unos 7,0 L/s para mantenerla activa.

En este caso se ha realizado la simulación suponiendo una explotación del 100% de las captaciones actuales, según el régimen actual, pero reproduciendo las mismas series de bombeo durante 50 años (315 L/s de media anual). En este supuesto, no se cumplirían los criterios de sustentabilidad hídrica por los siguientes motivos:

- Afectar a las surgencias naturales de agua (vertientes); provocando que se sequen, aunque MEL mantenga los caudales de inyección actuales.
- Generar un descenso piezométrico las zonas de bombeo de 1 metro/año aproximadamente. Este cálculo se realizó tomando descenso global de las zonas de bombeo y dividiendo por el número de años.
- Variación de almacenamiento negativa, media de 117,69 L/s anual, que supone, para el periodo simulado, una reducción del 0,29% del volumen total embalsado.

El balance hídrico obtenido aparece adjunto en el Anexo 9.

FECHA	ENTRADAS		SALIDAS			VARIACIÓN ALMACENAMIENTO
	Recarga	Pozos inyección	Evaporación	Vertientes	Explotación	
	L/s	L/s	L/s	L/s	L/s	
2016	204,35	7,20	10,79	0,24	252,92	-52,40
2017	227,52	7,20	10,22	0,31	355,13	-130,94
2018	215,07	7,20	9,70	0,32	310,45	-98,20
2019	201,85	7,20	9,25	0,31	319,32	-119,84
2020	232,99	7,20	8,83	0,31	319,32	-88,27
2021	226,66	7,20	8,52	0,31	319,32	-94,29
2022	226,66	7,20	8,25	0,31	319,32	-94,02
2023	185,05	7,20	8,02	0,30	322,80	-138,87
2024	246,52	7,20	7,81	0,30	311,79	-66,19
2025	266,78	7,20	7,64	0,30	336,11	-70,07
2026	219,94	7,20	7,50	0,30	336,25	-116,91
2027	196,68	7,20	7,38	0,30	304,89	-108,68
2028	186,43	7,20	7,27	0,29	320,41	-134,34
2029	224,24	7,20	7,17	0,29	259,63	-35,65
2030	179,25	7,20	7,09	0,29	317,79	-138,72
2031	207,47	7,20	7,02	0,29	317,79	-110,43
2032	179,25	7,20	6,97	0,29	317,81	-138,62
2033	179,25	7,20	6,92	0,29	317,81	-138,57
2034	179,25	7,20	6,88	0,29	317,79	-138,51
2035	205,19	7,20	6,84	0,28	344,03	-138,76
2036	133,00	7,20	6,81	0,28	330,78	-197,66
2037	187,88	7,20	6,78	0,28	365,95	-177,92
2038	173,23	7,20	6,76	0,28	276,70	-103,31
2039	186,83	7,20	6,74	0,28	294,86	-107,85
2040	156,29	7,20	6,73	0,28	306,26	-149,77
2041	155,72	7,20	6,71	0,28	337,93	-182,00
2042	189,57	7,20	6,70	0,27	317,75	-127,96
2043	189,57	7,20	6,70	0,27	317,77	-127,97
2044	186,60	7,20	6,69	0,27	317,81	-130,97
2045	186,60	7,20	6,69	0,27	317,81	-130,96
2046	208,11	7,20	6,69	0,27	324,16	-115,80
2047	134,89	7,20	6,68	0,26	296,34	-161,19
2048	183,49	7,20	6,69	0,26	383,69	-199,95
2049	187,02	7,20	6,69	0,26	314,54	-127,27
2050	200,02	7,20	6,69	0,26	245,13	-44,86

FECHA	ENTRADAS		SALIDAS			VARIACIÓN ALMACENAMIENTO
	Recarga	Pozos inyección	Evaporación	Vertientes	Explotación	
	L/s	L/s	L/s	L/s	L/s	
2051	216,19	7,20	6,69	0,26	344,12	-127,67
2052	183,35	7,20	6,69	0,25	297,17	-113,57
2053	174,67	7,20	6,69	0,25	313,52	-138,59
2054	234,25	7,20	6,70	0,25	313,54	-79,03
2055	234,25	7,20	6,70	0,24	313,54	-79,03
2056	174,67	7,20	6,70	0,24	313,53	-138,60
2057	163,06	7,20	6,71	0,24	318,27	-154,94
2058	250,04	7,20	6,71	0,23	312,18	-61,89
2059	266,23	7,20	6,71	0,23	332,97	-66,48
2060	181,20	7,20	6,72	0,22	340,05	-158,59
2061	190,21	7,20	6,72	0,22	290,89	-100,42
2062	188,83	7,20	6,72	0,22	315,20	-126,11
2063	221,35	7,20	6,73	0,21	247,51	-25,90
2064	187,45	7,20	6,73	0,21	325,69	-137,98
2065	187,45	7,20	6,73	0,20	325,72	-138,01
Promedio (2016/ 2065)	**198,05**	**7,20**	**7,23**	**0,27**	**315,44**	**-117,69**

Tabla 5-73. Balance hídrico escenario "Situación actual". Fuente: elaboración propia.

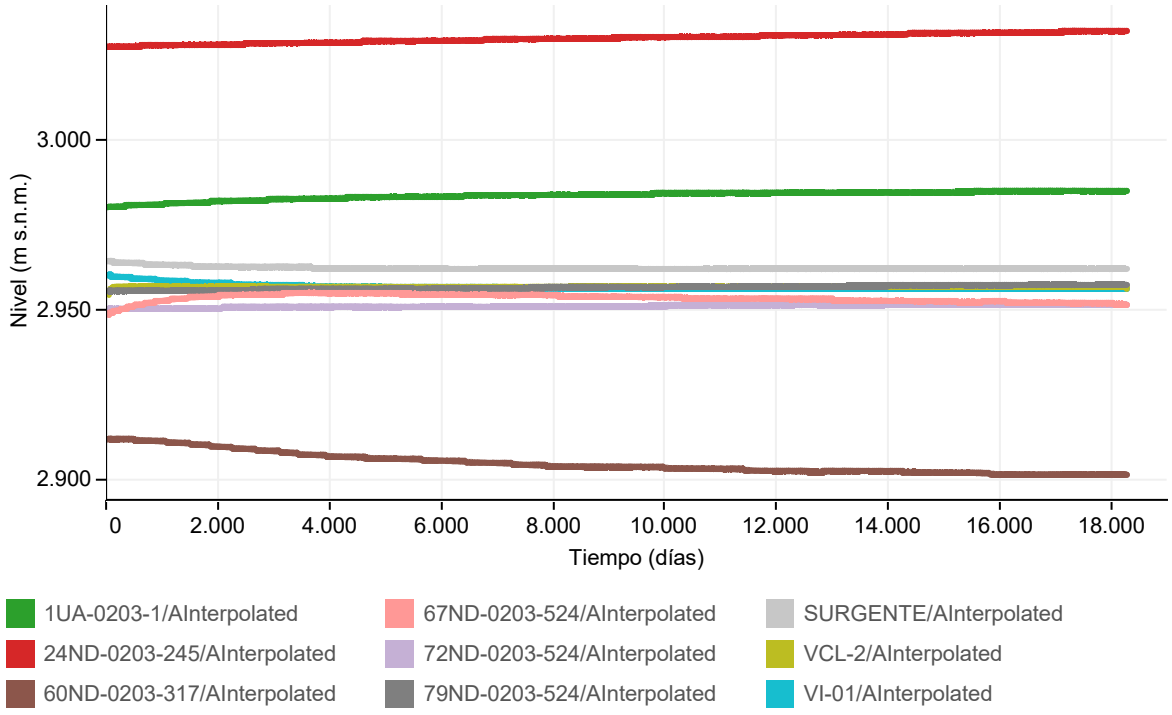


Figura 5-144. Datos y gráfica de evolución de los niveles piezométricos en las captaciones más representativas. Escenario 4. Fuente: elaboración propia.

ESCENARIO 5. SUSTENTABILIDAD HÍDRICA, VARIANDO LA EXPLOTACIÓN ACTUAL

Este último escenario pretende definir el volumen de explotación sustentable en el acuífero sin que afecte al acuífero teniendo en cuenta las captaciones que actualmente explotan (atendiendo al catastro realizado), así como la operación de inyección que se realiza, modificando, de forma homogénea, el caudal de explotación hasta encontrar el régimen de explotación sustentable, iterando sucesivamente el caudal de explotación total hasta que se cumplan todos los criterios de sustentabilidad hídrica.

Las simulaciones realizadas en este sentido, han partido de la ubicación (ver **Tabla 5-12**) y régimen de explotación de las captaciones actuales, extrapolándolo a 50 años, para verificar qué volumen de explotación es sustentable a largo plazo.

Asimismo, se parte de la base de que la vertiente VCL-2 se encuentra afectada, y se debe inyectar unos 7,0 L/s para mantenerla activa.

En este caso, tras las iteraciones realizadas, se ha llegado a la conclusión de que el volumen de explotación del 60% respecto al actual (190 L/s), cumple todos los criterios de sustentabilidad hídrica, ya que:

- Se atiende el 100% de la demanda impuesta.
- No hay afección entre captaciones.
- Las vertientes no se verían afectadas.
- No se producen descensos generalizados en el acuífero, de hecho, la variación de almacenamiento resulta ligeramente positiva (6,7 L/s), suponiendo un incremento del 0,02% del volumen embalsado actualmente.

El balance hídrico obtenido es el siguiente:

FECHA	ENTRADAS		SALIDAS			VARIACIÓN ALMACENAMIENTO
	Recarga	Pozos inyección	Evaporación	Vertientes	Explotación	
	L/s	L/s	L/s	L/s	L/s	L/s
2016	204,35	7,20	10,79	0,24	151,75	48,77
2017	227,52	7,20	10,22	0,31	213,08	11,11

FECHA	ENTRADAS		SALIDAS			VARIACIÓN ALMACENAMIENTO
	Recarga	Pozos inyección	Evaporación	Vertientes	Explotación	
	L/s	L/s	L/s	L/s	L/s	L/s
2018	215,07	7,20	9,70	0,32	186,27	25,98
2019	201,85	7,20	9,25	0,31	191,59	7,89
2020	233,00	7,20	8,83	0,31	191,59	39,46
2021	226,66	7,20	8,52	0,31	191,59	33,44
2022	226,66	7,20	8,25	0,31	191,59	33,71
2023	185,05	7,20	8,02	0,30	193,68	-9,75
2024	246,52	7,20	7,81	0,30	187,08	58,53
2025	266,78	7,20	7,64	0,30	201,67	64,37
2026	219,94	7,20	7,51	0,30	201,75	17,59
2027	196,68	7,20	7,38	0,30	183,62	12,58
2028	186,44	7,20	7,27	0,30	193,01	-6,94
2029	224,25	7,20	7,17	0,29	158,39	65,59
2030	179,25	7,20	7,10	0,29	191,59	-12,53
2031	207,48	7,20	7,03	0,29	191,59	15,76
2032	179,25	7,20	6,98	0,29	191,60	-12,42
2033	179,25	7,20	6,93	0,29	191,60	-12,38
2034	179,25	7,20	6,89	0,29	191,59	-12,32
2035	205,20	7,20	6,86	0,30	207,13	-1,88
2036	133,01	7,20	6,83	0,30	198,93	-65,85
2037	187,89	7,20	6,81	0,30	220,34	-32,35
2038	173,24	7,20	6,79	0,30	167,09	6,26
2039	186,84	7,20	6,77	0,30	178,21	8,76
2040	156,30	7,20	6,76	0,30	185,41	-28,98
2041	155,72	7,20	6,76	0,30	204,95	-49,08
2042	189,58	7,20	6,75	0,30	191,57	-1,84
2043	189,58	7,20	6,75	0,30	191,58	-1,86
2044	186,61	7,20	6,76	0,30	191,60	-4,85
2045	186,61	7,20	6,76	0,31	191,60	-4,86
2046	208,12	7,20	6,77	0,31	195,41	12,83
2047	134,91	7,20	6,77	0,31	179,42	-44,39
2048	183,51	7,20	6,78	0,31	232,91	-49,30
2049	187,04	7,20	6,80	0,31	190,99	-3,86
2050	200,04	7,20	6,81	0,31	150,08	50,04
2051	216,21	7,20	6,81	0,31	209,89	6,39
2052	183,36	7,20	6,82	0,31	182,88	0,54
2053	174,69	7,20	6,84	0,32	191,59	-16,86
2054	234,27	7,20	6,86	0,32	191,61	42,69

FECHA	ENTRADAS		SALIDAS			VARIACIÓN ALMACENAMIENTO
	Recarga	Pozos inyección	Evaporación	Vertientes	Explotación	
	L/s	L/s	L/s	L/s	L/s	L/s
2055	234,27	7,20	6,87	0,32	191,61	42,67
2056	174,69	7,20	6,89	0,32	191,60	-16,92
2057	163,08	7,20	6,90	0,32	194,44	-31,39
2058	250,06	7,20	6,92	0,32	191,37	58,65
2059	266,25	7,20	6,94	0,32	205,55	60,64
2060	181,21	7,20	6,95	0,32	205,66	-24,53
2061	190,23	7,20	6,97	0,32	177,85	12,28
2062	188,84	7,20	6,99	0,32	192,26	-3,53
2063	221,37	7,20	7,00	0,32	152,85	68,40
2064	187,46	7,20	7,02	0,32	197,98	-10,66
2065	187,46	7,20	7,04	0,32	198,00	-10,70
Promedio (2016/ 2065)	198,06	7,20	7,31	0,31	190,94	6,70

Tabla 5-74. Resultados del balance hídrico con caudal de explotación igual al 60% del caudal de explotación actual, simulado para un periodo de 50 años (escenario 5). Fuente: elaboración propia.

El balance obtenido para este escenario, es decir, para la situación actual aplicando una reducción tal que el caudal de explotación sea igual al 60% del existente y manteniendo el caudal de inyección al 100%, muestra una variación de almacenamiento cercana a cero. Las oscilaciones observadas se deben a las series de recarga y explotación las cuales varían en el tiempo. Con un caudal aproximado de 190 L/s con la distribución actual de pozos, la explotación seria sustentable al cumplirse las condiciones anteriormente mencionadas.

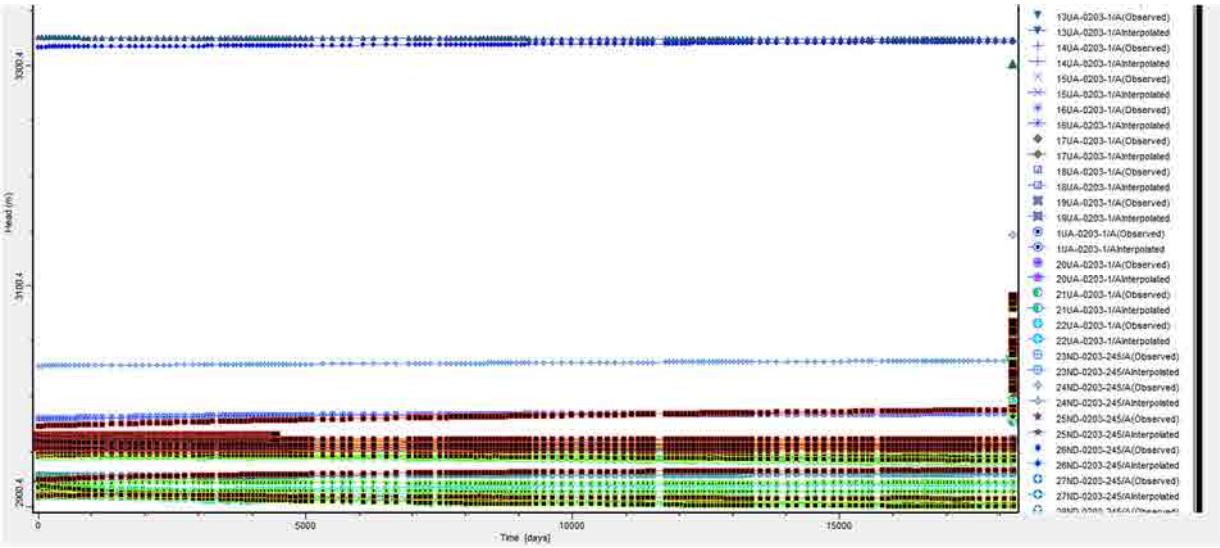


Figura 5-145. Evolución de los niveles piezométricos en el acuífero según escenario 5. Fuente: elaboración propia.

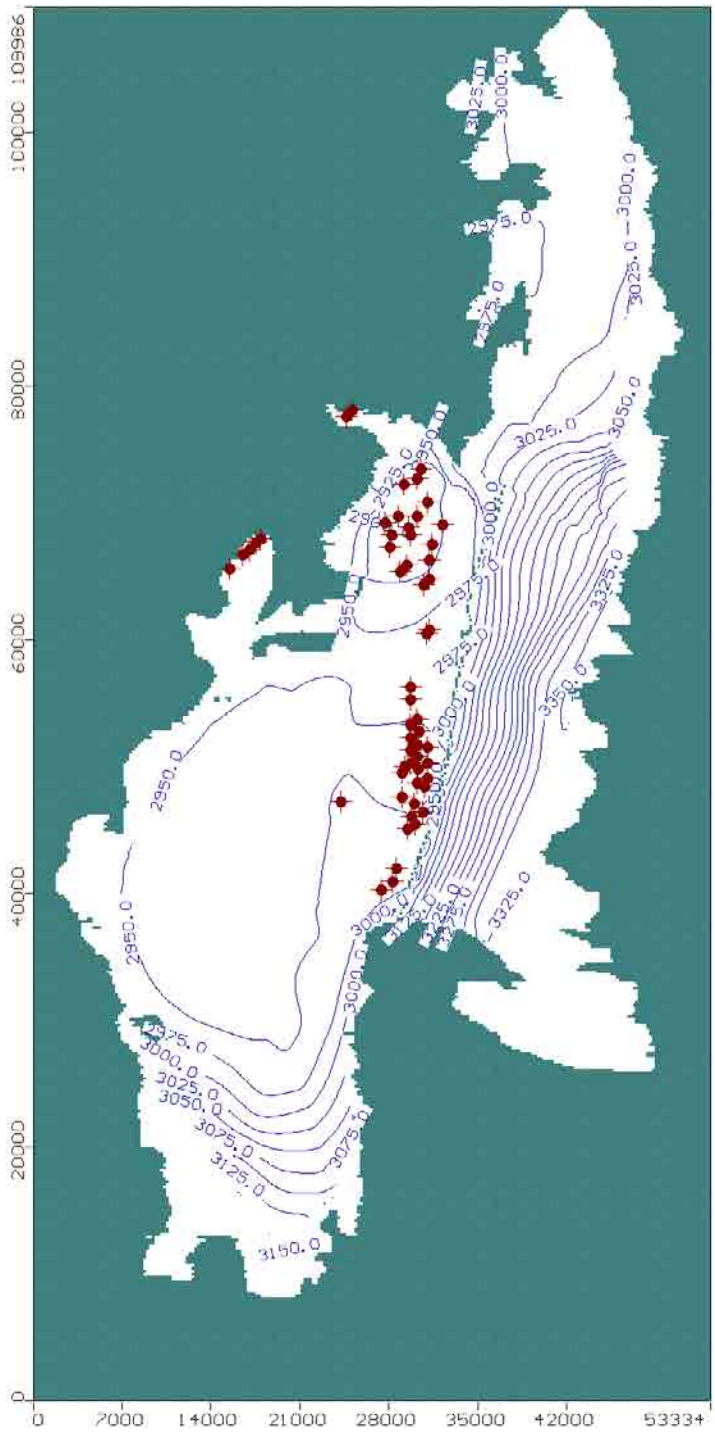


Figura 5-146. Mapa de isopiezas generado a los 50 años de simulación para el escenario 5. Fuente: elaboración propia.

Se concluye por tanto, que según este escenario se cumplen los criterios de sustentabilidad hídrica (Tabla 5-75).

Requisitos cumplimiento	Demanda impuesta	Demanda atendida		Captaciones totales	Captaciones afectadas		Afección sistema superficial	Afección piezometría*
	L/s	L/s	% no atendida	Nº	Nº	%		
60% explotación actual	190,9	190,9	0	80,0	0	0	No afecta	No afecta

Tabla 5-75. Resumen resultados obtenidos en escenario 5. Fuente: elaboración propia.

RESUMEN ESCENARIOS

En la Tabla 5-76 se incluye un resumen de los resultados de los escenarios simulados:

Escenarios	Demanda impuesta	Demanda atendida		Captaciones totales	Captaciones afectadas		Afección sistema superficial	Afección piezometría
	L/s	L/s	% no atendida	Nº	Nº	%		
Escenario 1. Explotación derechos otorgados al 100%	1.566	955,24	38,99%	80	28	35.00%	Si afecta	Si afecta
Escenario 2. Explotación derechos otorgados y en trámite al 100%	1.678,8	972,41	42,08%	85	30	35.29%	Si afecta	Si afecta
Escenario 3. Explotación derechos otorgados al 4%	62,6	60,6	3,19%	80	2	2.50%	Si afecta	No afecta
Escenario 4. 100 % explotación actual	315	315	0,00%	48	0	0.00%	Si afecta	Si afecta
Escenario 5. 60% explotación actual	190,9	190,9	0,00%	80	0	0	No afecta	No afecta

Tabla 5-76. Resumen de resultados de los escenarios simulados. Fuente: elaboración propia.

6 IV REGIÓN. SUBCUENCAS DEL RÍO CLARO Y RÍO TURBIO

6.1 RECOPILACIÓN Y ANÁLISIS DE ANTECEDENTES

La recopilación de antecedentes y análisis de la información existente tiene como objetivo la creación de una base de datos con todos los estudios/trabajos relacionados con los recursos hídricos de la zona de estudios publicados hasta la fecha. A continuación se presenta una selección y resumen de los estudios considerados como relevantes para la realización del proyecto (**Tabla 6-1**). Esta información servirá de base para la interpretación de los datos levantados en terreno y la elaboración del modelo conceptual.

La revisión de antecedentes ha contado con **27 estudios**, informes, tesis, entre otros, que son de dominio público en instituciones como la Dirección General de Aguas (DGA), Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), Universidades, Centro de Información Recursos Hídricos (CIREN), Dirección de Obras Hidráulicas (DOH), Servicio de Evaluación de Evaluación Ambiental (SEA), Comisión Nacional de Riego (CNR), Instituto Geográfico Militar (IGM), entre otros.

N° ARCHIVO	CÓDIGO DE INFORME	AÑO PUBLICACIÓN	AUTOR, TÍTULO y/o MANDANTE
IVR-AQ-1	S/C	1987	COMISIÓN NACIONAL DE RIEGO. Estudio Integral de Riego del Valle de Elqui. Volumen 1. INA, Ingenieros Consultores. Volumen 3 Capítulo I.
IVR-AQ-2	S/C	1995	BARRICK CHILE. Anexos, Estudio de Impacto Ambiental Integral Tranque de Relaves Pastos Largos.
IVR-AQ-3	S/C	2002	OYARZÚN, R.; LILLO, J.; HIGUERAS, P.; OYARZÚN, J.; Maturana, H. Sedimentos ricos en arsénico en la cuenca del río Elqui (norte de Chile): ¿Contaminación industrial o natural?
IVR-AQ-4	S.I.T.161	2003	DGA. Evaluación de los recursos hídricos subterráneos de la cuenca del rio Elqui iv región. S.D.T. Nº 161.
IVR-AQ-5	S/C	2004	CADE-IDEPE CONSULTORES EN INGENIERÍA, DGA. Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Cuenca del río Elqui.
IVR-AQ-6	S/C	2004	BARRICK CHILE. Plan de Cierre Laguna de Sedimentación y Tranque de Relaves Pastos Largos. Capítulo 4.
IVR-AQ-7	S/C	2005	UNIVERSIDAD DE CHILE. Análisis del impacto económico en sector silvoagropecuario del Anteproyecto de Norma de Calidad de Aguas del río Elqui.

N° ARCHIVO	CÓDIGO DE INFORME	AÑO PUBLICACIÓN	AUTOR, TÍTULO y/o MANDANTE
IVR-AQ-8	S.D.T. 228	2006	DGA-DICTUC. Evaluación de la explotación máxima sustentable del acuífero del valle del Elqui. S.D.T. Nº 228.
IVR-AQ-9	S/C	2006	CAZALAC-RODHOS. Aplicación de Metodologías para determinar la eficiencia de uso del agua, estudio de caso en la región de Coquimbo.
IVR-AQ-10	S/C	2007	CABEZAS R., CEPEDA J., BODINI A.; Descripción Cartográfica de la Hoya Hidrográfica del río Elqui (Región de Coquimbo, Chile). Universidad de La Serena, La Serena, Chile. ISBN 956 7393 249.
IVR-AQ-11	S/C	2008	CEPEDA P., J.; CABEZAS C., R.; ROBLES I., M.; ZAVALA Z., H. Antecedentes generales de la cuenca del río Elqui, Región de Coquimbo, Chile. J.
IVR-AQ-12	S/C	2008	CENTRO DE AGRICULTURA Y MEDIO AMBIENTE y FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS. Análisis de Vulnerabilidad del sector silvoagropecuario, recursos hídricos y edáficos de Chile frente a escenarios de Cambio Climático. Anexos. Caracterización de las cuencas seleccionadas. Universidad de Chile.
IVR-AQ-13	S/C	2008	ZABALA Z., H; TRIGOS A., H; MUNIZAGA A., I; MALL R., E. Hidrología Cuenca Río Elqui, MCRI Project: Institutional Adaptations to Climate Change.
IVR-AQ-14	S/C	2008	NOVOA J., J. Cambio climático del ecosistema semiárido transicional en Chile (IV Región de Coquimbo), mediante análisis de tendencia de caudales naturales. Tesis de Doctorado en Geografía. Universidad Nacional de Cuyo.
IVR-AQ-15	S/C	2008	OYARZÚN R., OYARZÚN, J., SEÑORET, M., MATURANA, H., ORTH, K., SOTO, G., KRETSCHMER, N. Technical Report on river basin characteristics, pressures and issues (Elqui). Chile.
IVR-AQ-16	S/C	2008	SOUVIGNET M., GAESE,H, RIBBE L., KRETSCHMER N. and R. OYARZÚN R. Climate Change Impacts on Water Availability in the Arid Elqui Valley, North Central Chile: A preliminary Assessment.
IVR-AQ-17	S/C	2009	CASTILLO, P. Geoquímica de sedimentos y relaves en la cuenca del río Elqui, Región de Coquimbo, Chile. Memoria para optar a título de Ingeniero Civil Ambiental. Universidad de La Serena.
IVR-AQ-18	S/C	2009	ROMERO FIGUEROA, C; Análisis de Embalse Subterráneo: Aplicación en Acuífero Subyacente al Río Elqui, IV Región de Coquimbo. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Ingeniería Civil.
IVR-AQ-19	S/C	2009	FAVIER V, FALVEY M, RABATEL A, PRADERIO E, and LOPEZ D. Interpreting discrepancies between discharge and precipitation in high-altitude area of Chile's Norte Chico region (26–32°S).

IVR-AQ-20	S/C	2011	LAFUENTE, C. A. Geoquímica de aguas y sedimentos de la cuenca del río Elqui. Tercera campaña de monitoreo, Proyecto CAMINAR, Y VISIÓN DE SÍNTESIS. Memoria para optar a título de Ingeniero Civil Ambiental. Universidad de la Serena.
IVR-AQ-21	S/C	2012	CORTES, A.E., OYARZÚN, R., KRETSCHMER, N., CHAVES, H., SOTO, G., SOTO, M., AMÉZAGA, J., OYARZÚN, J., RÖTTING, T., SEÑORET, M. and MATURANA, H. Application of the Watershed Sustainability Index to the Elqui river basin, North-Central Chile. Obras y Proyectos 12.
IVR-AQ-22	S/C	2012	HABITERRA. Plan Regulador Intercomunal Provincia del Elqui. Región de Coquimbo. Estudio Fundado de Riesgos. Anexo.
IVR-AQ-23	S/C	2013	GOBIERNO REGIONAL DE COQUIMBO. Diagnóstico Plan Maestro para la Gestión de Recursos Hídrico, Región de Coquimbo, CONIC Ingenieros Civiles Consultores.
IVR-AQ-24	S/C	2013	CONIC-BF INGENIEROS CIVILES CONSULTORES. Diagnóstico Plan Maestro para la Gestión de Recursos Hídricos, Región de Coquimbo. Informe Final. Tomo I –Informe Parte 1. Gobierno de Regional de Coquimbo.
IVR-AQ-25	S/C	2013	MIRALLES G., C. Evaluación de los factores que controlan la geoquímica de sedimentos fluviales de la cuenca del río Elqui, IV Región de Coquimbo. Memoria para optar al Título de Geología. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile.
IVR-AQ-26	S/C	2013	VILLA OLIVARES, E. Impacto del cambio climático sobre la disponibilidad del agua y sus efectos sobre los usos de agua en la cuenca del río Elqui. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Chile.
IVR-AQ-27	S/C	2015	HUBLART, P, RUELLAND, D, DEZETTER, A, y JOURDE, H. Reducing structural uncertainty in conceptual hydrological modelling in the semi-arid Andes. Hidrology and earth system sciences.
IVR-AQ-28	S/C	1988	DGA. Balance Hídrico Nacional
IVR-AQ-29	S/C	2008	MELITTA FIEBIG-WITTMAACK, CÉSAR PÉREZ V & EMILIO LAZO B. Aspectos Climáticos del valle de Elqui.

Tabla 6-1. Resumen de los antecedentes analizados para las subcuencas del río Claro y río Turbio. Fuente: elaboración propia.

A continuación se presentan los diferentes antecedentes:

1. ***COMISIÓN NACIONAL DE RIEGO. Estudio Integral de Riego del Valle de Elqui. Volumen 1. INA, Ingenieros Consultores. Volumen 3 Capítulo I, 1987.***

El estudio consistió en la evaluación de recursos naturales disponibles para el desarrollo agropecuario de la superficie agrícola regada y potencialmente regable en el Valle de Elqui. Dentro del informe se presenta un resumen de la pluviometría, fluviometría, sedimentación, estudio hidrogeológico, calidad de las aguas y un estudio de recuperaciones. Estas componentes se encuentran dentro del Volumen 3, Capitulo IV.

En el **estudio hidrogeológico**, el informe pretende describir los rasgos más característicos de la hidrogeología de la cuenca del río Elqui y sectores adyacentes. Se dividió la cuenca en 6 sectores que muestran homogeneidad desde el punto de vista hidrogeológico, con los siguientes sectores: río Claro-río Turbio; Vicuña; Puclaro; El Molle; Vegas Norte-J. Soldado y Pan de Azúcar. Los resultados y conclusiones se obtuvieron en base a una evaluación crítica de la información obtenida de la revisión de antecedentes y visitas a terreno.

El sector río Claro-río Turbio se caracteriza por la existencia de valles estrechos y encajonados donde la influencia de las glaciaciones se ha hecho sentir en los rellenos formados fundamentalmente por material morrénico. Esta condición ha quedado reflejada en las transmisividades que se estimaron, que no superan en ningún caso los 800 m^2/día y en la porosidad efectiva estimada como menor de 3%. De acuerdo a la estimación de gradientes y profundidades de la napa, la suma de caudales de escurrimiento subterráneo en ambos valles no alcanzaría los 75 L/s, mientras que el volumen de almacenamiento total alcanzaría los 4,7 millones de m^3.

Desde el punto de vista **geológico y geomorfológico**, la zona alta de la cuenca, donde se desarrollan los ríos Claros y Turbio, fue intensamente afectada por las glaciaciones del Pleistoceno. A pesar de que las formas glaciales están poco desarrolladas y se limitan a las partes superiores de los valles, su influencia ha llegado incluso hasta algunos kilómetros aguas abajo de Rivadavia, presentándose a lo largo de este recorrido morrénicos de hasta más de 100 m de espesor provenientes de arrastre.

Geomorfológicamente, el área de estudio puede dividirse en tres zonas características. En la zona costera el paisaje geomorfológico muestra la presencia de terrazas marinas, que en el Valle del río Elqui presentan cinco niveles diferentes bien delineados. Las terrazas

superiores están constituidas por arenas gruesas con niveles de grava de una composición generalmente heterogénea. Las terrazas bajas, por otra parte, están formadas por gravas y arenas de constitución mixta y debido a su cercanía con el nivel base presentan baja capacidad de drenaje.

La zona intermedia muestra al Valle del Río Elqui marcado por un relieve abrupto, donde el granito de la cordillera de la Costa aporta material meteorizado hacia las partes bajas. El valle pierde importancia hacia el oriente, disminuyendo igualmente el desarrollo de las terrazas. Las unidades geomorfológicas mixtas se van haciendo más comunes, observándose a menudo terrazas aluviales mezcladas con piedemonte y conos.

Avanzando hacia aguas arriba, los rasgos aluviales desaparecen y el río corre en general por un valle encajonado, salvo en las vecindades de Vicuña; en ese sector el valle se amplía, encontrándose terrazas de cierta importancia en una topografía ondulada donde existe bastante desarrollo de piedemontes como consecuencia de una fuerte erosión, constituyendo depósitos mixtos de composición heterogénea con predominio de arenas y gravas a cierta profundidad.

La zona superior aparece notablemente influenciada por el arrastre de material morrénico de las glaciaciones. Los valles en sí se mantienen encajonados, aunque los depósitos del fondo presentan ahora la forma de bloques con predominio de arcillas en sus partes profundas y de arenas cerca de la superficie, careciendo el sedimento de estratificación. Este rasgo es algo menos notorio en el río Turbio que en el río Claro, debido a que por su mayor desarrollo este tipo de sedimento ha sido destruido por la erosión y sustituido o cubierto por sedimentos fluvioglaciales producto de las últimas glaciaciones.

Para la definición y ubicación de los tipos de **formaciones acuíferas** presentes en la zona de estudio se utilizó la información estratigráfica de los pozos construidos, las pruebas de agotamiento en cada captación y la caracterización geológica y geomorfológica del área de estudio. Las características del sector río Claro-río Turbio dentro de los 6 sectores hidrogeológicamente homogéneos se describen a continuación.

El sector comprende por el norte el valle del río Turbio y por el sur el valle del río Claro con sus dos principales afluentes, el río Cochiguas y el río Derecho. Todos estos valles son sumamente estrechos y de pendientes pronunciadas, presentando poca importancia hidrogeológica debido al origen morrénico de gran parte de los sedimentos allí existentes.

Las formaciones acuíferas presentes son escasas y de poca potencia, habiendo sido detectadas en diversos lugares y a distintas profundidades en condiciones de napas confinadas o semiconfinadas. Solamente algunos sondajes perforados en Varillar han atravesado acuíferos de alguna importancia. Por lo general las formaciones acuíferas de cierto valor se ubican bajo los 15 m, no alcanzando más allá de unos 40 m de profundidad. Debido a la escasa información, no es posible asegurar la existencia de formaciones acuíferas de alguna continuidad a lo largo de los valles, ni definir profundidades características del nivel piezométrico.

En relación a los **coeficientes elásticos**, en el valle del río Turbio se identificaron transmisividades relativamente altas en los pozos 2950 -70310 D6 y D7, ubicados en la localidad de Varillar, las que no superan los 800 m^2/día. En el valle del río Claro, lo mismo que en los valles afluentes, la transmisividad de los acuíferos disminuye a valores notoriamente inferiores a los anteriores, menores de 100 m^2/día (pozos 3000-7030B2 y 3000-7020 C3).

En este sector se dispuso de antecedentes limitados para evaluar el coeficiente de almacenamiento, pero por las características estatigráficas de los pozos perforados y de las pruebas de bombeo pudo asignarse valores comprendidos entre 1% y 3% para los pozos D6 y D7 del rio Turbio, respectivamente, y entre 0,1% a 0,5% para los pozos del río Claro, con excepción del pozo 3000-7020 C3 ubicado en Monte Grande donde el almacenamiento se estimó en 1%.

Estas cifras de almacenamiento estarían indicando que los acuíferos explotados en este sector son de naturaleza confinada o semiconfinada y por lo tanto, presentan en general bajos rendimientos desde el punto de vista de la explotación de las aguas subterráneas.

En términos de **niveles de aguas subterráneas**, no se dispone de datos hasta el año 1980, ya que no existían pozos donde se hayan efectuado mediciones a lo largo del tiempo. Las fluctuaciones de niveles y profundidad de la napa no se encuentran caracterizados por ausencia de registros, sin embargo se podría inferir de la información de la parte alta del sector de Vicuña. Para eso se dispone de los datos de los pozos 2950-7030 C1 y C2. En estos pozos la variación anual más marcada aparece localizada entre enero de 1979 y diciembre de ese mismo año, alcanzando a 6 m aproximadamente. En el pozo C2, que cuenta con información a partir de enero de 1973, se observa claramente una tendencia descendente hasta principios del año 1977, con fluctuaciones mensuales de hasta 2 m,

salvo entre abril y mayo de 1978 donde la fluctuación alcanzó los 4 m. En este mismo período, en el pozo se detecta también la mayor variación mensual, la cual supera los 3 m. La tendencia de los registros aparece relativamente más estable durante 1980 en comparación con 1979, pero hacia finales del año se hace aparente un descenso de los niveles dejándolos a cotas semejantes a los del período 1975-1977.

En este sector se evaluó por separado el caudal subterráneo en los valles del río Claro y del río Turbio. En el valle del río Claro, en la zona de ubicación del pozo 3000-7030 B2 se detectó una transmisividad inferior a 100 m^2/día. En las vecindades de esta zona, el gradiente hidráulico y el ancho de valle que pueden adoptarse como representativos son respectivamente, 17% y 490 m. De acuerdo a estos antecedentes, el caudal propio de la napa en esta zona sería como máximo 9,6 L/s. El estudio presenta una inconsistencia entre los valores reportados y el cálculo del caudal, posiblemente atribuible a un reporte erróneo del gradiente, siendo 1,7%.

En el valle del río Turbio, en la zona vecina a la localidad de Varillar donde las transmisividades máximas alcanzan los 800 m^2/día, se determinó un gradiente hidráulico medio de 14%. En esta zona el valle presenta un ancho que oscila entre 400 y 600 m, pudiéndose adoptar un valor representativo de 490 m. En base a estas cifras el caudal resulta 63,5 L/s. Del mismo modo que antes, el estudio presenta una inconsistencia entre los valores reportados y el cálculo del caudal, posiblemente atribuible a un reporte erróneo del gradiente, siendo 1,4%.

El **volumen de almacenamiento** de aguas subterráneas en el valle del río Turbio se ha estimado en 3,5 millones de m^3. Esta cifra resulta de considerar una porosidad efectiva media de 2% para el valle. La estimación efectuada para el río Claro arroja un resultado de 1,2 millones de m^3, utilizando una porosidad efectiva de 1%.

Las fluctuaciones anuales máximas del volumen almacenado, determinadas en base a la información de niveles, han sido estimadas en 5% de ese volumen. De esta forma, el sector quedaría caracterizado por un volumen de almacenamiento total cercano a 4,7 millones de m^3 con fluctuaciones anuales máximas de 0,2 millones de m^3.

En cuanto a **recarga y descarga naturales**, las condiciones del agua subterránea en la cuenca del río Elqui están definidas por diversos factores que tienen una influencia variable a lo largo del río y a lo largo del año. La geomorfología del valle es un elemento que regula

en gran medida las pérdidas o afloramientos de aguas subterráneas a lo largo del río. En efecto, en este aspecto es posible diferenciar claramente sectores que se comportan de manera definida, debido a las características del relleno y a la estrechez o amplitud del valle.

El sector ubicado aguas arriba de Rivadavia, donde los ríos Claro y Turbio se extienden por valles encajonados en que el relleno es principalmente de origen morrénico, no mostraría áreas de pérdidas o afloramientos identificables, más aún si la influencia que pudiera tener el riego en este aspecto es mínima. En todo caso la información disponible para ese sector es muy escasa.

La **Figura 6-1** muestra los pozos existentes en la zona del río Turbio y río Claro, además de sus principales caracteríticas de contrucción y en la **Figura 6-2** se indica las ubicaciones.

Hoya	Coord. Area	Pozo	Construc.	Ubicación	Fecha Constr.	Prof. Perf. (m)	Habilitación Prof. (m)	Habilitación Diam. (pulg)	Rendimiento del Pozo $Q_{máx}$ (l/s)	Rendimiento del Pozo Dep. (m)	Rendimiento del Pozo Q_{esp} (l/s/m)	NE(m)	Fecha	Uso	Cota Terreno (*) m.s.n.m
304	29°50' 70°20'	A1	D.Riego 1	Bocalume	12/69	100,0	100,0	10"8"6"	40,0	2,24	17,9	44,76	12/69	R,S/U,O	
	29°50' 70°30'	B1	D.O.S.1382	P.Chapilga	/78									P,S/U	
		D3	CZ 1463	P.Varillar	3/77	34,0	0							E ,AB	876,5
		D4	CZ 1472	P.Varillar	5/77	30,6	0							E ,AB	876,0
		D5	CZ 1463	P.Varillar	3/77										870,0
		D6	CZ 1472	P.Varillar	5/77	118,0	113,7	12"							865,0
		D7	Captagua	P.Varillar	11/78	70,0	70,0	8"	15,0	3,50	4,3	28,38	24/11/78	P,S/U	875,0
	30°00'	A1	D.Riego 1	Paihuano	2/70	50,0	35,0	10"	60,0	7,81	7,7	6,63	2/70	R,S/U,O	
	70°20'	A2	D.Riego 3	Paihuano	7/70	51,2	51,2	10"	17,0	30,50	0,6	13,80	7/70	R,S/U	
		C1	D.Riego	Fdo.La Jarilla	6/70	50,0	50,0	12"	15,0	29,11	0,5	3,75	7/70	R.E, S/U	
		C2	Corfo 1385	Monte Grande	1/75	25,5	24,0	6"				10,20		E ,AB	
		C3	CZ 1539	P.Montegrande	9/78	40,0	40,0		4,4	3,80	1,2	32,00	8/9/78	P,S/U	
	30°00'	B1	D.Riego 2	Paihuano	3/70	15,45	15,0	10"	1,0			1,70	3/70	R,S/U	
	70°30'	B2	CZ 1230	Paihuano	6/72	36,0	35,0	10"	8,0	9,65	0,8	7,35	8/72	P	
	30°10'	A1	D.Riego	Las Placetas	/70	35,0	35,0	10"	1,5			8,50	/70	R,S/U	
	70°20'	A2	D.Riego 1	Fdo. Laviga	12/70	45,0	40,0	10"	10,0	26,52	0,4	4,37	1/71	R,S/U	

Figura 6-1. Sondajes del sector río Turbio y río Claro. Fuente: Comisión Nacional de Riego, 1987.

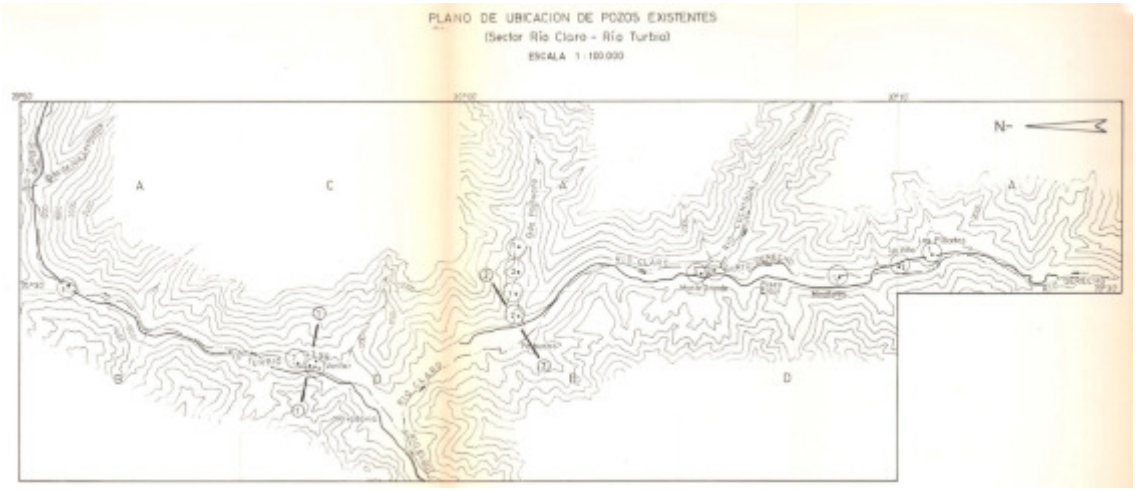


Figura 6-2. Ubicación de los sondeos en sector río Turbio y río Claro. Fuente: Comisión Nacional de Riego, 1987.

En el estudio, existen valores que resultan dudosos (p.e. gradiente hidráulico medio de 14%), a partir de los cuales se estiman caudales de aguas subterráneas pasantes. Tendría sentido confirmar estos valores con la ejecución del presente trabajo. Por otra parte, la **Figura 6-1** y la **Figura 6-2** muestran información que no puede confirmarse en otro GIS, debido a que al colocar las coordenadas de los sondajes, su ubicación no coincide con los valles (como lo señala el plano de ubicación). El plano, por su parte, no ubica los sondeos con la misma nomenclatura, por lo que no se pueden correlacionar.

2. ***BARRICK CHILE. Anexos, Estudio de Impacto Ambiental Integral Tranque de Relaves Pastos Largos. 1995.***

Este documento (Anexos) presenta información sin analizar del Anuario Nivometeorológico 1995, análisis de agua, gráficos de temperaturas, presiones atmosféricas, humedad relativa, etc. Este documento presenta un addendum, con las respuestas a la observaciones del EIA Integral del Tranque, donde se incluyen los registros de 7 sondeos con información legible de calidad de la roca, litología y estructuras (**Figura 6-3**).

Los mapeos de los sondeos que se presentan en el documento muestran una potencia de sedimentos que varía entre 2 y 6,7 m, compuestos en su mayoría por gravas mal graduadas. Se registra un nivel freático, medido durante la perforación, cuya profundidad varía de 0,9 m a 1 m. No se encontró publicado el informe del EIA, sino sólo los anexos.

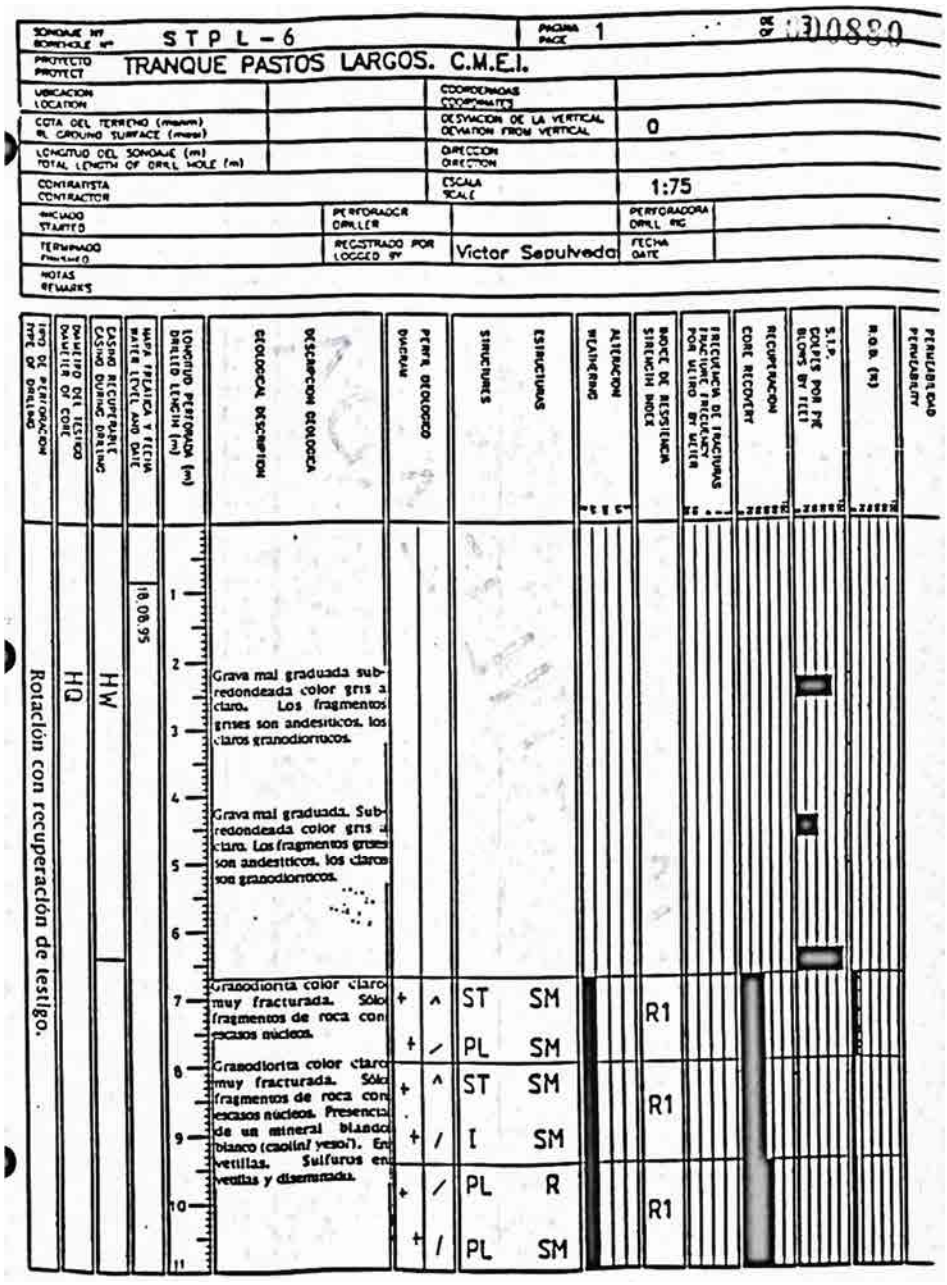


Figura 6-3. Registros de sondeos en zona del Tranque Pastos Largos. Barrick Chile, 1995.

3. ***OYARZÚN, R.; LILLO, J.; HIGUERAS, P.; OYARZÚN, J.; Maturana, H. Sedimentos ricos en arsénico en la cuenca del río Elqui (norte de Chile): ¿Contaminación industrial o natural? 2002.***

El objetivo de este informe es definir si las altas concentraciones de arsénico en la cuenca del río Elqui son de origen natural o debido a la contaminación producida por la actividad minera.

En la zona de estudio el arsénico puede tener dos orígenes: 1) las actividades mineras y metalúrgicas llevadas a cabo en el distrito de El Indio – Tambo; y 2) la importante faja de zonas de alteración hidrotermal desarrolladas en la alta cordillera durante el Mioceno.

Se tomaron 14 muestras de sedimentos de río (muestras ESS) y 14 de la secuencia lacustre del Holoceno (muestras HLS) principalmente en la parte alta de la cuenca coincidiendo con los ríos Toro, La Laguna, Turbio y Elqui. Las muestras ESS fueron tomadas en los bordes de los ríos, centrándose en la fracción de tamaño limo. Las muestras HLS fueron tomadas con objeto de estudiar las posibles variaciones geoquímicas en la vertical y horizontal de la secuencia.

Los resultados obtenidos entregan altas concentraciones de arsénico en los materiales lacustres del Holocenos. Estos materiales tienen una edad de 9.640 años siendo anteriores a la actividad minera en la zona. A partir de estos resultados concluyen que los altos contenidos de arsénico no son debidos únicamente a la actividad minera.

4. ***DGA. Evaluación de los recursos hídricos subterráneos de la cuenca del rio Elqui iv región. S.D.T. Nº 161. 2003.***

Estudio completo de la DGA donde se presenta una evaluación de los recursos hídricos subterráneos de acuíferos del río Elqui y su comparación con la explotación prevista de los derechos solicitados y los usos y derechos factibles de regularizar, para diversos escenarios de extracción. Para el cálculo de los diferentes escenarios se realizó un modelo numérico del acuífero desde la cabecera del río Elqui en la unión del río Turbio y río Claro hasta la desembocadura (**Figura 6-4**. Según el informe, el río Elqui en su cabecera tiene una caudal en régimen natural de **239 L/s**. Cabe destacar que el modelo realizado en este punto, considera un valor de evapotranspiración de cero. Los coeficientes de permeabilidad y transmisividad estimados por distintos métodos presentan una variación importante. El

coeficiente de permeabilidad varía entre 2 y 5 m/día hasta valores de 45 a 65 m/día. De igual forma, la transmisividad varía entre 130 m^2/d y 5.300 m^2/d.

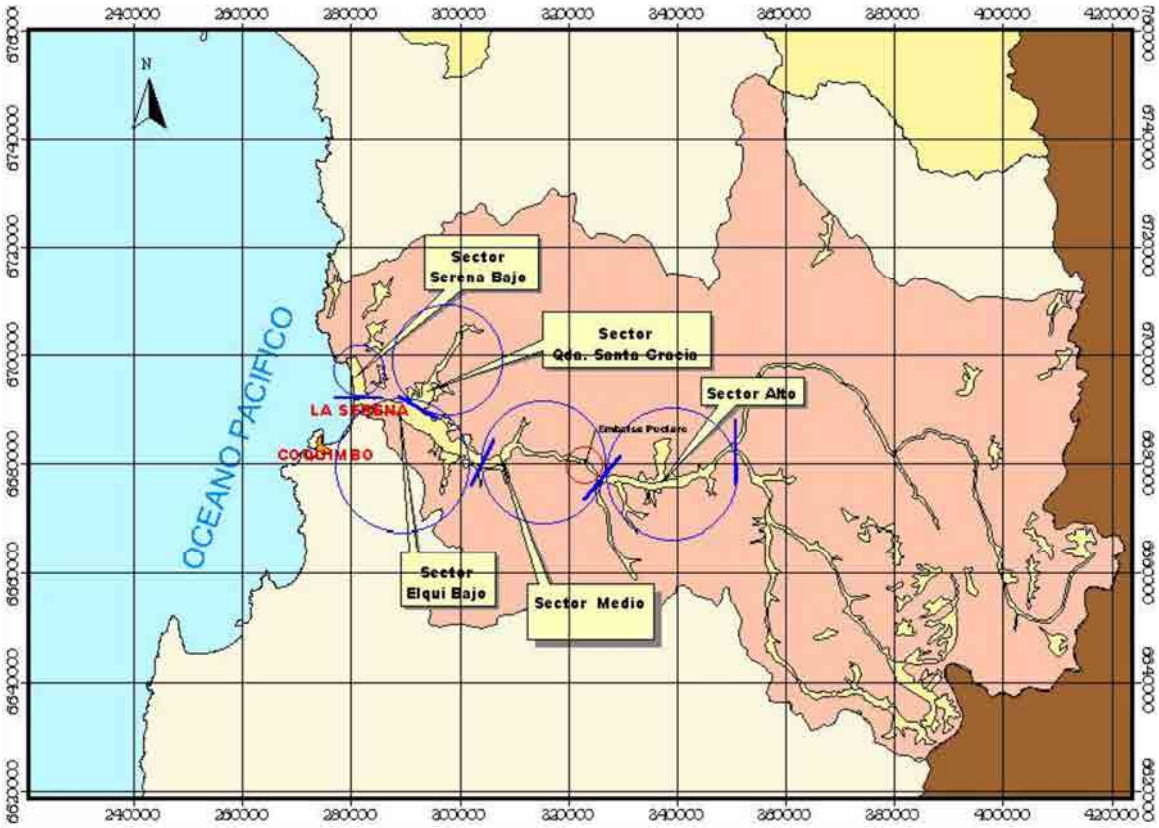


Figura 6-4. Ubicación de los diferentes sectores donde se ha realizado el modelo numérico. Fuente: Dirección General de Aguas, 2003.

5. ***CADE-IDEPE CONSULTORES EN INGENIERÍA, DGA. Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Cuenca del Río Elqui. 2004.***

Descripción general y clasificación de los cursos de agua de la cuenca del río Elqui. En la parte alta de la cuenca destaca la existencia de permeabilidades muy bajas debido a la existencia de rocas metamórficas y sedimentarias, volcánicas y plutónicas e hipabisales del período paleozoico motivo por el cual el escurrimiento subterráneo ocurre paralelo a los cauces.

En esta zona destaca dos direcciones de flujo preferenciales: uno en dirección ESW paralelo al río Turbio hasta el poblado de Rivadavia con una profundidad promedio de 45 m y

productividad de 50 m^3/h/m. Este acuífero escurre a través de rocas de permeabilidad muy baja encauzándose paralelo al río Turbio.

En dirección Sur a Norte por un lecho de rocas Plutónicas escurren aguas subterráneas paralelas al río Claro derecho hasta la confluencia con el río Turbio en Rivadavia.

6. ***BARRICK CHILE. Plan de Cierre Laguna de Sedimentación y Tranque de Relaves Pastos Largos. Capítulo 4. 2004.***

El documento se elabora dos años antes del cierre definitivo de las instalaciones mineras Laguna de Sedimentación y Tranque de Relaves Pastos Largos, como se indica en la Resolución de Calificación Ambiental N°47 de 1997. En ésta se señala como condición la presentación de un Plan de Cierre para las instalaciones señaladas.

Desde el punto de vista **geomorfológico**, el Tranque Pastos Largos se constituye como un cajón del río Malo, que corresponde a uno de los valles transversales del sistema cordillerano andino, caracterizado por montañas con taludes empinados, con altitudes por sobre los 4.500 msnm.

La morfología corresponde a rocas ígneas, fuertemente alteradas y desectadas por quebradas abruptas. La meteorización física es el principal agente morfogénico de la zona. Los detritos generados por los agentes erosivos son depositados en el pie de los taludes, en las paredes de las quebradas y en el fondo del valle, acumulados como escombros de falda.

La **geología** del sector de Pastos Largos describe afloramientos de rocas intrusivas, tipo granodiorita anfibolítica y biotítica, ubicadas en las quebradas y laderas de orientación norte del valle. La ladera de orientación sur se caracteriza por la presencia de rocas volcánicas ácidas a intermedias, dacíticas con intenso grado de fracturación. Cubriendo y rellenando las quebradas y afloramientos, se encuentran depósitos aluviales recientes, escombros de falla y derrumbes modernos con espesores de 7 m como máximo. Las estructuras reconocidas corresponden a fallas con rumbo NS-SE y NS, asociadas a rocas brechizadas.

La **hidrología subterránea** del sector describe el sistema superficial infiltrando al acuífero y fluyendo hasta su descarga al curso del rio Malo. El agua del sistema de fracturas en el extremo norte aflora en las faenas de la mina y descarga a través del Túnel San Pablo, para escurrir hacia río Malo. La magnitud del flujo que descarga desde el túnel y aporta al río es

de 170 L/s. El nacimiento del río Malo ocurre aguas arriba, en la cabecera de la cuenca, en el sector denominado "Huantina".

Para monitorear la **calidad y nivel de las aguas subterráneas** aguas abajo del Tranque Pastos Largos se instalaron cuatro piezómetros en agosto de 1997. La operación del tranque comenzó a fines de 1998, con mediciones propuestas en el EIA. Los valores indicados a continuación corresponden al periodo de septiembre de 2002 a julio de 2003.

- Piezómetro PL-1. Nivel freático con fluctuaciones de 0,1 a 3,6 m por debajo de la superficie. El pH neutro, sin variaciones significativas. Baja concentración de Cu, en promedio 0,45 mg/L. Concentración de Fe con tendencia descendente a partir de 1999, con concentración promedio de 3,3 mg/L. As con valores de 0,05 mg/L, con máximo en época de deshielo (1,27 mg/L). Mn estable hasta 1999 donde alcanzaron un valor de 1,6 mg/L. La concentración de los sulfatos promedia 1.022 mg/L, con valores máximos en época de deshielo.

- Piezómetro PL-2. Nivel freático con fluctuaciones de 2,1 a 3,4 m por debajo de la superficie. El pH ligeramente básico de 7,52. Baja concentración de Cu, en promedio 0,05 mg/L. Concentración de Fe con tendencia descendente, con concentración promedio de 6,07 mg/L. As con valores de 0,07 mg/L, con máximo en época de deshielo (1,05 mg/L). Mn estable con un valor de 1,99 mg/L.

- Piezómetro PL-3. Nivel freático con fluctuaciones de 0,1 a 2,3 m por debajo de la superficie. El pH ligeramente básico de 7,8. Concentración de Cu, en promedio 0,014 mg/L. Concentración de Fe en promedio de 3,59 mg/L. As con valores de 0,03 mg/L. Mn estable con un valor de 2,14 mg/L.

- Piezómetro PL-4. Nivel freático con fluctuaciones de 1,5 a 2,8 m por debajo de la superficie. El pH de 4,15. Baja concentración de Cu, en promedio 1,54 mg/L. Concentración de Fe en promedio de 89,069 mg/L. As con valores bajos de 0,0026 mg/L. Las concentraciones de Mn altamente variable con un valor promedio de 19,2 mg/L.

- Piezómetro PL-5. El nivel de agua es artesiano. pH promedio de 7,7, con pequeñas fluctuaciones. Baja concentración de Cu y Fe de 0,009 mg/L y 0,21mg/L, respectivamente. Concentraciones de As son variables, entre 0,4 y 4 mg/L. Concentraciones de Mn son bajas y estables, de valor medio 0,02 mg/L.

- Piezómetro PL-6. El nivel de agua fluctúa entre 4,6 y 7 m de la superficie. pH promedio de 6,55; con pequeñas fluctuaciones. Concentración de Cu de 2,83 mg/L y la concentración Fe es de 0,33 mg/L. Concentraciones de As son variables entre 0,01 y 1,8 mg/l. Concentraciones de Mn son bajas y estables, de valor 1,67 mg/L.

Este informe no presenta un plano con las ubicaciones ni con las cotas de los piezómetros. Hay figuras que indican que el pie del muro se encuentra a 3.480 msnm. No se sabe cuál es la distancia a la que se encuentran los piezómetros del pie del muro (corte transversal en la **Figura 6-5**).

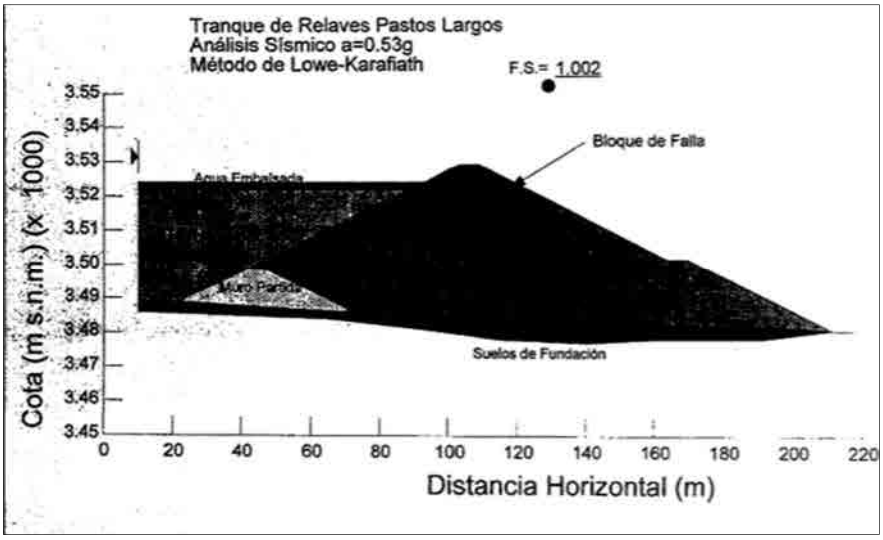


Figura 6-5. Corte transverdal de Tranque de Relave. Fuente: Barrick Chile, 2004.

7. ***UNIVERSIDAD DE CHILE. Análisis del impacto económico en sector silvoagropecuario del Anteproyecto de Norma de Calidad de Aguas del río Elqui. 2005.***

El objetivo de este proyecto fue evaluar el impacto económico que tendría la aplicación de la nueva Norma Secundaria de Calidad de Aguas para la Región de Coquimbo. El Servicio Agrícola y Ganadero (SAG) trabajó en el diseño de esta norma, y previamente a su aplicación solicitó la realización de un estudio que determinase el impacto económico que generaría esta nueva norma sobre el sector agropecuario en la cuenca del río Elqui.

De acuerdo a lo sugerido por la Dirección Regional del SAG IV Región, procedieron al procesamiento de la información de la línea base contenida en el documento "Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad" (CADE-IDEPE,

2004). Los valores de los parámetros establecidos en el "Anteproyecto de Norma Secundaria de calidad de aguas superficial de la cuenca del río Elqui y sus tributarios principales" (SAG, 2005) se contrastaron con la información de la línea base (CADE-IDEPE, 2004) y con los valores sugeridos en el estudio FAO de riego y drenaje 29 (FAO, 1987) (**Figura 6-6**).

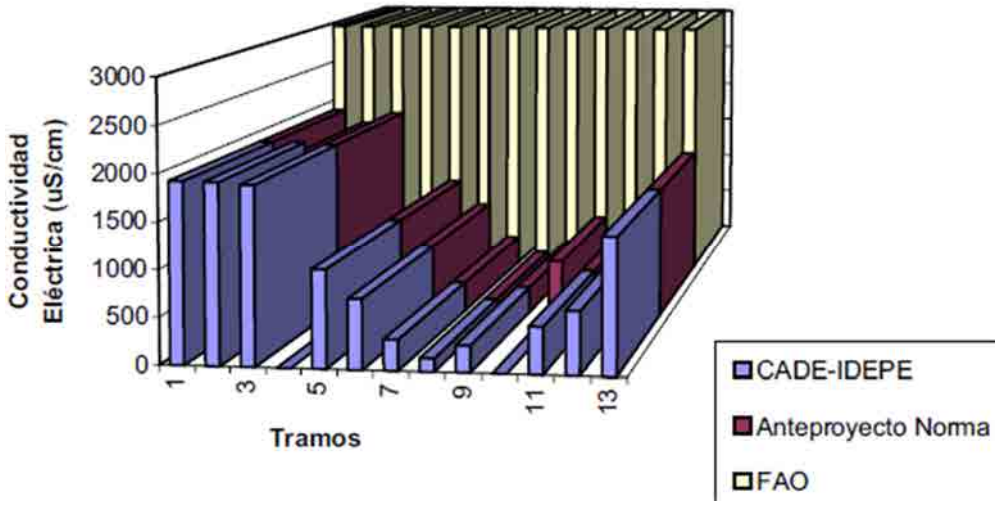


Figura 6-6. Valores del parámetro Conductividad eléctrica según datos de CADE-IDEPE, Anteproyecto de Norma y FAO. Fuente: CADE-IDEPE, 2005.

De los 61 parámetros que contiene el Anteproyecto de Norma, la Dirección Regional del SAG IV Región, centro su análisis en 18 de ellos. Como conclusión, el impacto económico neto del Anteproyecto de Norma Secundaria de Calidad de Agua (2005) en la cuenca del río Elqui es positivo, generando beneficios que oscilan entre los $394.000 a $2.272.000. El principal beneficio del Anteproyecto de Norma Secundaria de Calidad de Agua (2005) en la cuenca del río Elqui se refiere a la preservación de los suelos (preservación de su potencial productivo) y por ende a la preservación del valor comercial de ellos.

8. *DGA-DICTUC. Evaluación de la explotación máxima sustentable del acuífero del valle del Elqui. S.D.T. Nº 228. 2006.*

Este estudio presenta una evaluación de los recursos hídricos del acuífero del río Elqui y su comparación para diferentes escenarios de extracción. El objetivo específico fue completar aquellas zonas que en el estudio SDT 161, realizado por la DGA, quedaron abiertas. Se analizaron escenarios de máxima demanda previsible bajo la restricción de ciertos criterios que permiten el rendimiento sustentable de los acuíferos. Entre estas restricciones se tiene que los descensos en el acuífero sean sustentables en el tiempo, que la demanda sea satisfecha, que no se afecten recursos hídricos superficiales comprometidos y que no se afecta otros sistemas acuíferos cerrados. Existen diferencias entre los resultados obtenidos respecto el Informe S.D.T. N° 161, en este caso el río Elqui en su cabecera tiene una caudal superficial en régimen natural de **307,3 L/s**. En la **Figura 6-7** se muestra diversos mapas de interés generados durante el estudio.

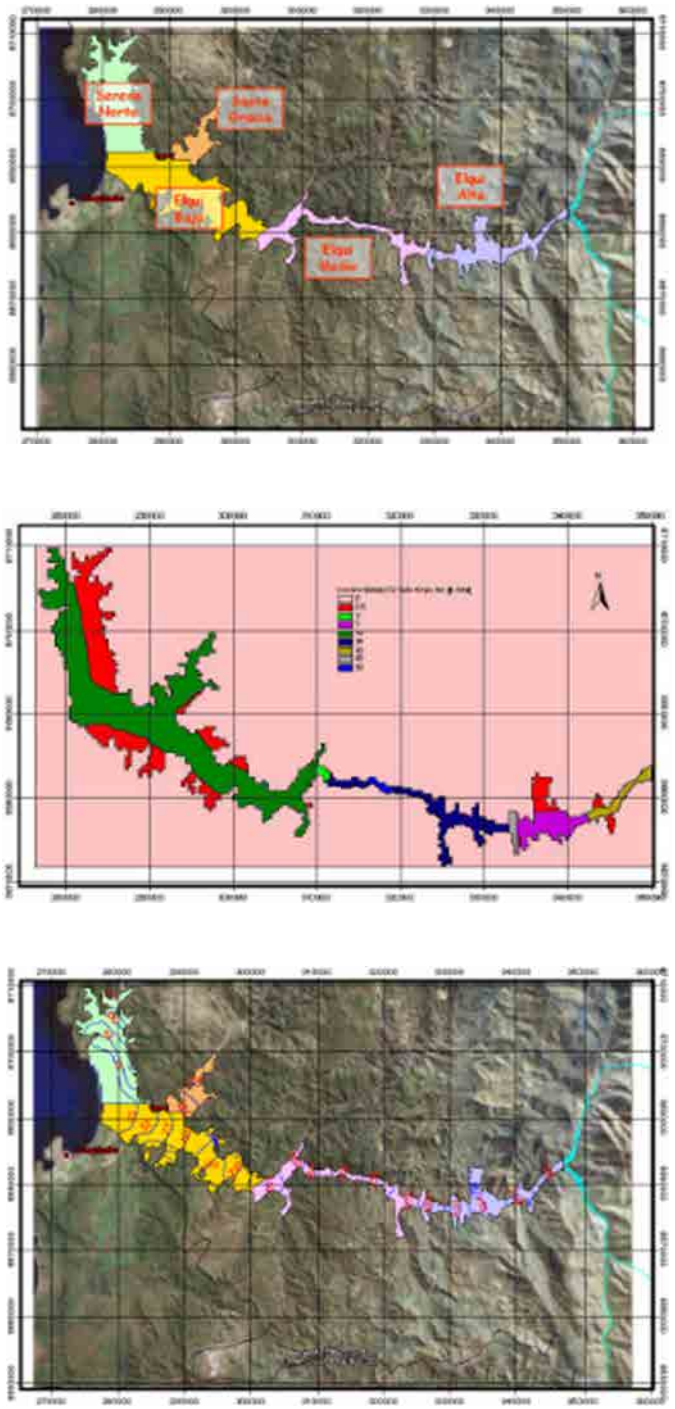


Figura 6-7. Mapa de ubicación, distribución de conductividades hidráulicas y mapa piezométrico generados durante el proyecto.

9. CAZALAC-RODHOS. Aplicación de Metodologías para determinar la eficiencia de uso del agua, estudio de caso en la región de Coquimbo, 2006.

Este trabajo fue elaborado por CAZALAC (Centro del Agua para Zonas Áridas de Latinoamérica y El Caribe) con la asesoría de RODHOS Asesorías y Proyectos Ltda., bajo la inspección de la Dirección Regional de Aguas del Ministerio de Obras Públicas, para el Gobierno Regional de la IV Región de Coquimbo.

El objetivo principal de este estudio fue hacer un diagnóstico del uso efectivo del recurso hídrico, investigando las técnicas actuales de utilización, aprovechamiento y eficiencia en las tres cuencas principales de la IV Región de Coquimbo: Elqui, Limarí y Choapa, y a partir de ello elaborar propuestas específicas que apunten a la mejor utilización del agua y a formular recomendaciones que orienten a los usuarios en la toma de decisiones debidamente informados en materia de recursos hídricos.

Dada la magnitud del estudio, se identificaron diferentes tipos de eficiencia: física, económica, ambiental y administrativa. Se identificaron los usos de agua de la cuenca: agricultura, agua potable, minería e industria.

En este estudio se aplicó un modelo de simulación integrado superficial-subterráneo (modelo MAGIC), para caracterizar la situación actual del uso del agua, evaluación y recomendaciones técnicas y económicas viables.

El modelo MAGIC se configura en base a tres elementos constitutivos: tramo de los cauces definidos por nodos, tramos acuíferos y zonas de riego. A los cauces se asociaron los correspondientes elementos operativos con todas sus características constitutivas y de operación, que son los canales, embalses y centrales hidroeléctricas, a los acuíferos se asociaron los pozos. A cada elemento se le asocian también sus propiedades características, como permeabilidades para cauces y acuíferos, coeficiente de almacenamiento y volumen máximo para los acuíferos, capacidades para los embalses, y los datos que configuran la demanda. En las zonas de riego, los datos que configuran la demanda son los cultivos, los métodos de riego, los coeficientes de derrame y percolación, la evapotranspiración y las lluvias efectivas. De este modo, en la cuenca del Elqui el modelo configurado quedó compuesto por 19 nodos, 12 sectores de riego y 12 sectores de acuíferos.

La demanda de agua se concentra principalmente en el uso agrícola, que representa un 82% de la demanda total. La oferta hídrica, por su parte, se estimó en base a un estudio

hidrológico por subcuenca aportante, para todas las cuencas que quedan determinadas por los nodos de la modelación. La base del análisis la proveen las subcuencas con medición de caudal en estaciones fluviométricas. Las demás subcuencas se generaron caudales en forma sintética, con ayuda de modelos de generación de escorrentía pluvial, nival o mixta.

La definición de los nodos para la modelación determina cada una de las subcuencas aportantes del sistema. En base a la escorrentía que se mide en las subcuencas controladas, ya sean nivales o pluviales, se hace una estimación de los aportes de todas las demás subcuencas. Los caudales de las cuencas que generan los aportes más importantes están todos controlados. Así, se generaron caudales medios mensuales en las subcuencas pluviales no controladas.

Para generar los caudales de las cuencas nivales, se utilizó el modelo nival de transposiciones basadas en el área ponderada y la altura, desde estaciones aledañas en régimen natural.

En la **Tabla 6-2** se indican las subcuencas para las que se generó los caudales en base al procedimiento descrito, y las estaciones que se tomaron de base para tal generación. En la **Figura 6-8** se presenta la definición de las cuencas aportantes dentro de la cuenca Elqui.

Código	Identificación cuenca	Estación fluviométrica asociada
AN-01	Río La Laguna Cabecera	Río La Laguna en entrada Embalse La Laguna (JV)
AN-02	Río Toro Cabecera	Río Toro antes junta La Laguna
AN-03	Río Incahuaz	Río Turbio en Varillar RN
AN-04	Estero Derecho Cabecera	Estero Derecho en Alcohuaz
AN-05	Río Cochiguaz Cabecera	Río Cochiguaz en El Peñón
AN-06	Quebrada Paihuano	Río Cochiguaz en El Peñón
AN-07a	Quebrada de Marquesa	Estero Derecho en Alcohuaz
CL-01	Río La Laguna Entre Embalse La Laguna y Junta Río Toro	Río Turbio en Varillar RN
CL-02	Río Turbio entre Río Toro y Río Incahuaz	Río Turbio en Varillar RN
CL-03	Río Turbio entre Río Incahuaz y Huanta	Río Turbio en Varillar RN
CL-04	Río Turbio zonas de riego	Río Turbio en Varillar RN
CL-05	Estero Derecho zonas de riego	Estero Derecho en Alcahuaz
CL-06	Río Cochiguaz zonas de riego	Río Cochiguaz en El Peñón

Tabla 6-2. Subcuencas con generación de caudal en base a modelo nival. Fuente: CAZALAC-RODHOS, 2006.

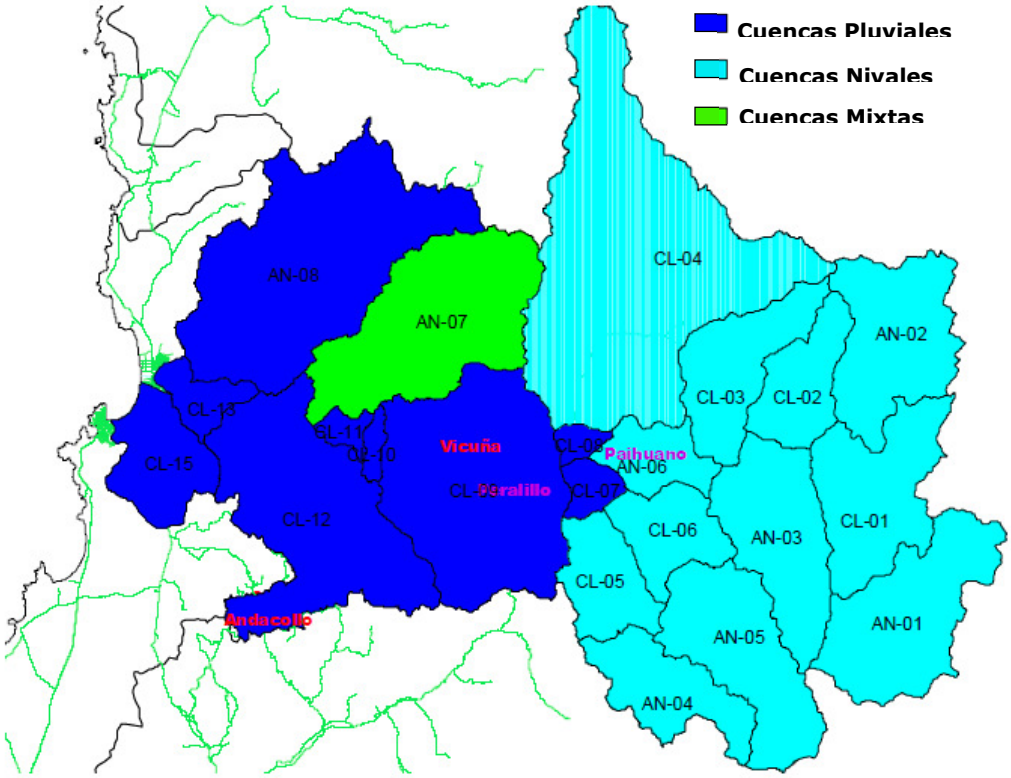


Figura 6-8. Subcuencas aportantes. Fuente: CAZALAC-RODHOS, 2006.

En relación a las **aguas subterráneas**, los límites de los acuíferos se trazaron definiendo el contacto roca-relleno en función de lo identificado en la imagen satelital de alta resolución. Se suavizaron los contornos para asegurar que los rellenos definidos correspondieran a estratos acuíferos relevantes. Los acuíferos definidos para el modelo se muestran en la **Figura 6-9**. La calibración se realizó desde 1999 (comenzó a funcionar el embalse Puclaro) hasta abril del 2004. Los parámetros finales de calibración, espesor saturado, conductividad hidráulica y coeficiente de almacenamiento, son los que se presentan en la **Figura 6-2.**

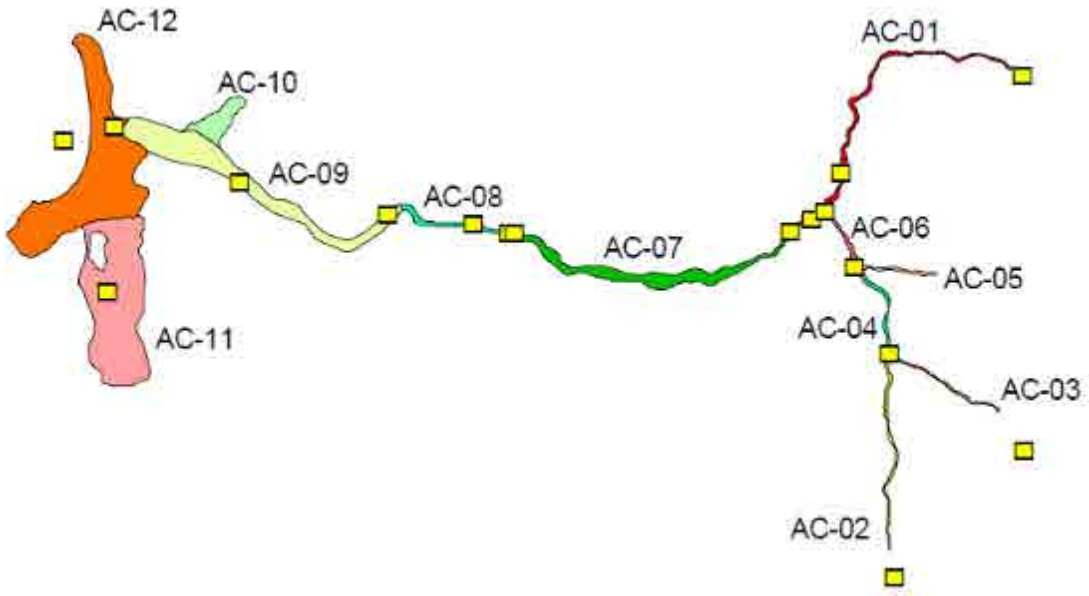


Figura 6-9. Acuíferos definidos para la modelación. Fuente: CAZALAC-RODHOS, 2006.

Como resultado de la calibración del modelo de simulación se muestra un diagnóstico de la cuenca en los siguientes términos:

- Grado de utilización: comparación entre las diferentes demandas que se obtienen para cada zona de riego.

- Interacción entre aguas superficiales y subterráneas: interacción entre cauces, canales, zonas de riego y acuíferos que conforman la disponibilidad total para la recarga de éstos.

- Comportamiento de los acuíferos: detalla todos los flujos a los que son sometidos cada uno de los acuíferos en el periodo de simulación. Un resultado de importancia son los bombeos de riego, resultantes de acuerdo con el déficit que deja la disponibilidad de aguas superficiales, y los bombeos para otros usos, los cuales son impuestos.

Código del acuif	Nombre del acuífero	Volumen inicial de simulación (m3)	S (adimensional)	Espesor sat secc entrada (m)	Espesor sat secc salida (m)	Perm. Entrada ke (m/mes)	Perm. Salida ks (m/mes	Grad entrada ie (º/1)	Grad salida is (º/1)	Q inicial de entrada (m3/s)	Q inicial de salida (m3/s)
AC-01	Turbio	5.430.000	0,020	40	60		1400	0,015	0,015	0,000	0,088
AC-02	Derecho	890.000	0,010	40	40	156	311	0,038	0,038	0,000	0,017
AC-03	Cochiguaz	410.000	0,010	40	40	117	311	0,039	0,039	0,000	0,014
AC-04	Claro Monte Grande	990.000	0,015	62	40	311	596	0,039	0,029	0,049	0,077
AC-06	Claro Paihuano	1.510.000	0,020	40	60	596	1400	0,029	0,015	0,077	0,134
AC-07	Elqui Alto	38.100.000	0,065	61	40	1400	1000	0,015	0,008	0,089	0,035
AC-08	Elqui Medio	9.760.000	0,100	40	120	1000	800	0,008	0,014	0,035	0,143
AC-09	Elqui Bajo	141.100.000	0,100	120	80	800	1011	0,014	0,009	0,143	0,351
AC-10	Santa Gracia	8.900.000	0,030	26	30	150	100	0,018	0,009	0,000	0,130
AC-11	Pan de Azúcar	188.400.000	0,050	300	100	500	500	0,002	0,002	0,010	0,077
AC-12	Costa	57.560.000	0,050	158	60	500	200	0,006	0,006	0,640	0,333

Tabla 6-3. Caracterización acuíferos Elqui. Fuente: CAZALAC-RODHOS, 2006.

- Seguridad de riego: se entregan porcentajes de satisfacción de la demanda de riego por zona.

- Flujos de retorno: se indican los caudales efluentes de las zonas de riego, los cuales vuelven al río y una parte actúa como percolación que alimenta los acuíferos.

- Análisis de las salidas al mar: se muestra el flujo de salida de la cuenca en todas sus componentes.

10. CABEZAS R., CEPEDA J., BODINI A.; Descripción Cartográfica de la Hoya Hidrográfica del río Elqui (Región de Coquimbo, Chile). Universidad de La Serena, La Serena, Chile. ISBN 956 7393 249, 2007.

El estudio realiza una descripción general de las principales características biofísicas de la cuenca hidrográfica del río Elqui. La cuenca del río Elqui tiene una superficie de 9.794 Km2 y está ubicada en la región septentrional de la IV Región de Chile (29° 02’ a 32° 16’ S; 69° 45’a 71° 40’ O). El río Elqui tiene una longitud de unos 170 Km y fluye desde los Andes al océano Pacífico. Sus tributarios principales en los Andes son los ríos Claro y Turbio; éstos aportan agua desde el norte, el sur y el este del territorio chileno.

El estudio presenta varios mapas y planos, que muestran los modelos digitales de elevación, pendiente y exposición solar. Dentro de los mapas se encuentran: Centros Poblados, Topográfico, y Geológico. También se presentan el Litológico, Geomorfológico, Formaciones Vegetales, Hidrográfico, Climático y de precipitaciones anuales y mensuales, entre otros. La escala en que se presenta la información es 1:550.000.

En el **Mapa Geológico (Figura 6-10**), la geología del área está representada por el predominio de rocas fundamentales pre-terciarias sobre sedimentos terciarios y cuaternarios, los cuales se ubican en las zonas llanas, por debajo de los 200 msnm y en los sectores depresionales entre macizos rocosos a cotas superiores a la indicada (Mpodozis & Cornejo, 1988). Se reconocen las siguientes unidades:

- Franja litoral. Está representada principalmente por grandes arenales consolidados y sitios de humedales, muchos de los cuales han sido drenados para permitir la construcción de caminos, viviendas y grandes complejos turísticos. La sección está permanentemente expuesta al viento y al oleaje, quedando sujeta a la acción del mar durante temporales intensos y tsunamis (Thomas, 1967). El valle está formado casi exclusivamente por gravas, arenas, ripios aluviales aterrazados con origen en el Terciario Superior y Cuaternario (Moscoso *et al.*, 1982).

- La Media Montaña. Está constituida por numerosos plutones, principalmente grano-dioríticos y graníticos. Se encuentran las siguientes formaciones:

> Gravas de Atacama: *constituyen gravas, conglomerados, ripios y areniscas poco consolidadas (Mioceno-Pleistoceno).*
>
> Grupo Bandurrias: *corresponden a andesitas porfíricas, brechas volcánicas, tobas con intercalaciones sedimentarias o marinas (principalmente Neocomiano, Titoniano-Aptiano; (volcánico, marino; 2.000-4.000 m).*

- La Alta Montaña. Está constituida en parte por rocas mesozoicas y por rocas eruptivas paleozoicas. Según Thomas (1967), en el área de estudio se encuentran las siguientes formaciones:

> Formación Los Elquinos: *(continental; 3.500 msnm) predominantemente volcánica andesítica, con intercalaciones de lavas riolíticas y rocas sedimentarias (Paleógeno).*
>
> Formación Algarrobal: *(continental; 400-1.540 msnm) andesitas con intercalaciones sedimentarias, clásticas (Jurásico Superior).*

Formación Matahuaico: *(continental; 1.400 msnm) volcánica, riolítica, con intercalaciones sedimentarias clásticas (Pérmico-Triásico).*

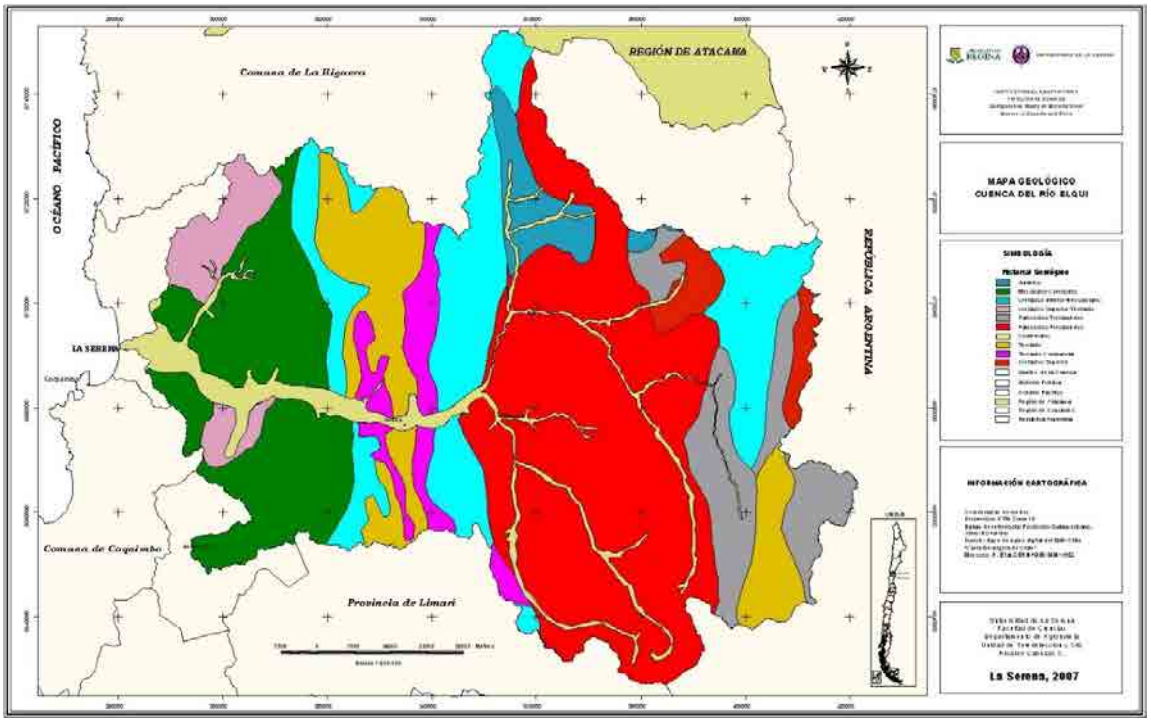


Figura 6-10. Mapa Geológico de la Cuenca del río Elqui. Fuente: Cabezas *et al.*, 2007.

En el **Mapa Litológico (Figura 6-11**) se muestra al núcleo de la alta cordillera conformado por un gran batolito de rocas graníticas de edad cretácico-terciaria. Al sur de los 30° 20' S, aproximadamente, este batolito granítico se halla marginado por rocas sedimentarias, principalmente marinas, de edad jurásica-cretácica, las que en parte aparecen aún como remanentes constitutivos de algunas cumbres y macizos en el sector central del batolito. Al norte de la latitud mencionada, el esquema geológico se complica con la presencia de intrusivos graníticos y rocas metamórficas de edad paleozoica, así como por la presencia de formaciones sedimentario-volcánicas de edades jurásica y cretácica, además de pequeñas áreas de vulcanitas terciarias, como son el cordón de Doña Ana y el macizo del cerro Las Tórtolas.

Paralelamente con estas formas de erosión, y como producto de sus procesos genéticos, se han edificado una serie de formas deposicionales, así como otras de origen indirecto, contemporáneas y/o posteriores. Así se presentan formas de sedimentación glacial, tales como morrenas frontales, laterales y de fondo principalmente; sedimentos fluvio-glaciales,

en forma de terrazas de descarga y vapor de fondo de valle, conos de deyección, conos coluviales, lupas de deslizamiento por solifluxión, escombros de gravedad, etc.

- Zona Media-Alta de la Cuenca. Rocas Kiag de tipo intrusivas del Cretácico inferior alto-Cretácico superior bajo. Dioritas y monzodioritas de piroxeno y hornblenda, granodioritas, monzodioritas de hornblenda y biotita. Asociados a mineralización de Fe, Cu, Au; forma una franja con intercalaciones de espesor considerable.

- Zona Alta de la Cuenca. Rocas Ks2c de tipo Vulcano-Sedimentarias del Cretácico superior. Secuencias vulcano sedimentarias continentales: rocas epiclásticas y piroclásticas riolíticas, lavas andesíticas y traquíticas.

El Mapa Geomorfológico (**Figura 6-12**) ubica la cuenca en la región geomorfológica de las planicies litorales, las cuencas del sistema montañoso andino costero y los valles transversales, que se extiende desde el valle del río Copiapó, por el norte, hasta el río Aconcagua por el sur.

- Geomorfología de la Alta Montaña. El núcleo de la alta cordillera está conformado por un gran batolito de rocas graníticas de edad cretácico-terciaria. Al sur de los 30° 20' S, aproximadamente, este batolito granítico se halla marginado por rocas sedimentarias, principalmente marinas, de edad jurásica-cretácica, las que en parte aparecen aún como remanentes constitutivos de algunas cumbres y macizos en el sector central del batolito.

El cuadro morfológico de la Alta Montaña en la Región de Coquimbo es derivado de un sinnúmero de mecanismos propios de los sistemas de erosión glacial, periglacial, pluvio-fluvial y gravitacional. A partir de la topografía y relieve pre-cuaternario se desarrollaron, por diferentes procesos, una serie de formas, tanto de erosión como de acumulación.

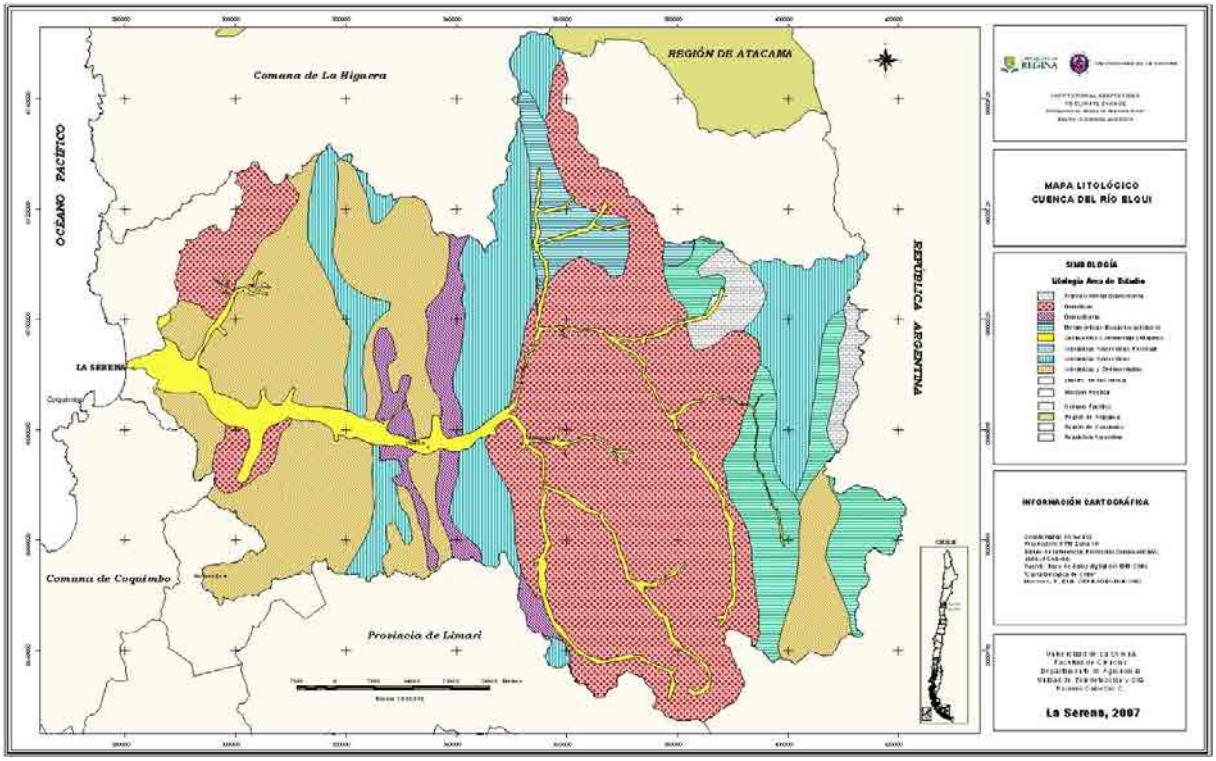


Figura 6-11. Mapa litológico de la cuenca del río Elqui. Fuente: Cabezas *et al.*, 2007.

La existencia normal de zonas de mayor debilidad que otras, frente a la acción erosiva glacial, condujo a la gestación de formas tales como circos y valles glaciales, caracterizados por lo escarpado de sus laderas y la presencia de frecuentes farellones rocosos. Estas formas, si bien las glaciaciones tuvieron un alcance modesto, sólo se conservan como tales en los sectores más elevados de la Alta Montaña, ya que los procesos del sistema periglacial han contribuido a suavizar las laderas a través de mecanismos de gelifracción, solifluxión y gravitacionales.

Es típica la existencia de laderas de pendiente rectilínea ("laderas regladas") y superficie clastolítica, cuya uniformidad es quebrada por la presencia de afloramientos rocosos, tanto residuales de media falda, como constituyentes de las líneas de cumbres.

Por otra parte, existen sectores en que topografías de tipo amesetado, planos inclinados y superficies onduladas, han evolucionado por rigolitización y meteorización de la roca in situ, generando una cubierta detrítica sobre un sustrato rocoso irregular. Paralelamente con estas formas de erosión, y como producto de sus procesos genéticos, se han edificado una

serie de formas deposicionales, así como otras de origen indirecto, contemporáneas y/o posteriores.

Así se presentan formas de sedimentación glacial, tales como morrenas frontales (laterales y de fondo, principalmente), sedimentos fluvio-glaciales (en forma de terrazas de descarga y vapor de fondo de valle), conos de deyección, conos coluviales, lupas de deslizamiento por solifluxión, escombros de gravedad y otros.

De norte a sur, la cuenca del río Elqui constituye el primero de los valles transversales de la región de Coquimbo. En términos generales los rasgos geomorfológicos de esta cuenca no difieren mucho a los de las cuencas de los ríos Limarí y Choapa, presentando una cuenca de sedimentación fluvial en su curso medio y bajo.

Desde la localidad de Rivadavia, donde se unen el Turbio con El Claro hasta su desembocadura, el río se presenta rodeado por cadenas de cerros de la costa, a tal punto que sólo en algunos sectores se establecen terrazas de sedimentación fluvial, las que son aprovechadas para la actividad agrícola y el asentamiento de pequeños poblados.

Las Planicies Litorales en esta cuenca se presentan con amplio desarrollo y su modelado penetra hacia el interior, formando franjas de hasta 10 kilómetros de ancho. Su altura varía entre el nivel del mar y 200 msnm.

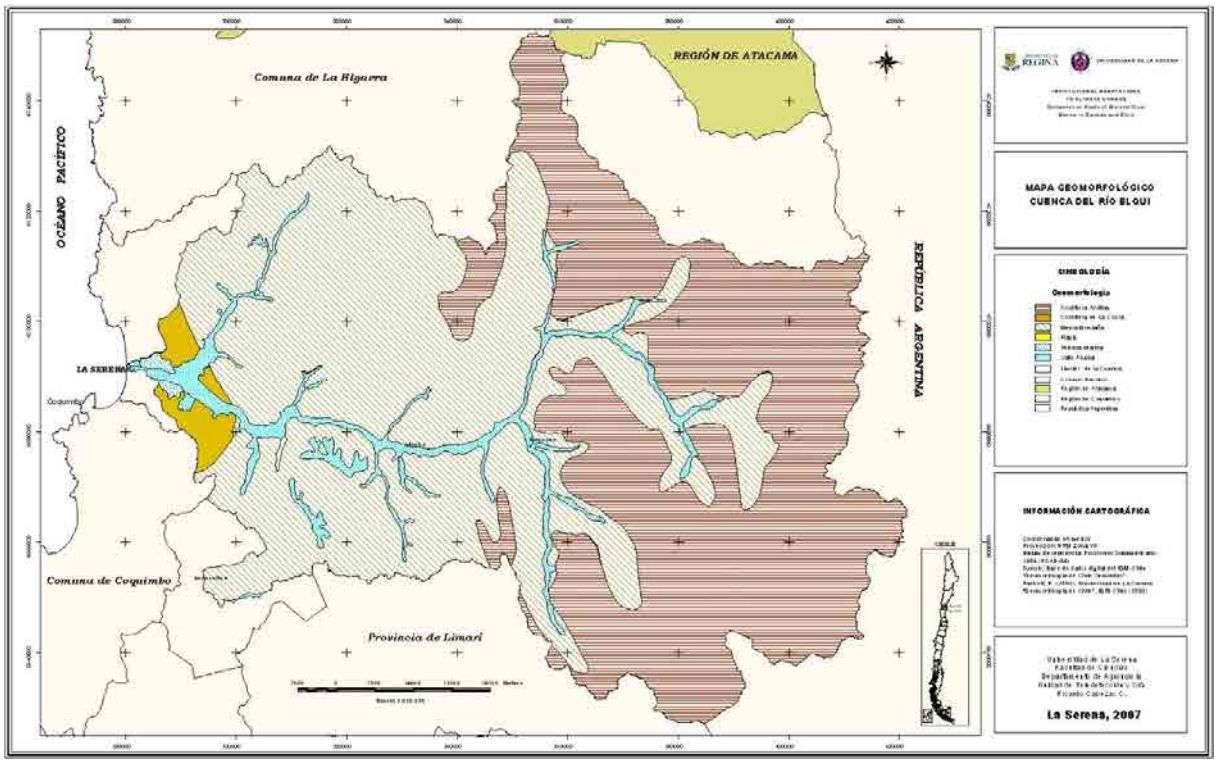


Figura 6-12. Mapa geomorfológico de la cuenca del río Elqui. Fuente: Cabezas *et al.*, 2007.

11.CEPEDA P., J.; CABEZAS C., R.; ROBLES I., M.; ZAVALA Z., H. Antecedentes generales de la cuenca del río Elqui, Región de Coquimbo, Chile. J. 2008.

Descripción geográfica general de la cuenca del río Elqui. Se describen los antecedentes fisio-geográficos (tipo de suelos, geología, geomorfología), el clima y la vegetación. Según la descripción geológica, en la zona alta de la cuenca encontramos la Formación Los Elquinos, una formación predominantemente volcánica andesítica, con intercalaciones de lavas riolíticas y rocas sedimentarias.

12. ***CENTRO DE AGRICULTURA Y MEDIO AMBIENTE y FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS. Análisis de Vulnerabilidad del sector silvoagropecuario, recursos hídricos y edáficos de Chile frente a escenarios de Cambio Climático. Anexos. Caracterización de las cuencas seleccionadas. Universidad de Chile, 2008.***

El objetivo de este estudio fue proveer la información necesaria para comprender los alcances del Cambio Climático, en términos de vulnerabilidad del sector silvoagropecuario.

Para este estudio se seleccionaron varias cuencas a nivel país y dentro de la región de Coquimbo, entre otras cuencas se estudió la del río Elqui en Algarrobal (área identificada en color amarillo en la **Figura 6-13**).

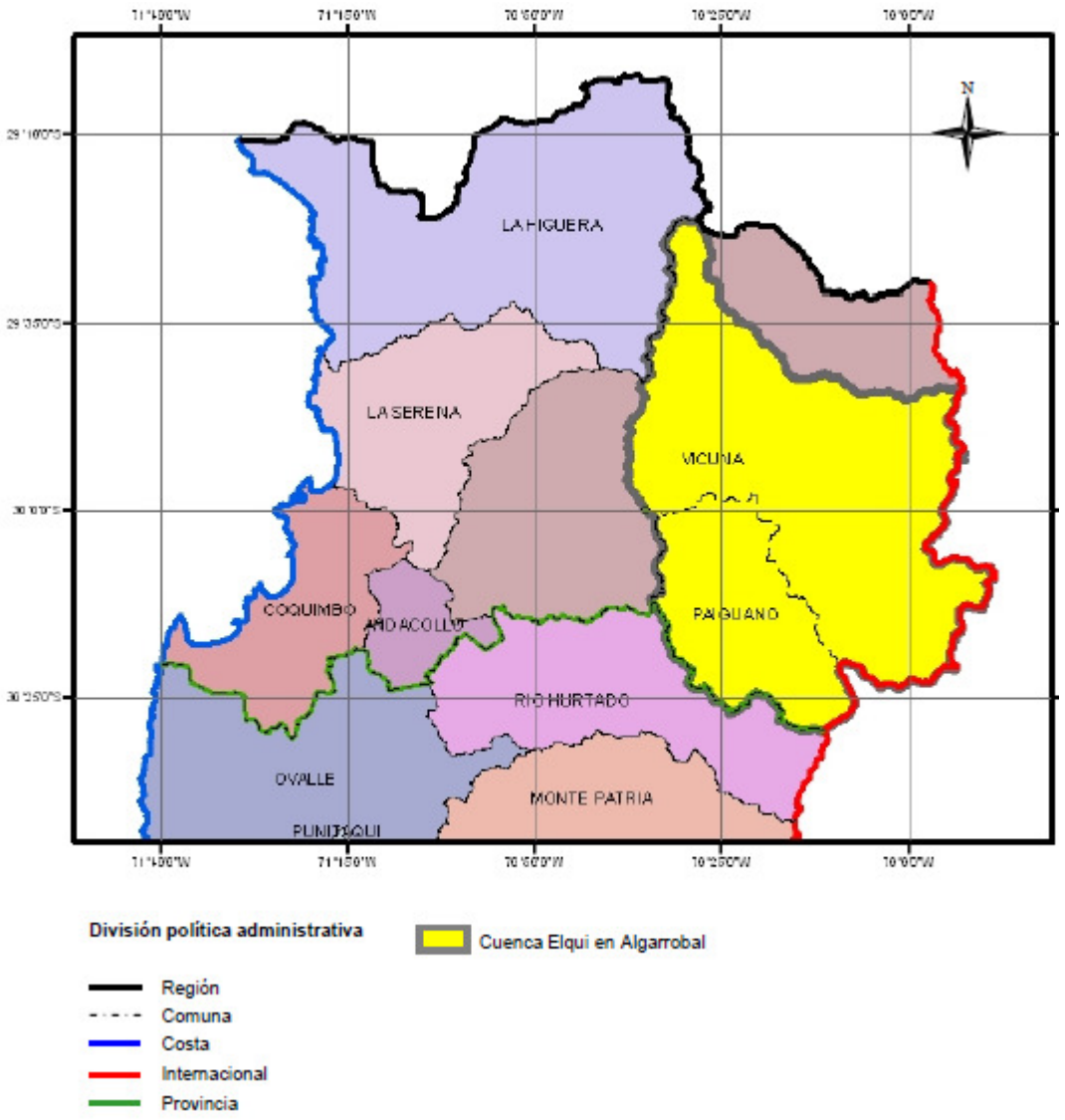


Figura 6-13.Ubicación cuenca río Elqui en Algarrobal. Fuente: Universidad de Chile, 2008.

Mediante el software WMS y un modelo digital de elevación (DEM) obtenido de la USGS, la cuenca fue delimitada y se determinó que el área drenante es 5.670 Km^2.

La cuenca del río Elqui en Algarrobal presenta dos acuíferos de impotancia, que escurren paralelos a los cauces (**Figura 6-14**). Estos acuíferos son río de La Laguna ubicado en la parte alta de la cuenca bajo el río La Laguna y el acuífero río Elqui que desarrolla principalmente bajo los ríos Turbio, río Cochiguaz y río Claro o Derecho.

El acuífero río Elqui tiene un coeficiente de almacenamiento de 0,04 y un espesor de 18 m, mientras que el acuífero del río La Laguna posee un coeficiente de almacenamiento 0,002 y un espesor de 9 m.

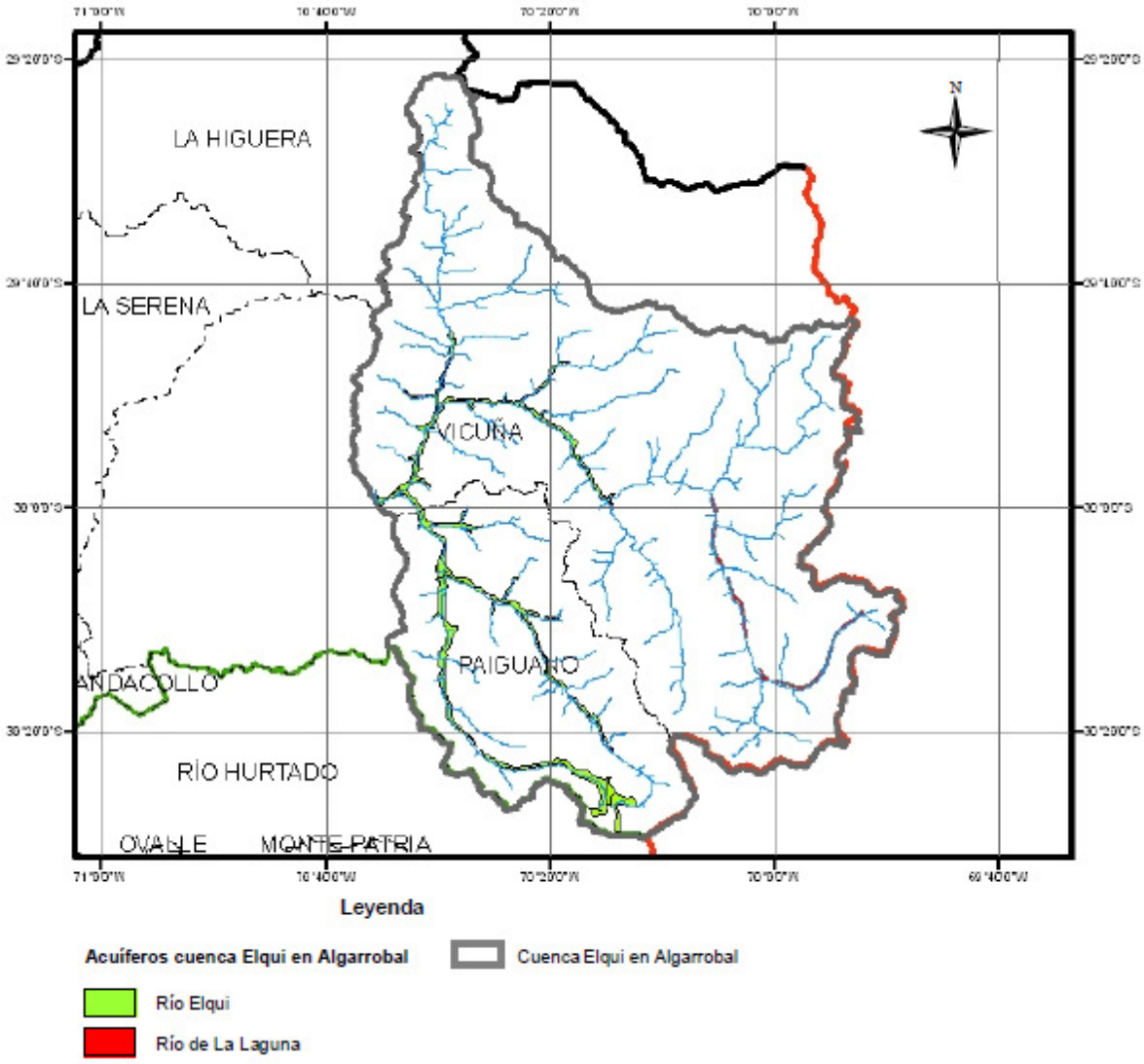


Figura 6-14. Acuíferos en el sistema. Fuente: Universidad de Chile, 2008.

La cuenca presenta un régimen nival, ya que sus mayores caudales son producto de aportes de derretimiento de nieve. En años húmedos los mayores caudales se presentan entre noviembre y enero, producto de los deshielos, mientras que los menores ocurren entre mayo y septiembre. En años secos los caudales se distribuyen de manera más homogénea, sin mostrar variaciones de consideración.

13.ZABALA Z., H; TRIGOS A., H; MUNIZAGA A., I; MALL R., E. Hidrología Cuenca Río Elqui, MCRI Project: Institutional Adaptations to Climate Change, 2008.

El informe tiene como objetivos detallar los antecedentes hidrológicos de la cuenca del río Elqui y servir de base para el desarrollo de las siguientes fases en la línea hidrológica del proyecto conjunto U. Regina - U.L.S.

El estudio primeramente describe la cuenca hidrográfica del río Elqui, donde identifican las estaciones hidro-meteorológicas. Esta cuenca se ubica entre los paralelos 29°35´ y 30°20´ de latitud sur, con una superficie aproximada de 9.800 Km^2. En la **Figura 6-15** se puede observar la cuenca del río Elqui, sus principales río y los cuerpos de agua embalsada.

Los principales tributarios del río Elqui son los ríos Turbio y Claro. La subcuenca del río Turbio tiene una superficie de 4.196 Km^2, dentro de la que se encuentra un único glaciar (glaciar Tapado), además del embalse La Laguna, que tiene una capacidad de 40 millones de m3. La subcuenca del río Claro, por su parte, tiene un área de 1.523 Km^2 (**Figura 6-15**).

Este estudio aborda el régimen de precipitaciones de la cuenca y entrega un listado de las estaciones de precipitación (líquida y sólida), un catastro de captaciones y medición de niveles, la longitud de registros y los instrumentos en operación actual e histórica. También se describen las estaciones fluviométricas y se entrega información relativa a los caudales mensuales observados como en régimen natural.

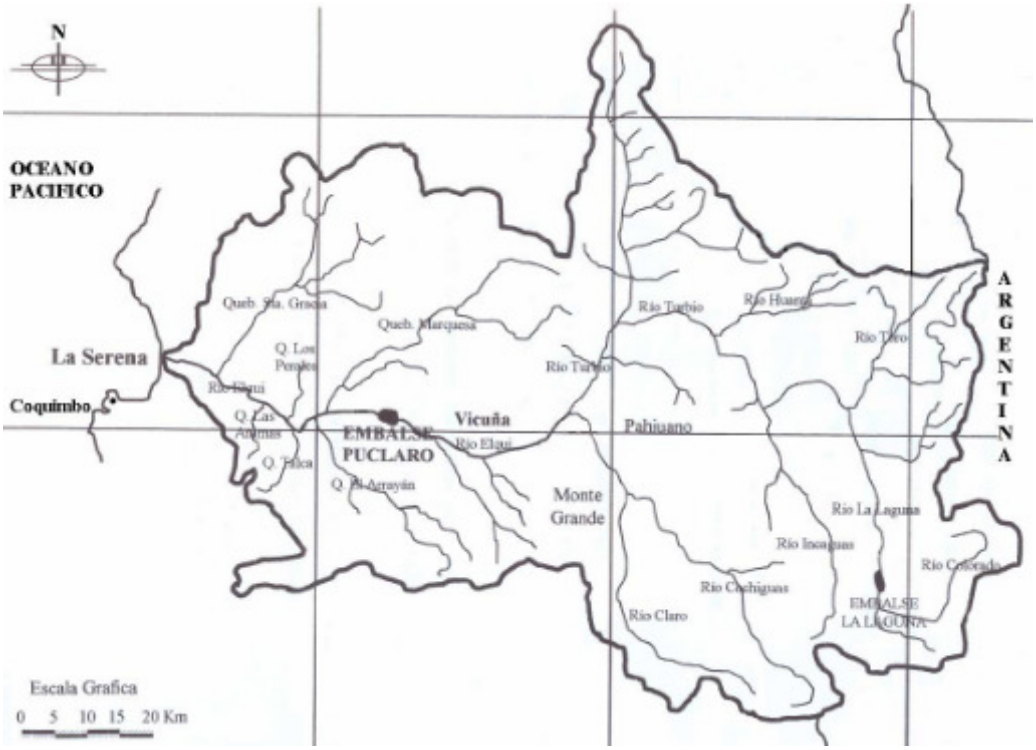


Figura 6-15. Cuenca del río Elqui. Fuente: Zabala et al., 2008.

En la cuenca del río Elqui sólo se encuentra el **glaciar Tapado** (**Figura 6-16**) (Rivera *et al*., 2000), ubicado en la parte alta de la subcuenca del río La Laguna, con coordenadas 30°08´S, 69°55''W, con una superficie de 3,6 Km^2.

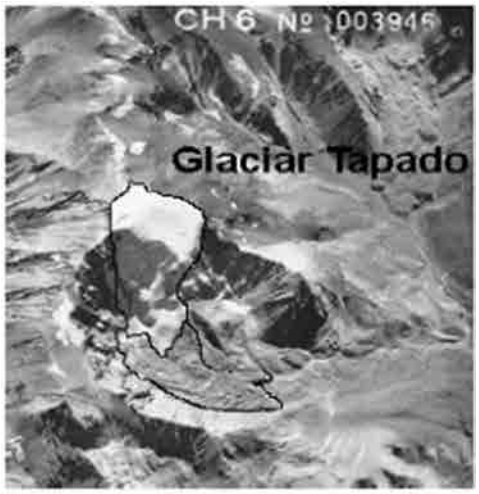


Figura 6-16. Foto Aérea del Glaciar Tapado. Fuente: Zabala et al., 2008.

Tomando la referencia de SERNAGEOMIN (2002), todos los cauces se encuentran sobre formaciones geológicas constituidas por depósitos no consolidados y rellenos de depósitos fluviales. Los alrededores de los cauces presentan una amplia variedad de formaciones geológicas.

Según el mapa hidrogeológico (DGA) de la **Figura 6-17**, en la parte alta la permeabilidad es muy baja debido a la existencia de rocas metamórficas y sedimentarias, volcánicas y plutónicas e hipabisales del Paleozoico, motivo por el cual el escurrimiento subterráneo es paralelo a los cauces.

Destacan tres escurrimientos, uno en dirección E-SW, paralelo al río Turbio, hasta el poblado de Rivadavia, con profundidad promedio de 45 m y productividad de 50 $m^3/h/m$. Este acuífero escurre a través de rocas de permeabilidad muy baja.

El segundo escurrimiento es en dirección sur a norte por el lecho de rocas Plutónicas, paralelas al río Claro hasta la confluencia con el Turbio en Rivadavia.

El tercer escurrimiento se da desde Rivadavia hasta la desembocadura en La Serena. El acuífero escurre en dirección EW, por depósitos no consolidados o rellenos con profundidad del agua entre 17 y 3 m, encajonados por rocas sedimentario-volcánicas de muy baja productividad. Los valores de transmisividad son entre 100 y 4.200 m^2/día, con valor medio de 500 m^2/día (**Figura 6-17**).

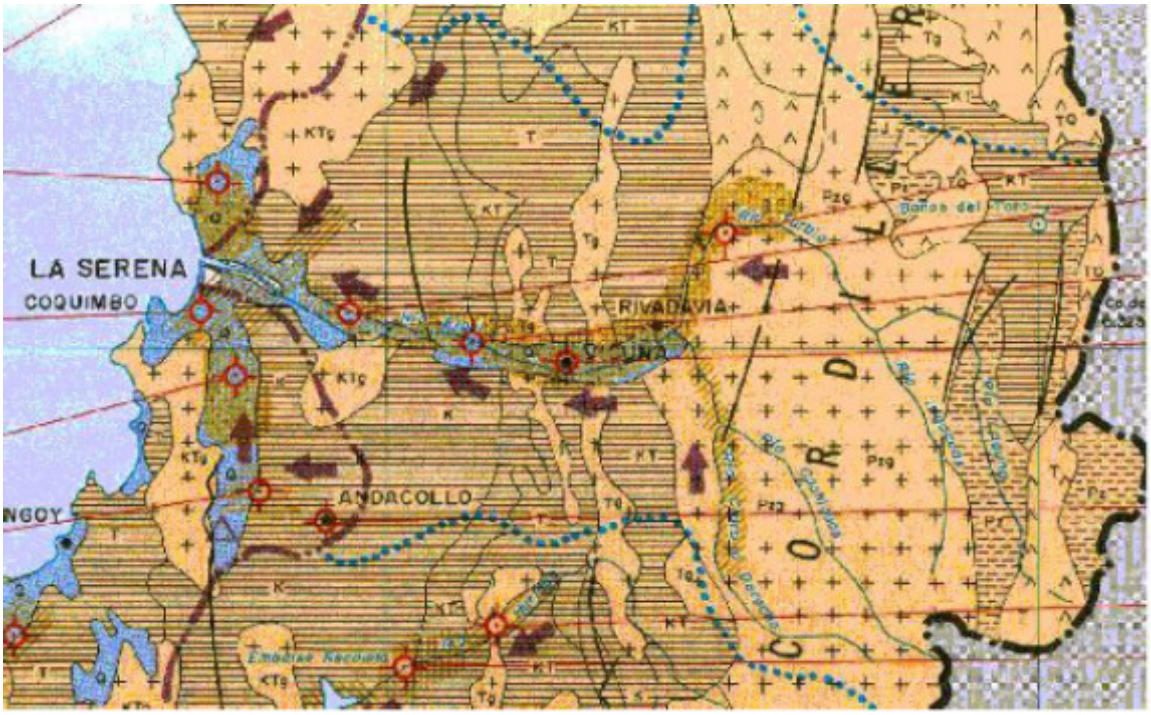


Figura 6-17. Mapa hidrogeológico de Chile DGA. Fuente: Zabala et al., 2008.

14. NOVOA J., J. Cambio climático del ecosistema semiárido transicional en Chile (IV Región de Coquimbo), mediante análisis de tendencia de caudales naturales. Tesis de Doctorado en Geografía. Universidad Nacional de Cuyo. 2008.

En este informe, el autor aborda la problemática asociada al cambio climático global a partir de un análisis de los datos meteorológicos en la zona. Utilizando los datos de las estaciones meteorológicas de la DGA, define cual es la determinación de las tendencias de los caudales reales con que se contará para la planificación del desarrollo rural y urbano futuro.

A partir de una visualización de terreno y con el apoyo de estadísticas oficiales de caudales, registradas entre los años 1950 y 1990, se determinaron las siguientes tendencias de los caudales naturales por regresión lineal: medios anuales, medios mensuales, máximos medios mensuales, mínimos medios mensuales y, medios. Para cada uno de los cuales se estima su tendencia positiva, negativa o en equilibrio.

El análisis en la cuenca del río Elqui se ha realizado en los puntos río Elqui en Almendral, río Elqui en Algarrobal, río Claro en Rivadavia, río Turbio en Varillar y río La Laguna en salida Embalse La Laguna.

En todos ellos, se cumple que los caudales máximos se observan durante los meses estivales (Noviembre-Diciembre) mientras los caudales permanecen relativamente estables durante el resto del año, permitiendo un régimen invernal para los caudales mínimos medios mensuales. Las tendencias tanto mensuales como anuales muestran un incremento del caudal en el tiempo.

Como conclusión, la tendencia positiva de los caudales prevé un incremento de los recursos hídricos. Como último punto afirma que las repercusiones económicas de esta tendencia de cambio climático, permiten confirmar la capacidad de abastecimiento de los recursos hídricos necesarios para su desarrollo, al menos hasta el año 2017.

15. CASTILLO, P. Geoquímica de sedimentos y relaves en la cuenca del río Elqui, Región de Coquimbo, Chile. Memoria para optar a título de Ingeniero Civil Ambiental. Universidad de La Serena. 2009.

Esta memoria se enmarca dentro del proyecto CAMINAR (Catchment Management and Mining Impacts in Arid and Semi-Arid South America). Forma parte del mismo proyecto que el informe de Lafuente. 2011, no obstante este informe se ha realizado en base a dos campañas de terreno realizadas en Octubre 2007 y Mayo 2008 y el informe de Lafuente. 2011 se realizó en base a la campaña realizada en Diciembre de 2008.

Los objetivos específicos de este estudio son determinar posibles relaciones de transferencia de metales entre los relaves y los sedimentos activos y de cauces secos; determinar la relación entre los contenidos de metales pesados del agua y de los sedimentos activos en contacto con ella; determinar factores naturales y antrópicos responsables de las concentraciones detectadas y establecer relaciones causales entre factores naturales y antrópicos en los sectores más afectados por elevados contenidos metálicos.

Durante las campañas de Octubre 2007 y Mayo 2008 realizaron muestreos y análisis de sedimentos activos (SAC), sedimentos de quebradas secas o sedimentos no activos (SNA) y relaves (REL). A partir de los resultados obtenidos llegaron a la conclusión que las concentraciones en sedimentos activos de Cu, Zn y As eran altas, en especial en los

tributarios andinos y en el río Elqui, aguas arriba del embalse Puclaro, debido mayoritariamente al efecto de la zona de alteración hidrotermal asociada al Distrito de El Indio y las actividades mineras en cabecera de la cuenca. En la parte baja del río Elqui, aguas abajo del embalse Puclaro, las concentraciones presentaban una tendencia decreciente, pero seguían siendo altas.

En la **Figura 6-18** se muestra la ubicación de las muestras de agua superficial y subterránea tomadas durante el proyecto.

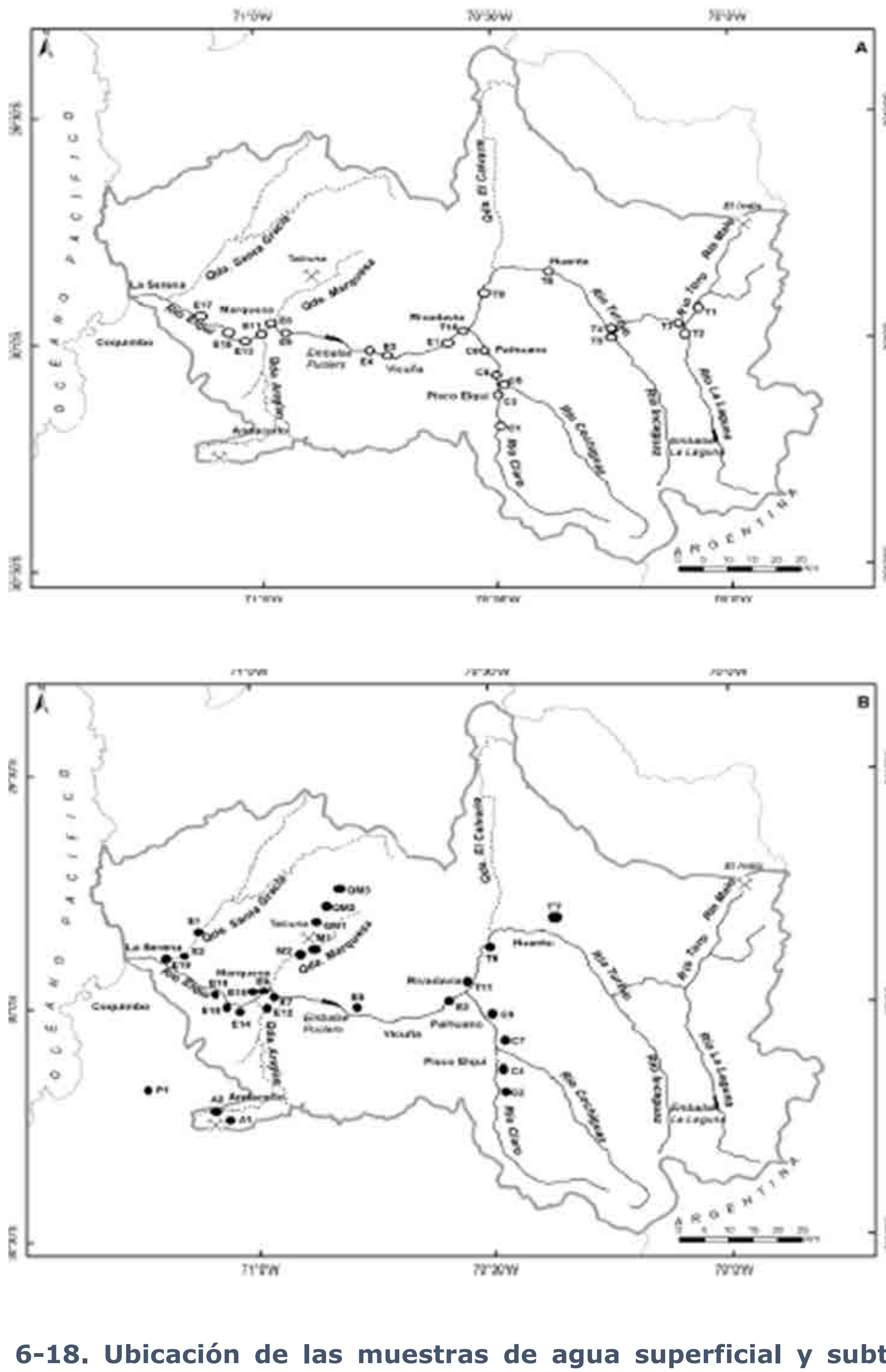


Figura 6-18. Ubicación de las muestras de agua superficial y subterránea tomadas durante el proyecto. Imagen A corresponde a muestras de agua superficial e imagen B a muestras de agua subterránea. Fuente: Castillo, 2009.

16. ***ROMERO FIGUEROA, C; Análisis de Embalse Subterráneo: Aplicación en Acuífero Subyacente al Río Elqui, IV Región de Coquimbo. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Ingeniería Civil. 2009***

El objetivo general de este estudio fue evaluar el efecto regulador del embalse subterráneo frente a mayores tasas de explotación del recurso hídrico en épocas de sequía hidrológica, considerando como aplicación la situación en el acuífero del Valle del Elqui.

Los objetivos específicos fueron calibrar el modelo de simulación hidrogeológico a nivel mensual, con información de un modelo hidrológico de simulación de balance integrando las componentes superficial y subterránea. También se pretendió evaluar el comportamiento del acuífero en distintos escenarios de operación y además determinar las tasas de recuperación del volumen almacenado en un embalse subterráneo, una vez terminada la sequía hidrológica.

En la **Tabla 6-4** se muestra los usos del agua, según la demanda hídrica en la cuenca del río Elqui.

Tipo de uso	Demanda Consuntiva		Demanda de Captación	
	[m³/s]	[%]	[m³/s]	[%]
Agricultura	4,822	81,7	13,584	87,8
APU	0,250	4,2	0,831	5,4
APR	0,039	0,7	0,141	0,9
Minería	0,101	1,7	0,216	1,4
Industria	0,062	1,1	0,062	0,4
ET natural	0,630	10,7	0,630	4,1
Total	5,904	100	15,464	100

Tabla 6-4 Demanda consuntiva y de captación. Fuente: Romero, 2009.

En la **Tabla 6-5** se muestra la caracterización de la demanda agrícola, donde se destaca que el área tecnificada aguas arriba del embalse Puclaro es del 63%.

Superficie agrícola [ha]	23.440
Sin / sobre embalse Puclaro	2.030 (9%)
Bajo embalse Puclaro	17.703 (76%)
Bajo embalses Puclaro y La Laguna	21.410 (91%)
Cultivos predominantes	hort/chac 62 %
	frut/vid 31 %
Área tecnificada	31%
Sobre embalse Puclaro	63%
Bajo embalse Puclaro	21%

Tabla 6-5 Caracterización de la demanda agrícola actual. Fuente: Romero, 2009.

La **geología** de la hoya hidrográfica está representada por el predominio de rocas fundamentales pre-terciarias, sobre sedimentos terciarios y cuaternarios, los cuales se ubican en las zonas llanas, por debajo de los 200 msnm y en los sectores depresionales, entre macizos rocosos a cotas superiores a la indicada (Mpodozis y Cornejo, 1988) (**Figura 6-19**).

Para la zona de estudio se reconocen unidades en la media montaña y alta montaña. La media montaña está constituida por numerosos plutones, principalmente granodioríticos y graníticos. Se encuentran las siguientes formaciones:

- Gravas de Atacama: constituyen gravas, conglomerados, ripios y areniscas poco consolidadas (Mioceno-Pleistoceno).

- Grupo Bandurrias: corresponden a andesitas porfíricas, brechas volcánicas, tobas con intercalaciones sedimentarias o marinas (principalmente Neocomiano, Titoniano-Aptiano; (volcánico, marino; 2.000-4.000 m).

La alta montaña está constituida en parte por rocas mesozoicas y por rocas eruptivas paleozoicas. Según Thomas (1967), en el área de estudio se encuentran las siguientes formaciones:

- Formación Los Elquinos *(continental; 3.500 msnm): Predominantemente volcánica andesítica, con intercalaciones de lavas riolíticas y rocas sedimentarias (Paleógeno).*

- Formación Algarrobal *(continental; 400-1.540 msnm): Andesitas con intercalaciones sedimentarias, clásticas (Jurásico Superior).*

- Formación Matahuaico *(continental; 1.400 msnm): Volcánica, riolítica, con intercalaciones sedimentarias clásticas (Pérmico-Triásico).*

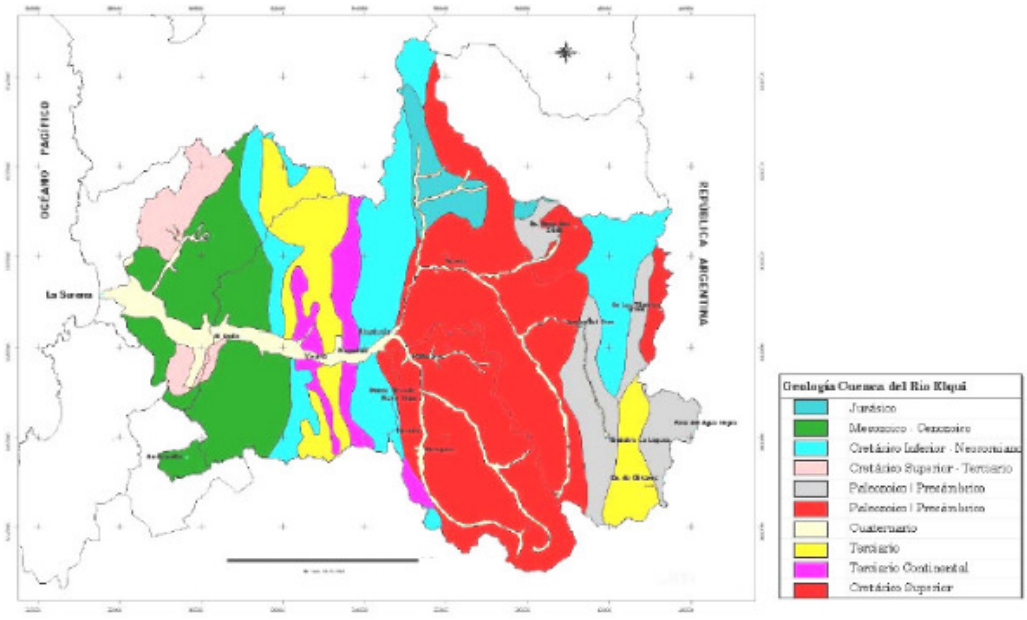


Figura 6-19. Mapa geológico de la Cuenca del río Elqui. Fuente: Cepeda *et.al.*, 2005.

La **hidrogeología** de este informe es un resumen extraído de la DGA (2003), los antecedentes lo constituyen principalmente el estudio del Valle de Elqui - Investigación del Agua Subterránea (CORFO, 1955).

Las **formaciones acuíferas** se reconocen en el relleno fluvial del río Elqui, que corresponde a una unidad hidrogeológica de buena permeabilidad, de origen aluvial, con predominio de materiales gruesos (gravas y arenas), con intercalación de estratos de arcillas y limos. Se identifican:

- Acuífero superior, de tipo libre, ubicado en los 10 primeros metros de relleno.

- Acuíferos más profundos de carácter libre, semiconfinado y confinado, que en algunos sectores se manifiestan como surgentes. Los rellenos constituyen acuíferos que se pueden separar en tres capas o niveles principales que no superan los 250 m de potencia.

El primer nivel corresponde a los primeros 15 m de profundidad, compuestos por depósitos de gravas con arenas, ripios y bolones con intercalación de sedimentos finos. Esos depósitos presentan baja compactación y buena a muy buena capacidad hídrica.

El segundo nivel, de espesor entre 30 m y 120 m compuesto por arenas con gravas, bolones y arcillas, con intercalación de lentes arcillosos.

El nivel más profundo, con espesores entre 30 m y 120 m. Este último estrato está representado por una sucesión de interdigitaciones de niveles arenosos con gravas y niveles arcillosos. Debido a la mayor compactación y a la menor granulometría, la capacidad hídrica de este último nivel es inferior a la del nivel superior. Bajo este nivel se dispone basamento rocoso.

En función de las variaciones granulométricas en los rellenos sedimentarios a lo largo del valle, los **coeficientes de permeabilidad y transmisividad** estimados presentan una variabilidad considerable. El coeficiente de permeabilidad varía entre 2 y 5 m/día hasta valores de 45 a 65 m/día, mientras que la transmisividad varía entre 130 m^2/día y 5.300 m^2/día. No obstante, estos valores pueden estar influenciados por el río, lo que podría explicar valores muy altos. Desde el punto de vista conceptual, se puede afirmar que la conductividad hidráulica del acuífero puede variar entre 1 y 60 m/día, aproximadamente (DGA, 2003). En cuanto al coeficiente de almacenamiento, se estima un valor del orden de 7% (CORFO, 1955).

Basado en estudios geofísicos para diversas secciones transversales del valle entre las localidades de Algarrobal y Algarrobito se calcula un volumen de material saturado de 5.200 millones de m^3, el que al considerar una porosidad efectiva promedio de 7% contiene un **volumen de agua** que ascendería a 364 millones de m^3, de los cuales 211 millones de m^3 se encuentran en sus primeros 50 m del relleno sedimentario (CORFO, 1955).

La **profundidad de la napa** no sobrepasa los 40 m en márgenes del acuífero, disminuyendo a 10 m en la vecindad del río, en algunas zonas hay conexión del acuífero con el río. El **sentido de escurrimiento** es de oeste a este, siguiendo el curso del río, con un **gradiente** promedio de napa subterránea desde Rivadavia a La Serena de 1%.

Uno de los principales estudios que sirvieron de apoyo para el desarrollo del trabajo fue "Valle del Elqui – Investigación del Agua Subterránea. Informe preparado para la CORFO por el Departamento del Interior de EE.UU. – Bureau of Reclamation, 1955". Su propósito fue evaluar el potencial de los acuíferos anidados en los rellenos que conforman los valles de Elqui y Lagunillas en la IV Región, para determinar la factibilidad técnica y económica de mejorar la irrigación del valle con recursos subterráneos.

La caracterización del acuífero se realizó sobre la base de la información recopilada y a partir de campañas de terreno. Los trabajos se realizaron a lo largo del valle del río Elqui, desde la confluencia de los ríos Turbio y Claro, hasta la desembocadura en el mar. Se perforaron sondajes exploratorios (12 pozos de bombeo), realizaron trabajos geofísicos (28 perfiles geofísicos transversales al valle), pruebas de infiltración y ensayos de bombeo. Además, se estableció una red de monitoreo del nivel de agua subterránea a lo largo del valle (22 pares de pozos, ubicados a ambos lados del río y cada 2 Km).

Como resultados generales, en el valle del río Elqui se identificó un relleno de origen aluvial, con litología de materiales gruesos (gravas a arenas), con intercalaciones de estratos con predominio de limos y arcillas. Desde Algarrobal hasta La Serena (Algarrobito), la profundidad del basamento no sobrepasa los 200 m. Se identifica un acuífero superior libre, en los primeros 10 m de relleno sedimentario, el que sobreyace a niveles más profundos de carácter libre, semiconfinado y confinado, siendo surgentes en ocasiones. Desde el nacimiento hasta la desembocadura, el nivel del agua es inferior a 20 m y disminuye hacia el eje del río a 10 m. El gradiente promedio de la napa subterránea entre Algarrobal y La Serena es de 1% y varia a lo largo entre 0,3% y 2%. La conductividad hidráulica es moderada, con valores del orden de 10 m/d o menos (**Figura 6-20**). Coeficiente de almacenamiento (corto plazo) menores a 0,001 (estimado) y porosidad efectiva entre 1 y 10%.

Sector	Sección Geofísica	Pozo	Prueba Nº	K [m/min]	K [m/día]	S [ ]	T [m²/min]	T [m²/día]	b [m]	Acuífero
Algarrobito	3	B3	1	0.018	25.9	0.0002	0.18	259	10	inferior
			2*	0.0033	4.7	0.0008	0.27	389	82	ambos
Altovalsol	4	B5'	1			0.0007	0.17	245		ambos
			2			0.002	0.13	187		ambos
			3*	0.0021	3	0.0083	0.24	346	114	ambos
Saturno	6	B7	1			0.0016	0.11	158		inferior
			2			0.0001	0.09	130		medio
			3			0.0007	0.16	230		superior
			4*	0.0015	2.2	0.0002	0.17	245	113	todos
	6'	B7'	1	0.0014	2	0.002**	0.18	259	129	ambos
Calera	11	C6	1	0.0029	4.2	0.001**	0.28	403	97	ambos
		C7'	1*	0.0019	2.7	0.001**	0.18	259	95	ambos
			2				0.17	245		ambos
Puclaro	18	B8	1			0.0005	3.7	5328		ambos
			2			0.0005	3.1	4464		ambos
			3*	0.045	64.8	0.0006	2.9	4176	64	ambos
Algarrobal	26'	B9	1	0.031	44.6	0.0017	1.76	2534	57	inferior
			2*	0.017	24.5	0.0007	1.98	2851	116	ambos

*Valor utilizado en estimaciones y cálculos
**Valor supuesto

Figura 6-20. Constantes elásticas del acuífero. Fuente: CORFO, 1955.

La **Figura 6-21** muestra la estimación del flujo subterráneo para ciertas secciones mostradas en la **Figura 6-22**, basada en datos ajustados de las pruebas de bombeo y niveles de los pozos de observaciones.

Sector	Sección	Permeabilidad Ajustada		Gradiente Hidráulico	Área Sección	Flujo Estimado	
	Geofísica	[m/min]	[m/día]	[%]	[m²]	[m³/min]	[m³/s]
Algarrobito	3	0.0017	2.4	0.64	226000	2.46	0.041
Altovalsol	4	0.0011	1.6	0.64	246000	1.73	0.029
Saturno	6	0.0008	1.2	1.27	145000	1.47	0.025
Calera	11	0.0015	2.2	0.86	67800	0.87	0.015
Puclaro	18	0.023	33.1	1.28	26600	7.83	0.131
Algarrobal	26'	0.0086	12.4	0.22	49500	0.94	0.016

Figura 6-21. Estimación del flujo subterráneo. Fuente: CORFO, 1955.

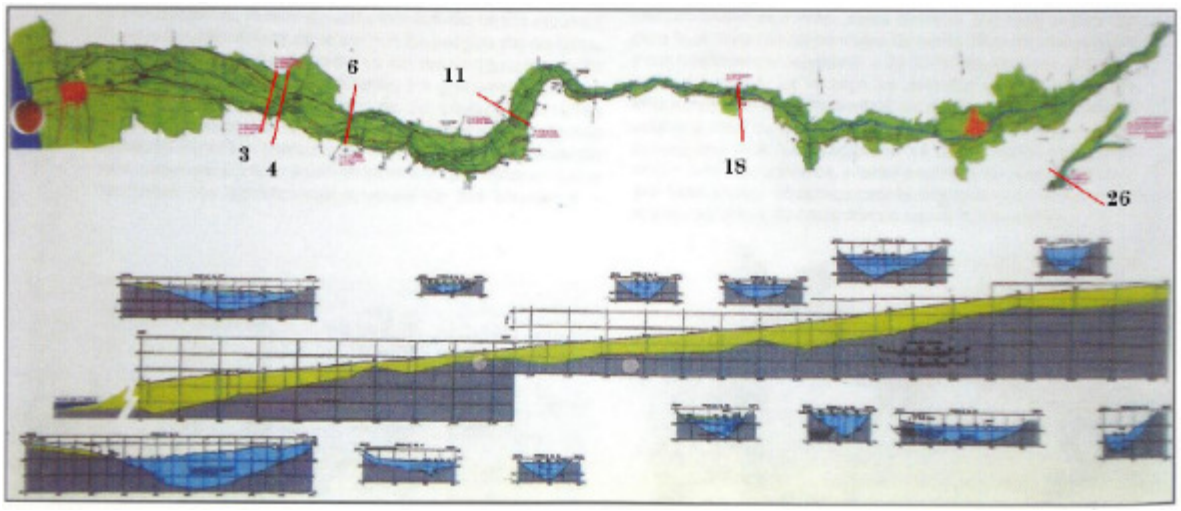


Figura 6-22. Ubicación de perfiles geofísicos. Fuente: CORFO, 1955.

17. LAFUENTE, C. A. Geoquímica de aguas y sedimentos de la cuenca del río Elqui. Tercera campaña de monitoreo, Proyecto CAMINAR, Y VISIÓN DE SÍNTESIS. Memoria para optar a título de Ingeniero Civil Ambiental. Universidad de la Serena. 2011.

El presente estudio considera los datos geoquímicos para el agua y los sedimentos de la cuenca del río Elqui obtenidos a partir de la tercera campaña de muestreo (Diciembre 2008) realizado por el Proyecto CAMINAR. CAMINAR (Manejo de Cuencas e Impactos Mineros en Regiones Áridas y Semiáridas de América del Sur).

Se tomaron un total de 46 muestras de agua de las cuales 24 correspondían a agua subterránea y 22 a agua superficial. También se analizaron isótopos del agua (δ^2H, $\delta^{18}O$) y NO3 aunque no se especifica el número de muestras. Por otro lado se tomaron 15 muestras de sedimentos activos (sedimentos finos en cursos fluviales con agua).

Los resultados confirmaron que las aguas superficiales y subterráneas, así como los sedimentos de la cuenca presentan las concentraciones más altas para una amplia gama de parámetros en la subsubcuenca del río Turbio. Este hecho se interpretó que era debido a la alteración hidrotermal que incluye el distrito de El Indio. La subsubcuenca del río Claro presentó el agua de mejor calidad mostrando las concentraciones más bajas de los diferentes parámetros a lo largo de toda la zona de estudio. Mientras que la subcuenca del río Elqui presentó altas concentraciones con una tendencia decreciente aguas abajo del

embalse Puclaro, dejando en evidencia el efecto sedimentador de éste (efecto trampa para metales).

Por último, durante la campaña que se realizó en Diciembre de 2008 también se aforaron algunos ríos. Los caudales medidos correspondientes a la subcuenca del río Turbio y río Claro se muestran en la **Tabla 6-6.**

Punto	Caudal (m^3/s)
Río Toro antes río La Laguna	0,69
Río La Laguna antes junta río Toro	8,65
Río Turbio después río Toro y río La Laguna	9,32
Río Incaguaz antes río Turbio	2,71
Río Turbio en Huanta	14,2
Río Turbio en Varillar	10,52
Río Claro en Alcohuaz	1,85
Río Claro en Rivadavia	6,5

Tabla 6-6. Caudales medidos en las cuencas del río Turbio y río Claro en Diciembre de 2008. Fuente: Lafuente, 2008.

18. CORTES, A.E., OYARZÚN, R., KRETSCHMER, N., CHAVES, H., SOTO, G., SOTO, M., AMÉZAGA, J., OYARZÚN, J., RÖTTING, T., SEÑORET, M. and MATURANA, H. Application of the Watershed Sustainability Index to the Elqui river basin, North-Central Chile. Obras y Proyectos 12, 2012.

La aplicación de WSI (Watershed Sustainability Index) fue llevada a cabo como parte del trabajo del Centro del agua de la UNESCO para las zonas áridas y semiáridas de Latinoamérica y el Caribe (CAZALAC), dentro del marco de las reuniones de las aguas regionales de Coquimbo, dirigidas por la DGA-CAZALAC y como parte de las actividades del proyecto CAMINAR.

En la estación Algarrobal, que se encuentra debajo de la confluencia de los ríos Turbio y Claro, el río Elqui tiene una descarga a largo plazo de 12,9 m^3/s. Para el caso de las aguas subterráneas, de todos los derechos en la cuenca, teniendo en cuenta una estimación del uso y su disponibilidad, correspondería a 7,9 m^3/s.

19.OYARZÚN R., OYARZÚN, J., SEÑORET, M., MATURANA, H., ORTH, K., SOTO, G., KRETSCHMER, N. Technical Report on river basin characteristics, pressures and issues (Elqui). Chile, 2008.

La cuenca posee como característica geológica-geomorfológica única un rasgo que es diferente a otras regiones de Chile: la falta de valles tectónicos de dirección norte-sur (valles centrales) que si existen tanto al norte como al sur. También se destaca la ausencia de actividad volcánica reciente y la falta de relleno de los valles tectónicos con sedimentos aluviales (Arumi y Oyarzún, 2006). En su lugar, la mayor proporción de la superficie de la región corresponde a afloramientos de roca dura con grados de alteración hidrotermal y condiciones de fracturamiento (**Figura 6-23**); mientras que el suelo se caracteriza por presentar pobres desarrollos, poco profundos, bien drenados y poca capacidad de retención de agua (Oyarzún y Alvarez, 2001).

La evapotranspiración reportada para el río Elqui varía entre 65 a 750 mm/año. El promedio de la descarga superficial en la cuenca es altamente variable tanto en espacio como en tiempo. El río Turbio posee promedios anuales de caudal entre 0,8 y 7,1 m^3/s; el río Claro tiene un promedio anual de caudal entre 1,5 y 4,5 m^3/s, mientras que el río Elqui tiene entre 4,3 y 12,5 m^3/s (Galleguillos, 2004). Durante la época de El Niño, también manifiesta una importante variabilidad (ej: tan baja como 2,4 y tan alta como 33 m^3/s o mayores). Como sea, la existencia del reservorio La Laguna (que opera desde 1941) y la construcción del embalse Puclaro (2002), han contribuido a regular las descargas del río Elqui, especialmente en su curso bajo.

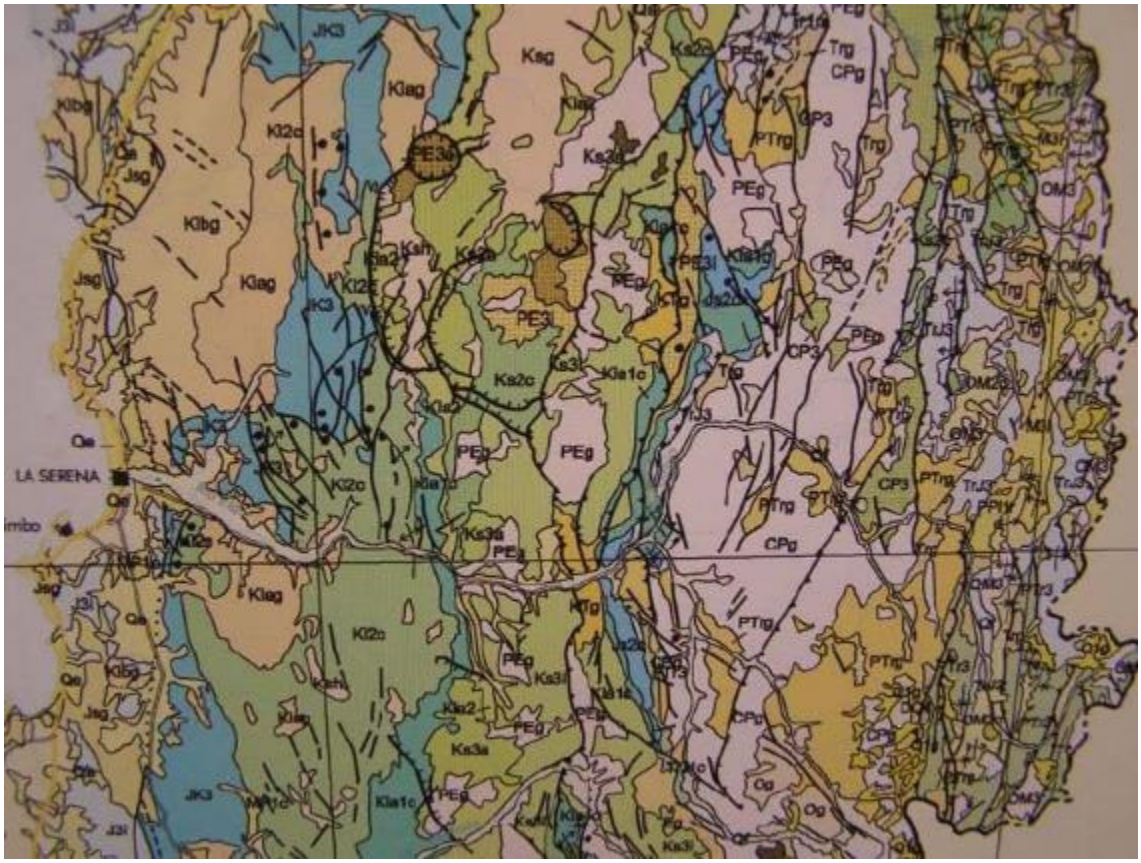


Figura 6-23. Mapa geológico del río Elqui. Fuente: Oyarzún *et al.*, 2008.

Con respecto al agua subterránea, se encuentran presentes en 2 tipos de acuíferos. El mejor conocido corresponde a sedimentos pocos profundos de las planicies de inundación y quebradas, donde las aguas subterráneas y las de escorrentía están en contacto directo (acuíferos no confinados). Puesto que hay algunas diferencias en sus propiedades elásticas e hidráulicas es posible distinguir diferentes sectores (**Figura 6-24**).

El número de sectores varía según los estudios, pero en general se pueden distinguir los siguientes: 1) Parte alta de la cuenca que incluye los "valles" de los ríos Claro y Turbio; 2) entre los pueblos de Algarrobal y Vicuña; 3) entre Vicuña y El Tambo; 4) entre El Tambo y Punta Piedra y 5) entre Punta Piedra y la desembocadura. El coeficiente de almacenamiento en se encuentra en rangos entre 0,5% y 1% aproximadamente, las permeabilidades son altamente variables espacialmente y es reportada entre 0,1 y 100 m/d. El gradiente hidráulico fluctúa ente 0,01 a 0,03.

El segundo tipo de acuífero se aloja en rocas del macizo fracturadas, tanto de batolitos graníticos, volcánicas y capas sedimentarias. Debido a los procesos hidrotermales

regionales o locales, las rocas volcánicas mesozoicas fueron reemplazadas intensamente por minerales secundarios como calcita, epidota, zeolita, y otros. Dado que algunos de estos minerales (como la calcita) fueron disueltos por procesos hidrolíticos, las rocas desarrollaron grandes huecos, lo que aumentó su permeabilidad secundaria. Esta agua subterránea se observa en afloramientos naturales en la montaña, y es usada para consumo humano o para irrigación de campesinos locales.

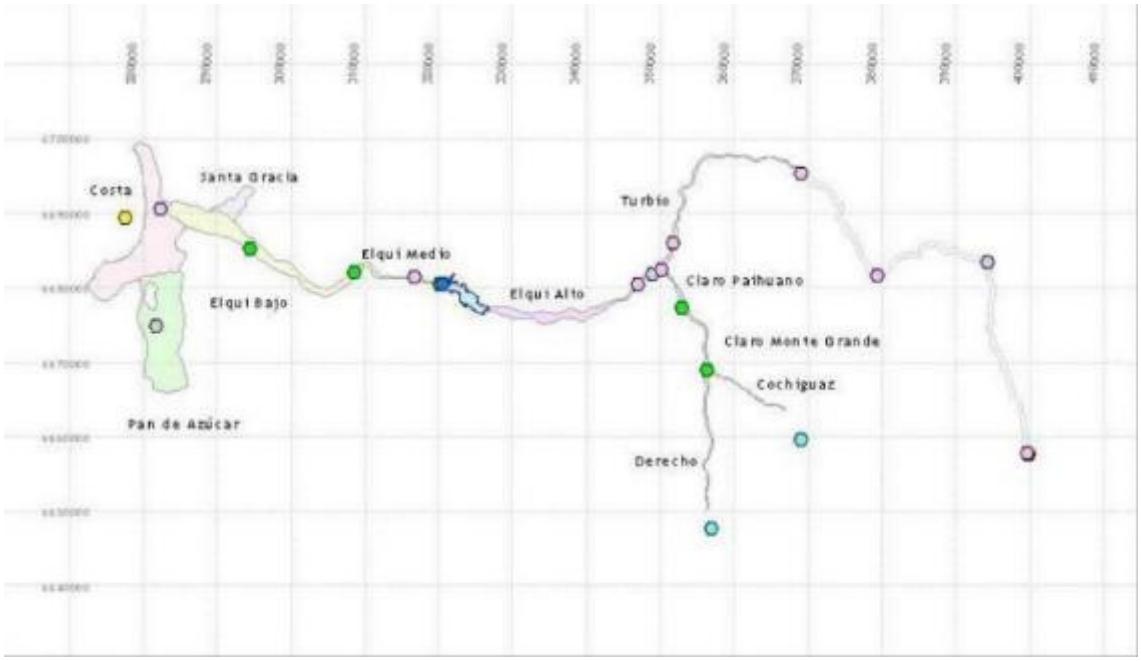


Figura 6-24. Vista general de los acuíferos. Fuente: Oyarzún *et al.*, 2008.

El consumo de agua (**Tabla 6-7**) está dominado por la agricultura. La cuenca del Elqui tiene actualmente 23.000 ha cultivables, 25% aguas arriba del embalse Puclaro y 75% aguas abajo. El 91% del total de tierras cultivadas se encuentra debajo del Reservorio La Laguna. Sólo la subcuenca del río Claro no está regulada.

Demanding Activity	Demanded Discharge (m^3/s)	Volume (m^3)
Agriculture	4,320	136.859.933
Mining	0,101	3.185.136
Industry	0,062	1.955.232
Drinkable water, urban	0,250	7.884.000
Drinkable water, rural	0,039	1.229904

Tabla 6-7. Demanda promedio de agua por área económica. Fuente: Oyarzún *et al.*, 2008.

20. SOUVIGNET M., GAESEA,H, RIBBEA L., KRETSCHMERC N. and R. OYARZÚN C. Climate Change Impacts on Water Availability in the Arid Elqui Valley, North Central Chile: A preliminary Assessment, 2008.

El río Claro drena la parte sur de la cuenca del río Elqui con un promedio de 5,16 m3/s (promedio entre los años 1990 y 2000). Debido a la poca cantidad de lluvia (menos de 100 mm/a) en la parte baja de la cuenca del río Elqui, la cuenca del Claro es una importante fuente de agua para agricultura dentro del valle Cochiguaz.

21. FAVIER V, FALVEY M, RABATEL A, PRADERIO E, and LOPEZ D. Interpreting discrepancies between discharge and precipitation in high-altitude area of Chile's Norte Chico region (26–32°S), 2009.

Uno de los objetivos más importante de este estudio fue entender la contribución de agua desde las áreas altas de la cordillera de los Andes. Se reportó nieve sobre los 3.000 msnm, incluida la captación del embalse La Laguna.

En la **Tabla 6-8** se pueden observar las estaciones pluviométricas, en las que se registra la presencia o no de nieve.

ID Number	Watershed	Station	Altitude (m asl)	Precipitation (mm a^{-1})	Latitude	Longitude	Period
P1	*COPIAPO*	Jorquera En La Guardia	1800	50	27°45'S	69°40'W	1971–2005
P2	*COPIAPO*	Manflas Hacienda	1410	47	28°07'S	69°58'W	1971–2005
P3	*COPIAPO*	Lautaro Embalse	1110	41	27°59'S	70°00'W	1971–2005
P4	*COPIAPO*	Los Loros	940	37	27°50'S	70°07'W	1971–2005
P5	*COPIAPO*	Copiapo	385	19	27°21'S	70°21'W	1971–2005
P6	*HUASCO*	Conay	1450	90	28°58'S	70°09'W	1993–2005
P7	*HUASCO*	El Parral (Tambos before 1993)	1300	75 (78 before 1993)	28°59'S	70°12'W	1993–2005
P8	*HUASCO*	El Transito Reten (DMC)	1200	59	28°55'S	70°16'W	1993–2005
P9	*HUASCO*	El Transito	1100	56	28°52'S	70°17'W	1993–2005
P10	*HUASCO*	San Felix	1150	62	28°56'S	70°28'W	1993–2005
P11	*HUASCO*	Junta Del Carmen	770	50	28°45'S	70°29'W	1993–2005
P12	*HUASCO*	Santa Juana	560	44	28°40'S	70°39'W	1993–2005
P13	*HUASCO*	Vallenar (DGA)	420	41	28°35'S	70°44'W	1993–2005
P14	*HUASCO*	Freirian	100	38	28°30'S	71°05'W	1993–2005
P15	*ELQUI*	La Laguna	3100	161	30°12'S	70°02'W	1964–2005
P16	*ELQUI*	Juntas	2155	110	29°58'S	70°06'W	1990–2005
P17	*ELQUI*	La Ortiga	1560	158	30°12'S	70°29'W	1990–2005
P18	*ELQUI*	Cochiguaz	1560	112	30°08'S	70°24'W	1990–2005
P19	*ELQUI*	Los Nichos	1350	134	30°09'S	70°30'W	1990–2005
P20	*ELQUI*	Pisco Elqui	1300	105	30°07'S	70°30'W	1990–2005
P21	*ELQUI*	Huanta	1240	65	29°50'S	70°23'W	1990–2005
P22	*ELQUI*	Monte Grande	1155	86	30°05'S	70°30'W	1990–2005
P23	*ELQUI*	Rivadavia	850	104	29°58'S	70°34'W	1964–2005
P24	*ELQUI*	Vicuña (INIA)	730	105	30°02'S	70°42'W	1990–2005
P25	*ELQUI*	La Serena-La Florida (DMC)	142	90	29°54'S	71°12'W	1870–2005
P26	*ELQUI*	Almendral	430	94	29°59'S	70°54'W	1990–2005
P27	*LIMARI*	Pabellon	1920	149	30°24'S	70°33'W	1969–2005
P28	*LIMARI*	Las Ramadas	1350	308	31°01'S	70°35'W	1969–2005
P29	*LIMARI*	Tascadero	1230	272	31°01'S	70°40'W	1969–2005
P30	*LIMARI*	Hurtado	1200	138	30°17'S	70°41'W	1969–2005
P31	*LIMARI*	Tulahuen	1020	224	30°58'S	70°46'W	1969–2005

Tabla 6-8. Estaciones pluviométricas usadas en este estudio. Fuente: Favier *et al.*, 2009.

El aumento en la descarga desde 1964 a 1990, como sugirió Novoa (1995, 1996 y 2006), está asociado con un correspondiente aumento en la precipitación, sugiriendo que ambas variables están bien correlacionadas. El incremento en el derretimiento glaciar en la cuenca de La Laguna durante los últimos 50 años (si es que ocurrieron) no fue aparentemente significativo para producir un aumento en el caudal. La **Figura 6-25** muestra las variaciones históricas de las precipitaciones y las descargas para la cuenta del río Turbio. La disminución de la escorrentía del río Turbio entre los años 1918 y 2005 es estadísticamente significativa, mientras que el aumento observado luego de 1950 no lo es.

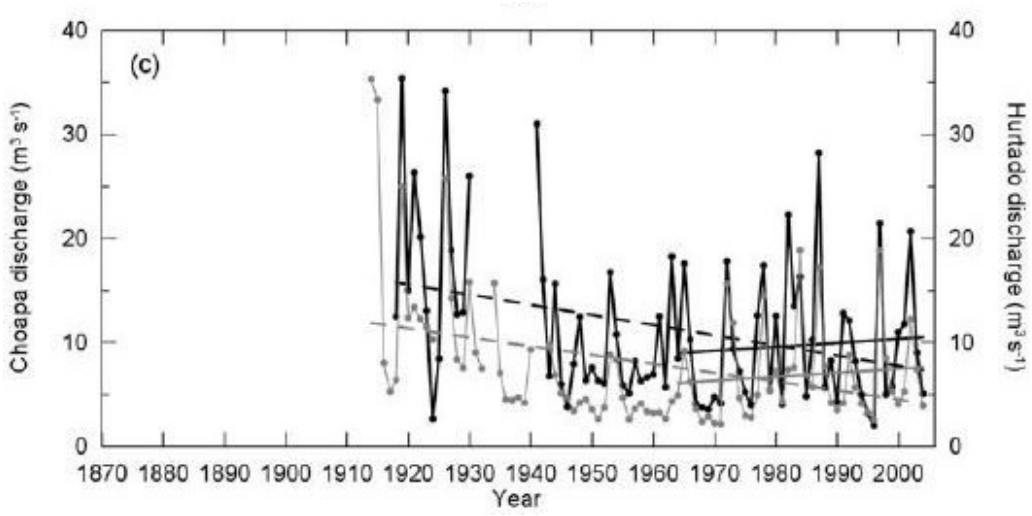


Figura 6-25. Variaciones históricas de precipitaciones y descargas. La línea de puntos grises muestra la descarga del río Turbio en Varillar. La línea segmentada representa regresiones lineales para los períodos 1918-2005 y 1950-2005, respectivamente. Fuente: Favier *et al.*, 2009.

La **Figura 6-26** muestra la variación histórica de las precipitaciones y descargas en alta montaña, en la estación del embalse La Laguna (3.130 msnm). Las tendencias de escorrentía y precipitaciones que aumentan en los períodos 1964-1990 tienen un bajo grado de significación estadística, y no hay una tendencia observada para el período 1964-2005.

La extensión glaciar y su retraimiento se estimaron tomando la contribución de éstos a la escorrentía en la captación del embalse La Laguna, que es una de las cuencas más glacificadas en el área y que contiene al glaciar Cerro Tapado. Para estimar la producción de agua desde la criosfera, se confeccionó un inventario de glaciares. Se estimó que 34 glaciares suman una superficie total de al menos 4,4 Km2. En el estudio se encontraron 46 glaciares de roca y detritos que representan un adicional de 10,6 Km2.

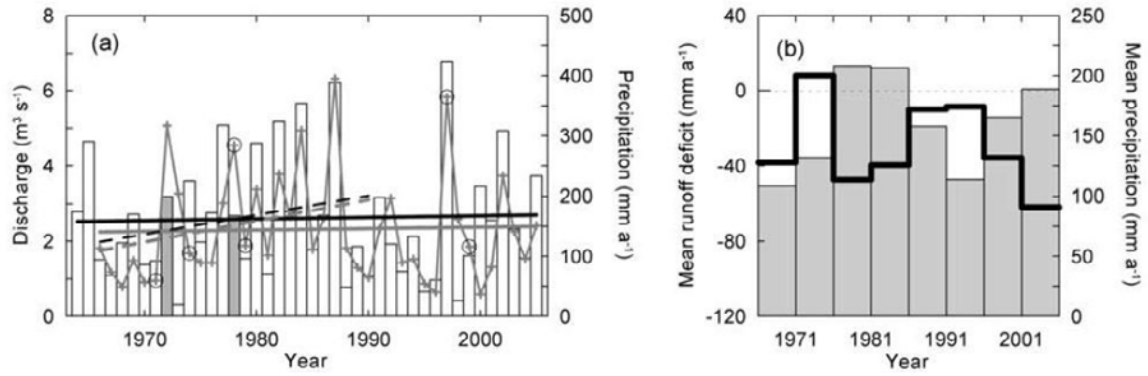


Figura 6-26. Variación de la precipitación y el caudal en el embalse La Laguna. Fuente: Favier *et al.*, 2009.

En el grafico (a) las barras blancas representan las precipitaciones anuales y las líneas grises continuas son las descargas anuales. Las barras grises y los círculos representan los datos de precipitaciones y descargas faltantes que fueron reemplazados por mediciones de flujo en la estación Varillar. Las líneas negras discontinuas son las tendencias de precipitación en los períodos 1964-2005 y 1966-1990. Las líneas grises discontinuas son tendencias de descarga durante los períodos 1964-2005 y 1966-1990. El grafico (b) muestra la variación media del déficit de precipitaciones y escorrentía durante 5 años en la estación del Embalse La Laguna entre 1966 y 2005. Las columnas grises son las precipitaciones medias, las líneas negras son el déficit medio de escorrentía.

La pérdida de masa glaciar se basó en el trabajo de Rivera (2002), que usó observaciones del glaciar Tronquitos entre 1955 y 1984 para aproximar un valor para cuerpos a gran altura en las regiones del Norte Chico. Ellos estimaron el volumen de hielo de las áreas donde los glaciares desaparecieron totalmente (un 11,4% de las áreas con glaciares) asumiendo que el grosor del hielo en esas áreas tenían un rango entre 30 y 50 metros antes de derretirse. Por otra parte, para evaluar la descarga de hielo derretido desde las superficies cubiertas (el 88,6% restante), asumieron que el área de acumulación decreció con una tasa media de 0,7 m/a en el área de ablación.

La limitada cobertura glaciar del Norte Chico indica que la nieve hará la gran contribución en la descarga de las cuencas de gran altura. La **Figura 6-27** muestra que la nieve cubre el 80% de la cuenca del embalse La Laguna durante por lo menos 4 meses (12 meses en los 3 años del estudio). Con un mínimo de 2,5 meses en el año 2000 y un máximo de 5 meses en 2002. La mínima altitud con nieve es, generalmente, cerca de los 1.200 msnm. La máxima acumulación de nieve ocurre en junio-agosto luego de las fuertes precipitaciones

del invierno. La acumulación y merma de nieve ocurre muy rápido, en períodos de 1 o 2 meses y, más o menos, simultáneamente sobre toda la cuenca (la nieve a los 3.000 msnm dura 1 mes menos que a los 5.000 msnm).

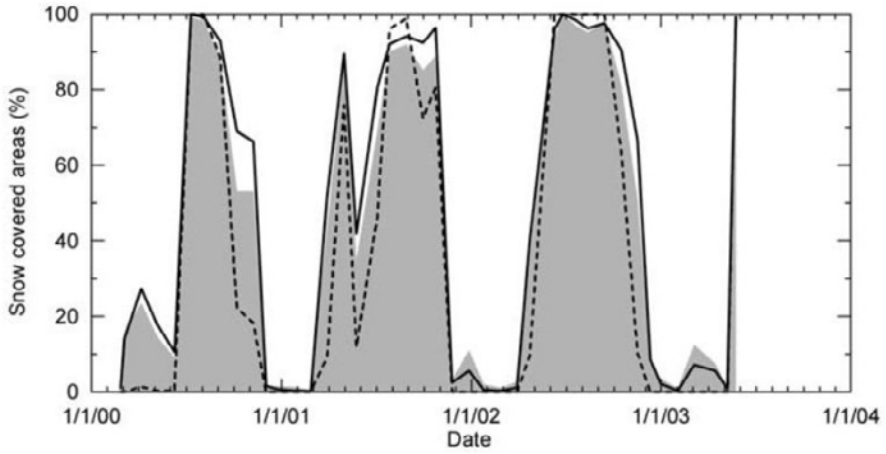


Figura 6-27. Cobertura de nieve sobre la cuenca de La Laguna, estimados con índices de cobertura de nieve entre el 26 de febrero del 2000 y el 25 de mayo de 2003.La línea continua es la extensión de nieve como porcentaje del total del área entre 4.000 y 5.000 msnm. La línea de puntos es la extensión de nieve entre 3.000 y 4.000 msnm. El área gris representa la extensión de nieve sobre toda la cuenca. Fuente: Favier *et al.*, 2009.

Respecto de la sublimación de la nieve, en las áreas altas del Norte Chico hay pocos datos de sublimación disponibles. La sublimación del verano ha sido evaluada directamente de medidas desde lisímetros instalados en el glaciar Cerro Tapado, entre el 11 y el 16 de febrero de 1999, con tasas que van de 2 a 4 mm/d. Las medidas directas en el área de Pascua Lama entre diciembre de 2007 y marzo de 2008 entregaron valores ligeramente menores, entre 1,26 mm/d y 2,25 mm/d.

22.HABITERRA. Plan Regulador Intercomunal Provincia del Elqui. Región de Coquimbo. Estudio Fundado de Riesgos. Anexo. 2012.

El objetivo principal del trabajo es reconocer y delimitar las áreas de riesgos y zonas no edificables a una escala regional (**Figura 6-28**). Para cumplir con el objetivo planteado se elaboró una línea base geológica y geomorfológica, se realizaron visitas a terreno y se realizó un catastro de los peligros geológicos históricos.

La **caracterización geológica y geomorfológica** se realizó de forma simultánea. Para ello se utilizó como base los mapas geológicos de SERNAGEOMIN a escala 1:100.000 y

1:250.000 que abarcan gran parte del área de estudio, lo que fue complementado con un recorrido parcial de terreno. También se interpretaron fotografías aéreas e imágenes satelitales, identificando geoformas, contactos litológicos, etc.

Se construyó un Modelo de Elevación Digital (DEM, por sus siglas en inglés). El DEM corresponde a una matriz que contiene la información topográfica básica (elevación) que permitió estimar los parámetros morfométricos.

En el **marco hidrológico** de la Línea de Base (LdB), se describe que el drenaje de la Región de Coquimbo está dominado por cuatro cuencas principales: río Los Choros, río Elqui, río Limarí y río Choapa, que en conjunto corresponden a un 83% de la superficie de la región y su régimen de alimentación es mixto, con una componente pluvial y otra nival. El restante 17% de superficie de la región lo cubren las llamadas cuencas costeras, de régimen netamente pluvial, siendo sus caudales mucho más esporádicos (INFRACON, 2007).

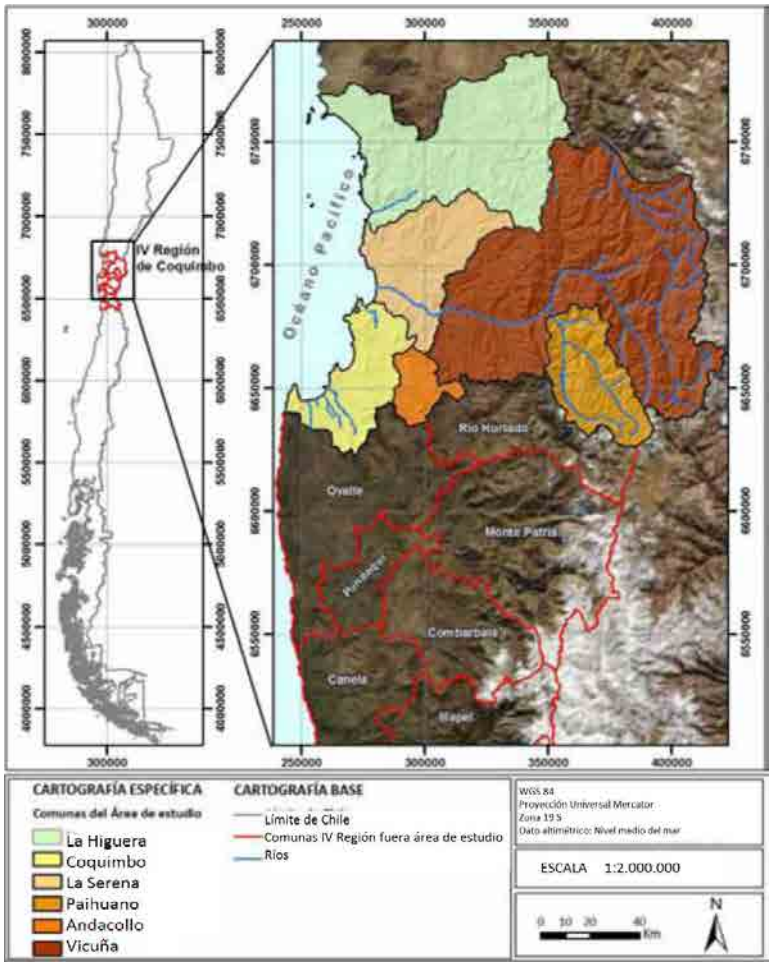


Figura 6-28. Ubicación del área de estudio. Fuente: Habiterra. 2012.

En general, las cuencas de los ríos mayores presentan una red de drenaje dendrítica. Habitualmente, este tipo de redes de drenaje se desarrollan en regiones donde el basamento es homogéneo, es decir, que la geología en sub-superficie tiene una resistencia a la meteorización uniforme y no hay control estructural o litológico aparente sobre la dirección de ríos y esteros.

De las cuatro cuencas mayores, las cuencas de los ríos Elqui, Limarí y Choapa presentan regímenes de alimentación mixtos, con la presencia de dos máximos anuales, uno en el invierno y otro en primavera verano, debido a los deshielos cordilleranos, mientras que la cuenca del río Los Choros tiene un régimen principalmente pluvial.

El río Elqui nace a 815 msnm, 2 Km aguas arriba de Rivadavia, de la unión de los río Turbio que viene del oriente y el río Claro que proviene del sur, con aportes de agua que provienen de las cabeceras de las hoyas hidrográficas ubicadas al este (**Figura 6-29**). Desde

Rivadavia y hasta su desembocadura en la ciudad de La Serena, el río mantiene una dirección E-W y prácticamente no recibe afluentes, salvo varias quebradas de considerable desarrollo, pero normalmente secas y que sólo le aportan agua en caso de lluvia directa en los años muy húmedos (CADE-IDEPE, 2004; INFRACON, 2007).

La hoya hidrográfica del río Elqui cubre un área de 9.826 Km2 con un caudal medio de 15 m3/s, y su principal aporte de aguas se produce en el período de deshielos. El régimen del Elqui es mixto, en años húmedos presenta crecidas en invierno y a fines de primavera. En verano se alimenta predominantemente de aportes nivales. Las aguas del Elqui son intensamente utilizadas tanto para consumo humano en La Serena, Coquimbo y Vicuña, como para el regadío del valle, lo cual es potenciado con el embalse Puclaro.

En el **marco geológico**, la geología (**Figura 6-30**) es descrita de manera general por un basamento metamórfico paleozoico, el que se encuentra cubierto discordantemente por rocas volcánicas y sedimentarias, marinas y continentales, que van desde el triásico inferior hasta el cenozoico. Tanto las secuencias paleozoicas y triásico-jurásicas se encuentran intruídas por franjas de orientación aproximada NNW de rocas intrusivas, cuya composición varía de gabros a granitos y con edades radiométricas que van desde el Jurásico Superior hasta el Cretácico Inferior, decreciendo su edad desde la costa hacia el oriente (Thomas, 1967); Moscoso et al., 1982; Rivano y Sepúlveda, 1991; Rebolledo y Charrier, 1994; Emparán y Pineda, 2005).

La principal característica tectónica corresponde a la Zona de Falla de Atacama (ZFA), ubicada en la zona de la cordillera de la Costa. Las estructuras asociadas a ella están orientadas norte-sur y subverticales (Sillitoe et al., 1968; Riquelme, 2003), a las que se asocia movimientos desde el Mioceno medio (Naranjo, 1987; Armijo y Thiele, 1990; Delouis et al., 1998).

Finalmente, tanto rocas metamórficas paleozoicas como rocas sedimentarias y volcánicas triásico-jurásicas y los intrusivos jurásicos–cretácicos se encuentran cubiertos en discordancia por depósitos marinos, fluviales y eólicos del Neógeno Superior a la actualidad, los que a su vez se encuentran disectados por los actuales cauces fluviales y aluviales que se reconocen en la zona (Paskoff et al., 1995; Benado, 2000; Emparán y Pineda, 2000, 2005).

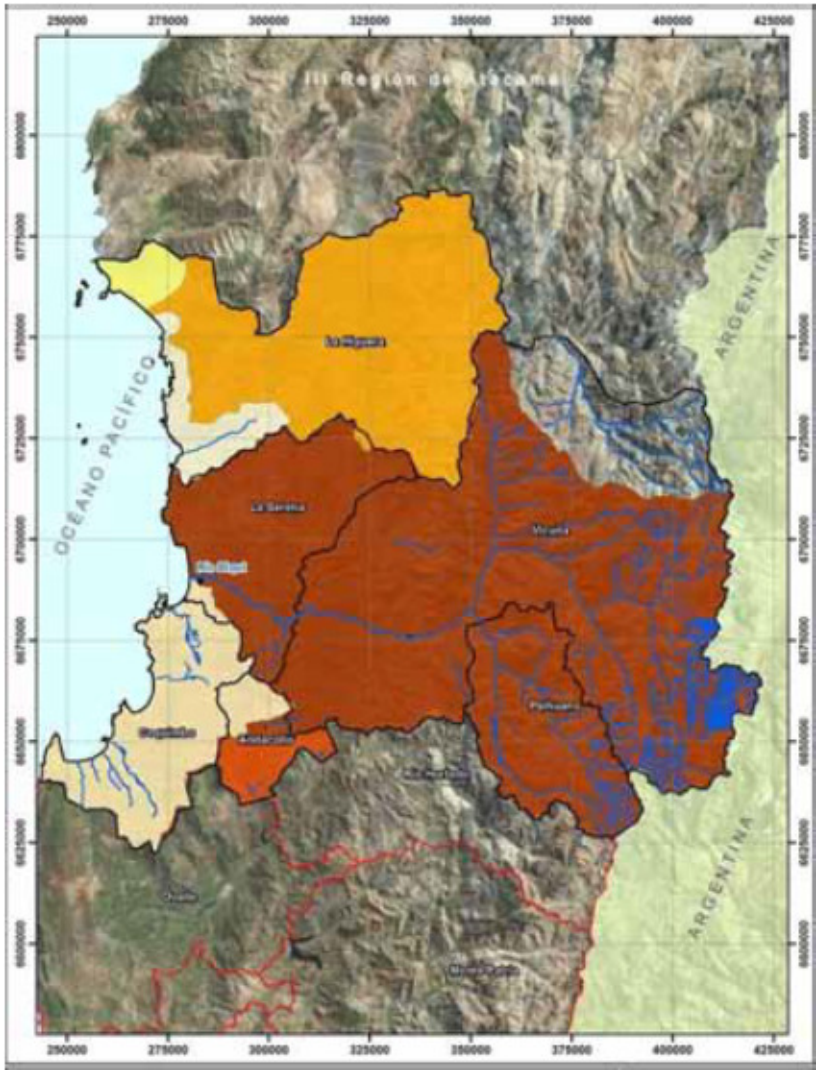


Figura 6-29. Principales cuencas del área de estudio. Fuente: Habiterra. 2012.

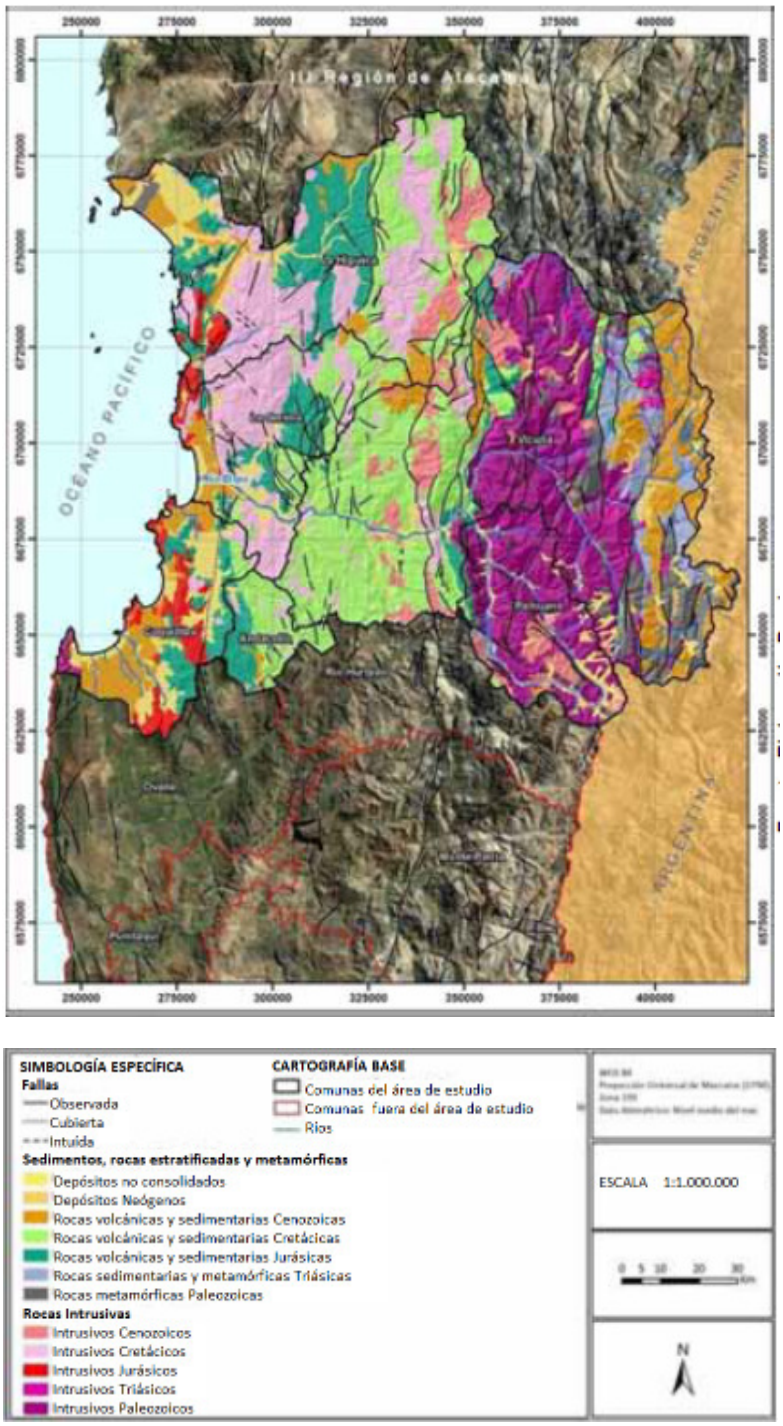


Figura 6-30. Geología del área de estudio. Fuente: Habiterra. 2012.

Se identifican en el área 12 Unidades de Rocas, que se resumen a continuación.

1.- Rocas Metamórficas Paleozoicas

- Complejo Metamórfico El Teniente. Afloramientos discontinuos de rocas metamórficas se observan en la cordillera Costa y entre Huasco y Los Vilos. Irwin *et al.* (1988) lo describen como compuesto de meta-basitas ultrabásicas y básicas, meta-cherts, meta-conglomerado y meta-areniscas, con edad de metamorfismo entre el Paleozoico tardío al Mesozoico temprano.

- Complejo Metamórfico El Choapa. Este complejo se constituye de esquistos micáceos de cuarzo intensamente deformados, filitas y esquistos de anfibolita (Rebolledo y Charrier, 1994) afectada por al menos 7 etapas deformativas. Las condiciones metamórficas que desarrollaron este complejo han sido consideradas dentro de la facie de esquistos verdes, con condiciones P-T de baja a media (Rebolledo & Charrier, 1994). Se obtuvieron condiciones peak en hornblendas que sugerían presiones por encima de los 5 Kbar. Las edades Jurásicas que se observan en K-Ar sugieren un rejuvenecimiento producido por los plutones Jurásicos (Mpodozis & Kay, 1990).

- Complejo Metamórfico del Choapa (Devónico). Aflora en el sector de Puerto Manso, 40 Km al norte de Los Vilos, comúnmente diferenciado en tres unidades (Rebolledo y Charrier, 1994): o Esquistos Grises de Punta Claditas, corresponden a esquistos cuarzo-moscovita de grano, o Esquistos Grises de La Gruta, constituidos por esquistos cuarzo-moscovita de grano medio, o Metaturbiditas de Agua Dulce, correspondientes a una alternancia rítmica de areniscas y pelitas con metamorfismo leve.

2.- Intrusivos Paleozoicos

Los afloramientos son parte de la Superunidad Elqui (Carbonífero), que corresponde a la parte occidental del batolito. Es dividida en las unidades El Volcán, Cochiguáz y Guanta, caracterizadas principalmente por granitos, granodioritas y tonalitas de gran extensión (Mpodozis & Cornejo, 1988).

3.- Intrusivos Triásicos

Cuerpos pequeños de pórfidos riolíticos de biotita, plagioclasa y sanidina, con masa fundamental microfelsítica. Afloran al este en la zona de interés, intruyendo a las Rocas Volcánicas y Sedimentarias Triásicas (Emparan & Pineda, 1999).

4.- Intrusivos Jurásicos

Ubicados preferentemente en el borde costero y la cordillera de la Costa, como una franja discontinua. Son el último testigo de la tectónica de extensión ocurrida desde el Pérmico tardío (Kay *et al.*, 1989; Parada *et al.*,1991).

5.- Intrusivos Cretácicos

Extensos afloramientos alrededor de la cordillera de la Costa, orientados norte-sur y generalmente continuos, se hacen más extensos hacia el norte. Son parte de una franja de 1.200 Km que cruza el país y se caracterizan por ser de magmatismo bimodal alcalino (Parada *et al.*, 2007).

6.- Intrusivos Cenozoicos

Son una delgada franja continua, orientada norte-sur ubicada principalmente al oeste de los Intrusivos Paleozoicos. Asociado a un magmatismo de extensión desarrollado principalmente durante el Oligoceno al Mioceno medio (Nyström *et al*., 2003). Después de este episodio la actividad decreció hasta cesar por completo, debido a la continua somerización de la subducción entre las placas Sudamericana y Nazca (Kay & Mpodozis, 2002).

7.- Rocas Volcánicas y Sedimentarias Triásicas

Afloran al sur de la localidad de Rivadavia como una delgada franja al oeste del río Claro. Corresponden a una secuencia de lavas, brechas y tobas riolíticas, con algunas intercalaciones sedimentarias de tipo areniscas, conglomerados y/o lutitas. Es correlacionable con la Formación Pastos Blancos al oriente e intruída por la Superunidad Ingaguás (Permo-Triásico) perteneciente al batolito Elqui-Limarí (Charrier *et al.*, 2007).

8.- Rocas Volcánicas y Sedimentarias Jurásicas

Es una discontinua franja costera, sobreyaciendo tanto la Superunidad Elqui como las Rocas Volcánicas y Sedimentarias Triásicas. Está constituida por andesitas, conglomerados y areniscas cuarcíferas blancas con clastos redondeados de cuarzo lechoso, policristalino, granitoides y riolitas, e intercalaciones de niveles calcáreos fosilíferos y lutitas. Su potencia variable consiste en centenas de metros de areniscas y conglomerados arcósicos-cuarcíferos, niveles calcáreos, y en algunas coladas de lavas andesíticas (Mpodozis y Cornejo, 1988; Emparán y Pineda, 1999; Charrier *et al.*, 2007).

9.- Rocas Volcánicas y Sedimentarias Cretácicas

Es una de las unidades descritas de mayor extensión en el mapa, aflora como una franja continua de dirección aproximadamente norte-sur, sobreyace a las Rocas Volcánicas y Sedimentarias Jurásicas. Al sur de Rivadavia (Mpodozis & Cornejo, 1988) describen una secuencia de más de 2.000 m de espesor, finamente estratificada, de areniscas y conglomerados rojos, limolitas y calizas lagunares con ostrácodos. Emparan y Pineda (1999) describen una secuencia de ca. 1.400 m compuesta en la base por brechas, brechas conglomerádicas, conglomerados brechosos, con imbricación y/u orientación de los clastos, y areniscas.

Las rocas volcánicas corresponden principalmente a lavas y brechas andesíticas con muy escasas intercalaciones sedimentarias. Se caracterizan por homogeneidad litológica y por la presencia de gruesas coladas y brechas andesíticas.

10.- Rocas Volcánicas y Sedimentarias Cenozoicas

Los afloramientos se encuentran distribuidos en franjas norte-sur, concentrados en el borde costero, zona central y la alta cordillera. Son lavas andesíticas de características ocoíticas, conglomerados y areniscas continentales. Se encuentran generalmente sobre los complejos metamórficos paleozoicos y granitoides mesozoicos (Charrier y Muñoz, 1997; Emparán y Pineda, 2005).

11.- Depósitos Neógeno Superior

Son caracterizados por ser finos depósitos de gravas detríticas y algunas ignimbritas, su sedimentación fue controlada por la Zona de Falla de Atacama. Se encuentran pobremente

consolidadas, tienen un espesor por sobre los 800 metros (Charrier, et al., 2007). Han sido erosionadas también por la erosión cuaternaria y son el testigo de un relieve del pasado en esta región (Sillitoe *et al.*, 1968).

12.- Depósitos No Consolidados

Son principalmente depósitos cuaternarios aluviales generados por la erosión y tectónica de la Cordillera Principal, especialmente bien desarrollados en la boca de los principales valles de la región. En la zona costera los depósitos son principalmente terrazas marinas, de distintos niveles, controladas por la abrasión asociada a los cambios ocurridos desde el Mioceno medio, en nivel del mar (Marquadt *et al.*, 2000; Ortlieb *et al.*, 2003). En la cordillera de la Costa consisten principalmente en depósitos recientes generados por aluvios, generando finos detritos. Hacia la Cordillera Principal las rocas de las Unidades de Rocas antes mencionadas se encuentran cubiertas por depósitos eólicos Pleistoceno-Holoceno que corresponden a arenas poco a medianamente consolidadas, normalmente formando campos de dunas, y parcialmente por arenas y gravas aluviales poco a medianamente consolidadas de edad Pleistoceno superior-Holoceno, en forma de depósitos de quebradas (Charrier *et al.*, 2007).

El **marco geomorfológico** describe el segmento andino chileno comprendido entre los 29° S y los 32° S como formado por 3 unidades morfoestructurales principales, dispuestas en franjas orientadas norte – sur (**Figura 6-31**). De oeste a este estas son: Planicies Litorales, cordillera de la Costa, Cordillera Principal (Chile y parte en Argentina).

Paskoff (1970) describe las grandes unidades de relieve para el segmento comprendido entre 30° S y 33° S. Estas son de oeste a este:

a) Franja Litoral. Unidad de altura y ancho variable, fluctuando este último parámetro entre algunos centenares de metros y decenas de kilómetros. Se caracteriza por la presencia de una serie de terrazas marinas (generalmente tres), labradas sobre rocas de diversos tipos (rocas metamórficas, granitos y areniscas recientes poco consolidadas).

b) Cordillera de la Costa. Cadena montañosa más próxima al mar, compuesta por cerros que rara vez sobrepasan los 2.000 msnm.

c) Media Montaña. Cadena discontinua con cumbres que alcanzan alturas variables entre los 1.000 y 3.000 msnm. Se desarrolla aproximadamente hasta los 70°45’ W, dando paso a la Alta Cordillera hacia el este.

d) Alta Cordillera. Cadena elevada y maciza, cuyas cumbres sobrepasan los 4.000 msnm, con alturas máximas que superan los 6.000 msnm. En esta unidad se observan vestigios de la acción reciente de glaciares y es donde se identifican las mayores pendientes.

Además, en el segmento comprendido entre los 29° S y 30° S se desarrollan morfologías conocidas como los Valles Transversales, y además poseen la característica que no se desarrolla la depresión central, como ocurre al sur de los 33° S (Cuesta de Chacabuco) o al norte de los 28° S (Copiapó). Los Valles Transversales corresponden a valles fluviales que en sus cursos inferiores escurren de este a oeste y aguas arriba se ramifican formando una red de tributarios dendríticos, que escurren en varias direcciones. En su parte superior (3.000-3.500 msnm) poseen un perfil transversal en “U” que los derrumbes activos y los coluvios no han llegado a obstruir. A veces, en sus cursos medios presentan anchos mayores, tomando el aspecto de pequeñas cuencas interiores. En su curso inferior los ríos se caracterizan por la existencia de un sistema de tres niveles de terrazas fluviales que en las proximidades del litoral engranan con plataformas costeras.

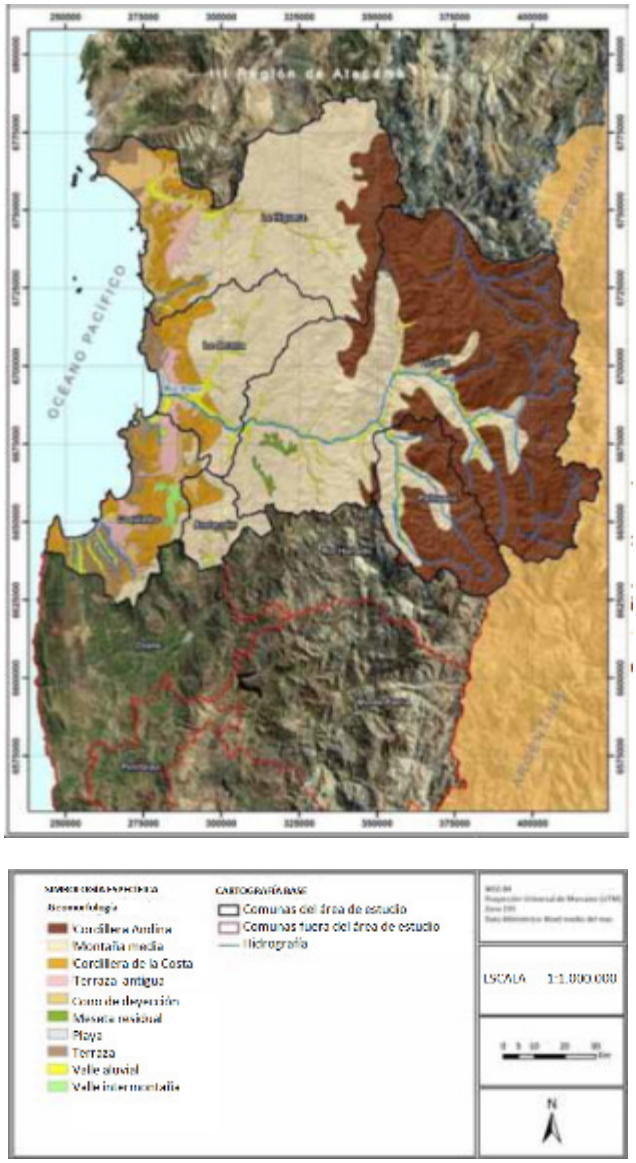


Figura 6-31. Principales unidades geomorfológicas. Fuente: Habiterra, 2012.

El estudio hace una evaluación del **marco hidrogeológico**, pero solo describe el área del valle del río Elqui, desde la confluencia del río Turbio y el río Claro.

La calidad de las figuras que se encuentran en el estudio son de muy baja resolución, no pudiendo ser identificadas las unidades en la referencia.

23. GOBIERNO REGIONAL DE COQUIMBO. Diagnóstico Plan Maestro para la Gestión de Recursos Hídrico, Región de Coquimbo, CONIC Ingenieros Civiles Consultores. 2013.

El estudio tuvo como objetivo elaborar un Plan Hídrico para la Región de Coquimbo. Para dar cumplimiento al objetivo principal se efectuó una revisión, actualización y sistematización de la información existente, se valoró la cantidad y calidad del recurso hídrico, se realizó un diagnóstico de la infraestructura y servicios relacionados, etc.

Para el **análisis de diagnóstico en cuanto a la oferta de agua** se utilizó el modelo MAGIC, desarrollado por la DGA (MOP). Este modelo hidrológico y operacional se configura con una red de nodos, en los cuales se calcula el balance de caudales superficiales y subterráneos. Para dar representatividad a los datos usados, se consideró la estadística de los últimos 20 años.

Para el **diagnóstico de la disponibilidad hídrica** para la cuenca del río Elqui se efectuó la actualización de los modelos existentes y calibrados para el año 2005. Esta cuenca se dividió en 12 zonas de riego para efectos de modelación.

La oferta está representada por el caudal en la cuenca, el cual se obtuvo por agregación de los caudales (medidos o generados) en cada una de las subcuencas aportantes. La demanda de agua es mayoritariamente para uso agrícola, le sigue el agua potable y en tercer lugar la minería y la industria, que se asumen con un factor de uso igual a uno.

Dentro de los principales resultados se encuentra el nivel en que se suple la demanda de riego, situación que se grafica para la cuenca completa (**Figura 6-32**).

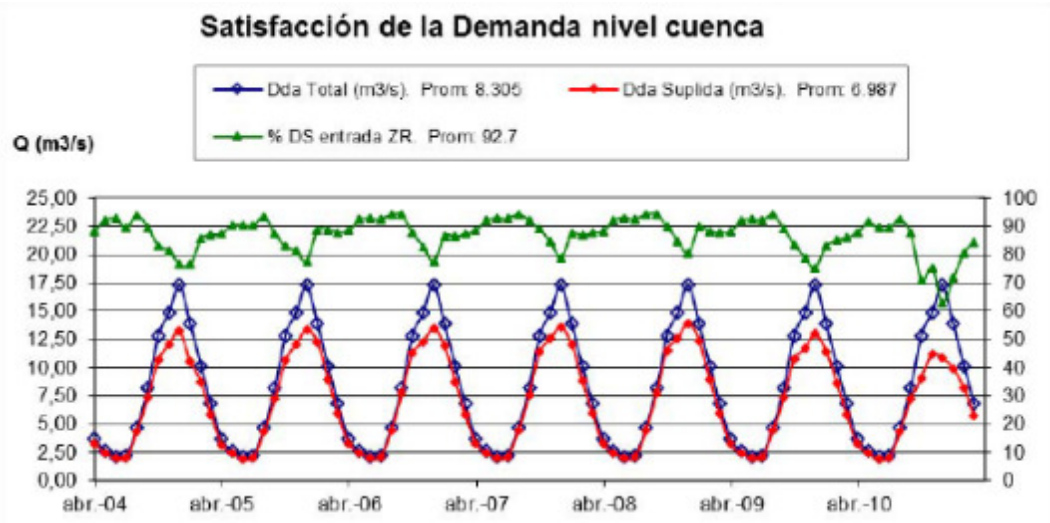


Figura 6-32. Porcentaje Demanda Suplida a Nivel de Cuenca Elqui. Fuente: CONIC Ingenieros Civiles Consultores. 2013.

A nivel de cuenca completa, los resultados más relevantes obtenidos del **balance oferta-demanda** que se realizó con el modelo MAGIC se presentan a continuación (**Figura 6-33**). Entre ellos, se encuentran los relacionados con las demandas totales y suplidas del sector agrícola, minero y agua potable, los balances y evolución del estado de los acuíferos, los flujos de interacción superficial-subterránea y las salidas al mar. Se presentan, para facilitar la comprensión, los resultados de todos los escenarios corridos para cada cuenca, tanto históricos (de calibración-validación), como futuros sin proyectos y con proyectos.

Variable	Escenarios sin proyecto		
	Elqui Validación	Futuro Base 15% aum. área	Futuro Optimizado Con algunos canales revestidos
Área total demandante (há)	25703	29478	29478
Q ddo vegetación de cauce (m3/s)	0,633	0,633	0,633
Uso agrícola			
Q ddo nivel raíz (m3/s)	5,446	6,326	6,326
Q ddo nivel ZR (m3/s)	8,305	9,227	9,227
Q captado en BT (m3/s)	12,229	8,158	8,106
Q entregado total a ZR (m3/s)	10,554	8,237	8,256
Q entregado canales a ZR (m3/s)	9,308	6,441	6,513
Q bombeo (m3/s)	1,246	1,796	1,743
Interacción superficial-subterránea			
Percolación canales (m3/s)	3,722	2,723	2,601
Percolación zonas de riego (m3/s)	1,711	1,881	1,885
Percolación cauces (m3/s)	1,819	2,208	2,209
Recarga potencial (m3/s)	7,251	6,812	6,695
Afloramiento (m3/s)	4,970	3,726	3,663
Recarga neta (m3/s)	2,281	3,086	3,032
Volumen y uso del acuífero			
Vol total promedio acuíferos (Mm3)	434,89	300,57	300,516
Bombeo total (m3/s)	2,029	2,846	2,793
Bombeo riego (m3/s)	1,246	1,796	1,742
Bombeo otros usos (m3/s)	0,782	1,05	1,05
Bombeo AP	0,362	0,412	0,412
Bombeo Mineria	0,310	0,528	0,528
Bombeo industria	0,110	0,110	0,110
Porcentaje demanda suplida agrícola			
Q ddo nivel ZR (m3/s)	8,305	9,227	9,227
Demanda suplida nivel ZR (m3/s)	6,987	8,28	8,298
% DS promedio (%)	94,3	95,0	95,1
% DS verano (%)	87,7	93,9	94,1
Área regada 85% seguridad (há)	22531	27682	24726
Salidas al mar			
Caudal superficial al mar (m3/s)	3,503	4,018	4,165
Caudal subterráneo al mar (m3/s)	0,84	0,795	0,781

Figura 6-33. Resultados Balance Oferta Demanda Cuenca Elqui. Fuente: CONIC Ingenieros Civiles Consultores. 2013.

Variable	Escenarios con proyecto			
	Operac.1 Emb E. Derecho 10 MM	Operac.1b Emb E. Derecho 2 MM	Operac. 2 Rec. artificial Culebrón	Operac. 3 Explot. Acuíferos
Área total demandante (há)	29478	29478	29478	29478
Q ddo vegetación de cauce	0,633	0,633	0,633	0,633
Uso agrícola				
Q ddo nivel raíz (m3/s)	6,326	6,326	6,326	6,326
Q ddo nivel ZR (m3/s)	9,227	9,227	9,227	9,227
Q captado en BT (m3/s)	8,168	8,123	8,100	8,084
Q entregado total a ZR (m3/s)	8,318	8,276	8,297	8,591
Q entregado canales a ZR (m3/s)	6,570	6,529	6,513	6,498
Q bombeo (m3/s)	1,748	1,747	1,784	2,093
Interacción superficial-subterránea				
Percolación canales (m3/s)	2,599	2,597	2,601	2,594
Percolación zonas de riego (m3/s)	1,895	1,888	1,885	1,981
Percolación cauces (m3/s)	2,186	2,198	2,517	2,208
Recarga potencial (m3/s)	6,681	6,683	7,003	6,783
Afloramiento (m3/s)	3,649	3,649	3,672	3,478
Recarga neta (m3/s)	3,032	3,034	3,331	3,305
Volumen y uso del acuífero				
Vol total promedio acuíferos (Mm3)	299,3	299,8	396,5	287,4
Bombeo total (m3/s)	2,794	2,795	2,856	3,143
Bombeo riego (m3/s)	1,748	1,746	1,784	2,093
Bombeo otros usos (m3/s)	1,046	1,049	1,072	1,050
Bombeo AP	0,410	0,411	0,422	0,412
Bombeo Minería	0,526	0,527	0,540	0,528
Bombeo industria	0,110	0,110	0,110	0,110
Porcentaje demanda suplida agrícola				
Q ddo nivel ZR (m3/s)	9,227	9,227	9,227	9,227
Demanda suplida nivel ZR (m3/s)	8,365	8,319	8,298	8,634
% DS promedio (%)	95,400	95,200	95,100	97,700
% DS verano (%)	95,000	94,100	94,100	95,800
Área regada 85% seguridad (há)	28011	27749	27726	28230
Salidas al mar				
Caudal superficial al mar (m3/s)	4,100	4,139	3,871	4,116
Caudal subterráneo al mar (m3/s)	0,775	0,777	0,790	0,666

(Continuación). Resultados Balance Oferta Demanda Cuenca Elqui. Fuente: CONIC Ingenieros Civiles Consultores. 2013.

24.CONIC-BF INGENIEROS CIVILES CONSULTORES. Diagnóstico Plan Maestro para la Gestión de Recursos Hídricos, Región de Coquimbo. Informe Final. Tomo I –Informe Parte 1. Gobierno de Regional de Coquimbo. 2013.

El Gobierno Regional de Coquimbo, consciente de la necesidad de buscar mejores formas de gestión que permitan enfrentar los desafíos actuales y avanzar hacia la utilización armónica del recurso hídrico, gestó la elaboración del presente Plan Maestro, contando para ello con el apoyo técnico de la DGA. El principal objetivo del estudio fue elaborar el Plan Hídrico para la región de Coquimbo, para que constituya un instrumento de planificación.

Para realizar el Plan Hídrico se hizo una revisión de la información existente, elaborándose un diagnóstico de los aspectos de cantidad y calidad, con la identificaron de brechas y debilidades que permitieran definir la base para formular objetivos estratégicos y las acciones correspondientes.

El **diagnóstico de la disponibilidad del recurso hídrico** se realizó mediante el empleo de 3 modelos: 1) modelo MLP (modelo de precipitación-escorrentía), que genera caudales afluentes a los cauces principales, para cuencas sin control fluviométrico; 2) modelo simple de escorrentía de derretimiento nival, aplicado a cuencas sin control fluviométrico, y 3) modelo MAGIC o modelo analítico genérico integrado de cuencas. Este modelo fue aplicado por CAZALAC-RODHOS en 2006. El presente estudio actualiza el modelo aplicado anteriormente.

El **diagnóstico de disponibilidad en los acuíferos** se hizo considerando el volumen y los flujos de entrada y salida promedio, con los que se realizó la modelación (**Tabla 6-9**). El volumen total de agua almacenada en los acuíferos es de 435 millones de m^3 (periodo de estudio desde el año 2004 al 2011). De este volumen, el 89% se encuentra bajo el embalse Puclaro y el 39% corresponde al acuífero de Culebrón. Los acuíferos usados en este estudio son los mismos que fueran definidos por CAZALAC-RODHOS en 2006.

Acuífero	Volumen agua	Flujo entrante	Flujo saliente
	Mill m3	m3/s	m3/s
AC-01	5,432	0,000	0,086
AC-02	0,889	0,000	0,017
AC-03	0,409	0,000	0,014
AC-04	0,989	0,031	0,076
AC-06	1,500	0,076	0,132
AC-07	38,105	0,088	0,034
AC-08	9,758	0,034	0,141
AC-09	141,120	0,141	0,347
AC-10	8,901	0,000	0,026
AC-11	170,228	0,010	0,034
AC-12	57,559	0,385	0,342
Total	**434,890**		

Tabla 6-9. Volumen y Flujos en entrada y Salida de Acuiferos. Fuente: CONIC-BF Ingenieros Civiles Consultores, 2013.

Los derechos totales de agua subterránea y aquellos de riego se presentan en la **Tabla 6-10.**

Total derechos en acuíferos	7,7567
Total derechos riego en acuíferos	5,4368
Total fuera de acuíferos	1,1056
Total general derechos subterráneos Elqui	8,8622

Tabla 6-10. Derechos de agua subterráneos totales m^3/s. Fuente: CONIC-BF Ingenieros Civiles Consultores, 2013.

Los derechos de agua que se encuentran dentro de los acuíferos, están distribuidos como se muestra en la **Tabla 6-11.**

Acuífero	TOTAL	Riego	Agua Potable	Minería	Industria
AC-01	0,24	0,14	0,04		0,06
AC-02	0,01		0,01		
AC-03	0,00				
AC-04	0,05	0,05			
AC-06	0,03	0,02	0,01		
AC-07	1,39	1,24	0,14		
AC-08	0,02	0,02			
AC-09	1,76	0,44	0,96	0,35	0,02
AC-10	0,11	0,08	0,03		
AC-11	3,78	3,26	0,31	0,22	0,00
AC-12	0,38	0,19	0,10	0,05	0,04
Total	7,76	5,44	1,60	0,61	0,11

Tabla 6-11. Derechos subterráneos para riego y otros usos en m^3/s. Fuente: CONIC-BF Ingenieros Civiles Consultores, 2013.

El modelo se operó asumiendo que todos los usos no agrícolas y toda la superficie regable de la cuenca han estado demandando agua, y en tales condiciones se observa que hay sectores donde el agua superficial para riego no es suficiente, y es necesario bombear el déficit. Esto es coherente con lo recogido en las entrevistas, en que los usuarios de los mismos sectores manifiestan que usan aguas superficiales y también subterráneas para suplir sus demandas, y que todas las áreas disponibles están siendo efectivamente cultivadas.

Los acuíferos 1 (Turbio) y 7 (Vicuña) no usan mucho sus derechos subterráneos de riego. El agua subterránea se explota casi exclusivamente para consumo urbano y rural (potable). El acuífero 3 (Cochiguaz) no aparece porque no registra pozos de ningún tipo. El acuífero 4 (Claro sobre Paihuano), aunque tiene algunos derechos subterráneos de riego, no los usa. El acuífero 5 (Paihuano) no se incluyó en la modelación, porque es pequeño, el sector de riego también es pequeño, y no se consiguió información sobre él. Este sector está fuera de la Junta de Vigilancia del río Elqui, no tiene organización propia y no tributa al río.

A través de la modelación, se ha podido mostrar la interacción entre los cauces, canales y zonas de riego con los acuíferos. Los flujos de interacción son las percolaciones que infiltran desde cauces, canales y zonas de riego, conformando la disponibilidad total para la recarga. Sin embargo, dependiendo del estado del acuífero, se producen rechazos de recarga o afloramientos hacia los nodos del cauce superficial, de modo que aparece un nuevo concepto, el de la recarga neta, que es el agua que realmente entra al acuífero.

En la **Figura 6-34** se observan los recursos disponibles por percolación que se generan en cauces, canales y zonas de riego, conformando la recarga disponible. Esta recarga, en conjunto con los afloramientos, se grafican y se obtiene la recarga neta que alimenta los acuíferos.

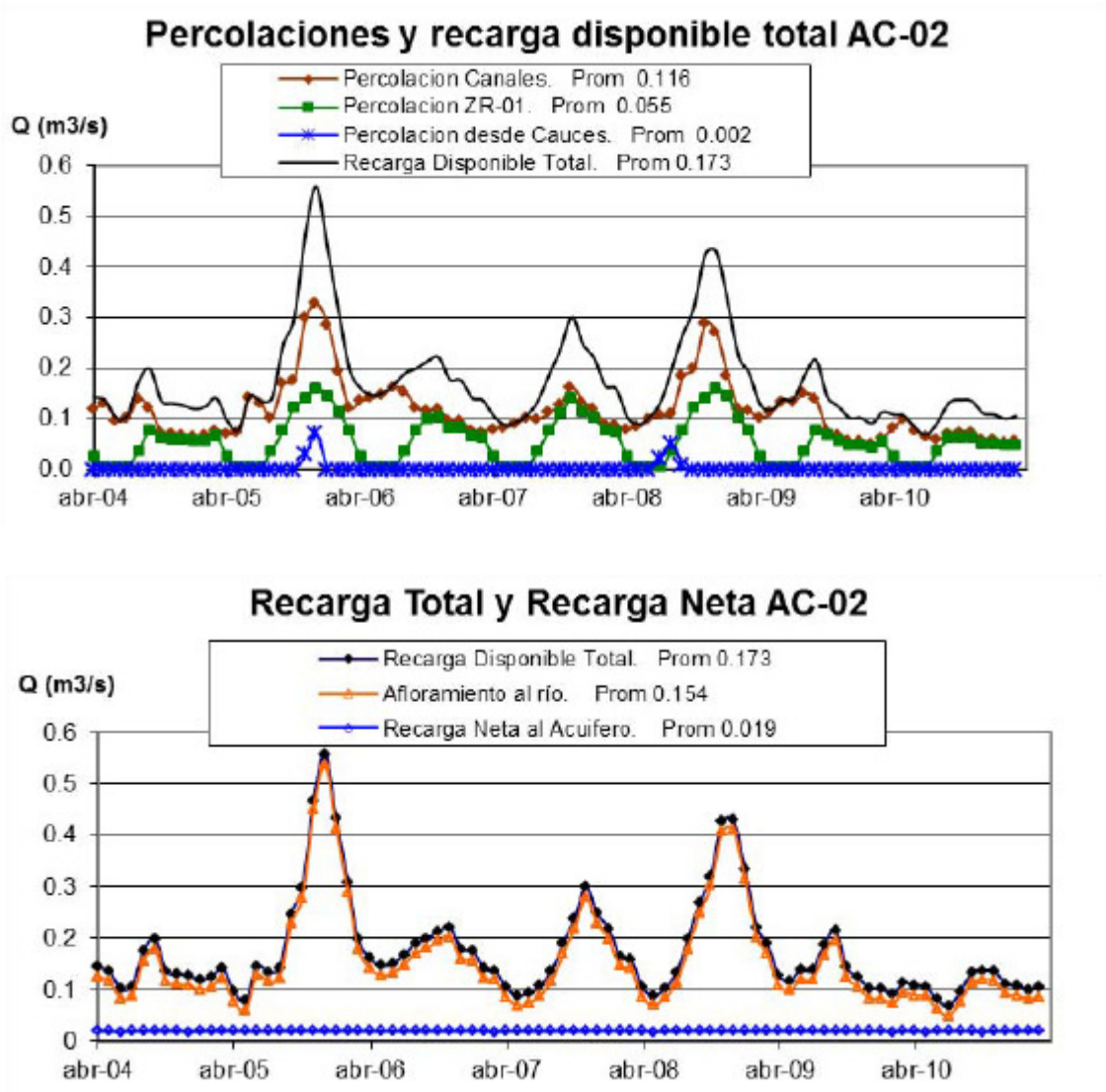


Figura 6-34. Recursos disponibles para percolación que se generan en cauces. Fuente: CONIC-BF Ingenieros Civiles Consultores, 2013.

En la **Figura 6-35** se presentan los **flujos subterráneos de salida** desde cada uno de los acuíferos, que en general constituyen los flujos de entrada al acuífero siguiente de aguas abajo. Se observa que estos flujos se mantienen prácticamente inalterados en el tiempo, sin grandes fluctuaciones.

En la **Tabla 6-12** se presenta el resumen de los promedios de las recargas disponibles, provenientes de percolaciones desde las aguas superficiales (canales, cauces y zonas de riego), los afloramientos y las recargas netas.

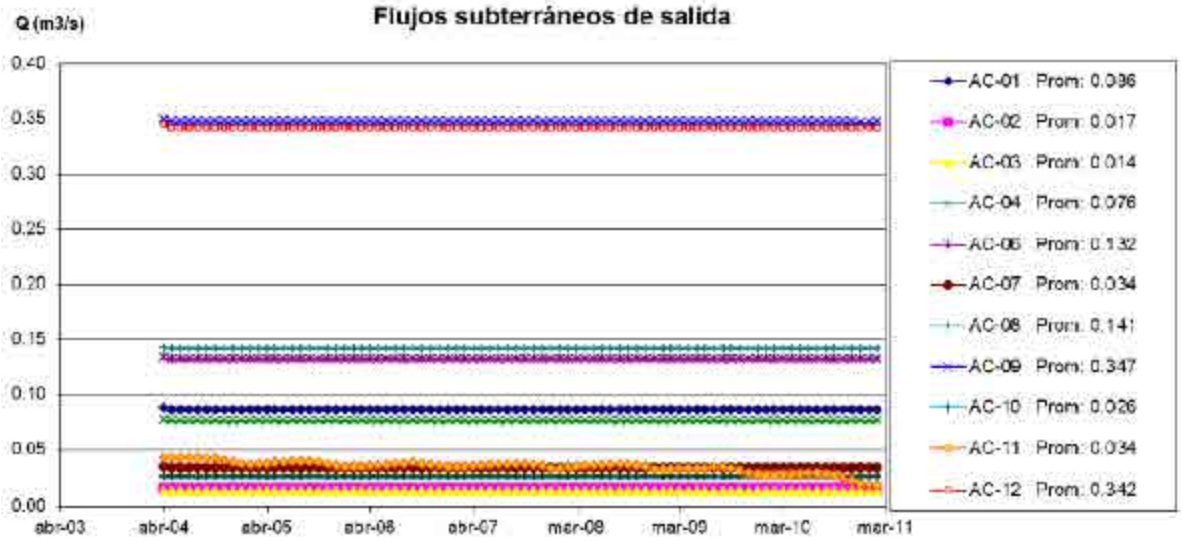


Figura 6-35. Flujos subterráneos salientes de cada uno de los acuiferos. Fuente: CONIC-BF Ingenieros Civiles Consultores, 2013.

Acuífero	Percol. desde canales	Percol. desde ZR	Percol. desde cauce	Recarga disponible	Afloramiento	Recarga neta	% Recarga neta sobre recarga disp.
	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	%
AC-01	0,265	0,037	0,495	0,797	0,649	0,148	19
AC-02	0,116	0,055	0,002	0,173	0,154	0,019	11
AC-03	0,121	0,046	0,084	0,250	0,237	0,014	5
AC-04	0,160	0,012	0,088	0,259	0,214	0,045	17
AC-06	0,173	0,016	0,095	0,283	0,224	0,059	21
AC-07	0,791	0,184	0,795	1,769	1,743	0,026	1
AC-08	0,115	0,026	0,144	0,286	0,178	0,107	38
AC-09	1,243	0,386	0,064	1,694	0,994	0,700	41
AC-10	0,053	0,109	0,000	0,162	0,056	0,106	65
AC-11	0,317	0,537	0,049	0,903	0,023	0,880	97
AC-12	0,368	0,303	0,004	0,675	0,498	0,177	26

Tabla 6-12. Percolaciones, afloramiento y recarga neta de los acuíferos. Fuente: CONIC-BF Ingenieros Civiles Consultores, 2013.

Los efectos conjuntos del bombeo y la recarga sobre los diferentes acuíferos se observan en la **Figura 6-36**. Esta figura muestra la evolución del volumen mensual almacenado en cada acuífero, para todos los acuíferos de la cuenca.

El **grado de explotación de los acuíferos se evalúa** comparando la recarga de los acuíferos y la explotación de que son objeto (**Tabla 6-13**). Se expresa como porcentaje del bombeo sobre derechos y porcentaje de bombeo sobre la recarga.

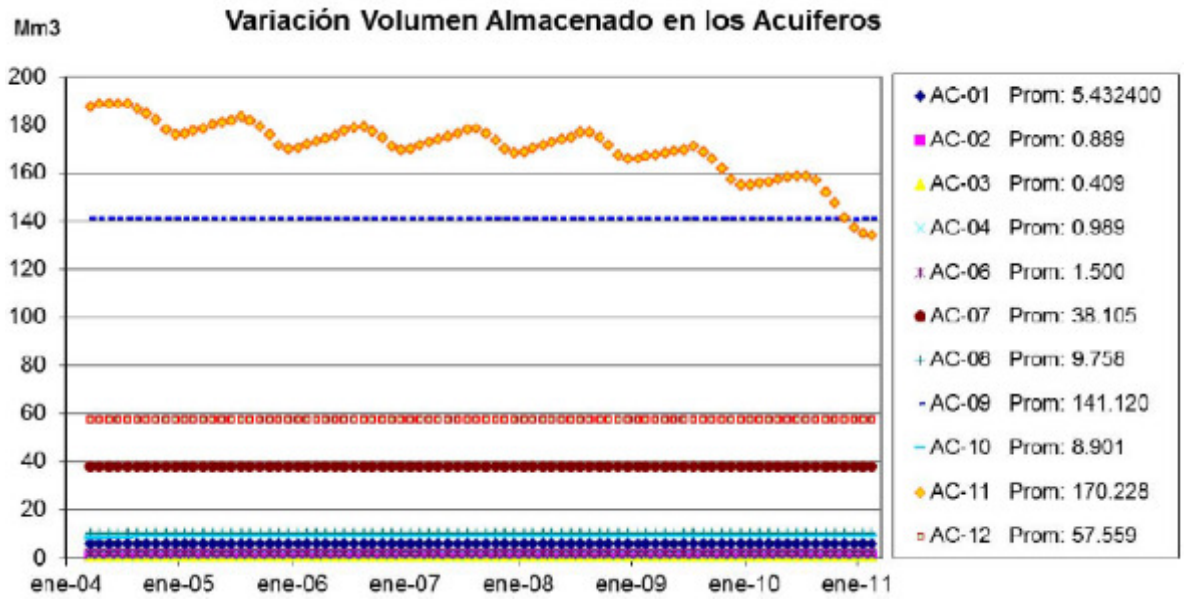


Figura 6-36. Evolución del volumen almacenado en los acuiferos. Fuente: CONIC-BF Ingenieros Civiles Consultores, 2013.

Acuífero	Recarga disponi-ble	Recarga neta	Capac Bombeo Total	Capac Bombeo Riego	Bomb Total	Bomb riego	Bomb otros usos	% bom tot sobre der totales	% bom riego sobre der riego	% bom tot sobre recargas netas
	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s	%	%	%
AC-01	0,797	0,148	0,235	0,139	0,061	0,003	0,058	26	2	41
AC-02	0,173	0,019	0,010	0,000	0,002	0,000	0,002	21	n.c.	10
AC-03	0,250	0,014	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	n.c.	n.c.	0
AC-04	0,259	0,045	0,050	0,050	0,000	0,000	0,000	0	0	0
AC-06	0,283	0,059	0,029	0,018	0,003	0,000	0,003	10	0	5
AC-07	1,769	0,026	1,385	1,242	0,081	0,038	0,043	6	3	305
AC-08	0,286	0,107	0,023	0,023	0,001	0,001	0,000	4	4	1
AC-09	1,694	0,700	1,756	0,436	0,494	0,151	0,342	28	35	71
AC-10	0,162	0,106	0,105	0,075	0,076	0,075	0,001	72	99	72
AC-11	0,903	0,880	3,783	3,259	1,091	0,900	0,191	29	28	124
AC-12	0,675	0,177	0,380	0,194	0,220	0,078	0,142	58	40	124

Tabla 6-13. Grado de explotación de los acuíferos. Fuente: CONIC-BF Ingenieros Civiles Consultores, 2013.

En los acuíferos superiores, de los sectores 1 al 7 (aguas arriba de Puclaro), casi no se produce recarga neta, lo que se explica porque casi no presentan explotación, ya sea porque no hay derechos o porque no hay necesidad de aguas subterráneas. Las zonas 1, 4, 6 y 7 prácticamente no usan los pozos que tienen, y las zonas 2 y 3 no tienen derechos de riego. Al encontrarse en la caja del río, y estar en estrecho contacto con él, estos acuíferos van casi siempre llenos. Las disponibilidades de recarga son en gran medida rechazadas. Las recargas netas en este sector llegan como máximo al 21% de la recarga disponible.

25. MIRALLES G., C. Evaluación de los factores que controlan la geoquímica de sedimentos fluviales de la cuenca del río Elqui, IV Región de Coquimbo. Memoria para optar al Título de Geología. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile. 2013.

El objetivo de esta memoria es caracterizar geográficamente la geoquímica de los sedimentos fluviales de la cuenca del río Elqui, determinar las variaciones químicas más importantes en el sedimento fluvial de los drenajes principales de la zona de estudio, estimar cuáles son los factores de control más importantes que influyen en la distribución geográfica de las concentraciones químicas encontradas en la zona de estudio y por último comparar las concentraciones químicas obtenidas de muestras de sedimento fluvial actual con las concentraciones obtenidas de muestras de terrazas fluviales.

En este trabajo se analiza la composición química de la fracción fina (<180µm) de 126 muestras de sedimento fluvial tomadas en los drenajes principales de la cuenca del río Elqui. A partir del análisis de estos datos, se divide la cuenca en cinco zonas geográficas con características geoquímicas diferentes. De estas cinco, el río Claro se encontraría dentro de la Zona 1 y el río Turbio dentro de la Zona 2.

Las muestras tomadas en la Zona 1 presentan altas concentraciones de C_{total}, Cd, K_2O, SiO_2, Be, HREE, LREE, Rb, Sn (Na_2O, U, Zn). Algunos de los factores que controlarían estos resultados geoquímicos son: Zona principalmente intrusiva, actividad agrícola, materia organiza asociada a los pozones de las partes altas de los ríos Cochiguás, Claro y La Laguna y la mineralización de Sn asociada al Batolito Elqui-Limarío las unidades Paleozoicas.

Como conclusión defiende que la geoquímica de la zona 1 estaría principalmente controlada por factores naturales, asociados a la litología de las unidades paleozoicas de la cuenca

(Batolito Elqui-Limarí, Complejo metamórfico El Cepo, formaciones Pastos Blancos, Matahuaico y Hurtado).

Las muestras de la Zona 2 presentan altas concentraciones de As, Cu, S_{total}, Tl, Bi, Cs, Ni, Se, Sr, Zn (Al_2O_3, Cd, Ga, Rb, SiO_2). Algunos de los factores que controlarían estos resultados geoquímicos son: Alteración hidrotermal y/o actividad minera, el cambio geomorfológico e hidrodinámico asociado a la Falla Vicuña y el embalse Puclaro como trampa de elementos asociados a minerales densos o de baja solubilidad.

Finalmente concluye que la Zona 2 estaría principalmente controlada por factores naturales, asociados a la mineralización presente en las zonas de alteración neógenas y a la erosión de depósitos lacustres ricos en As y S; y por factores antrópicos, dados por la intensa actividad minera desarrollada, principalmente, en el distrito El Indio. Véase la distribución en la **Figura 6-37**.

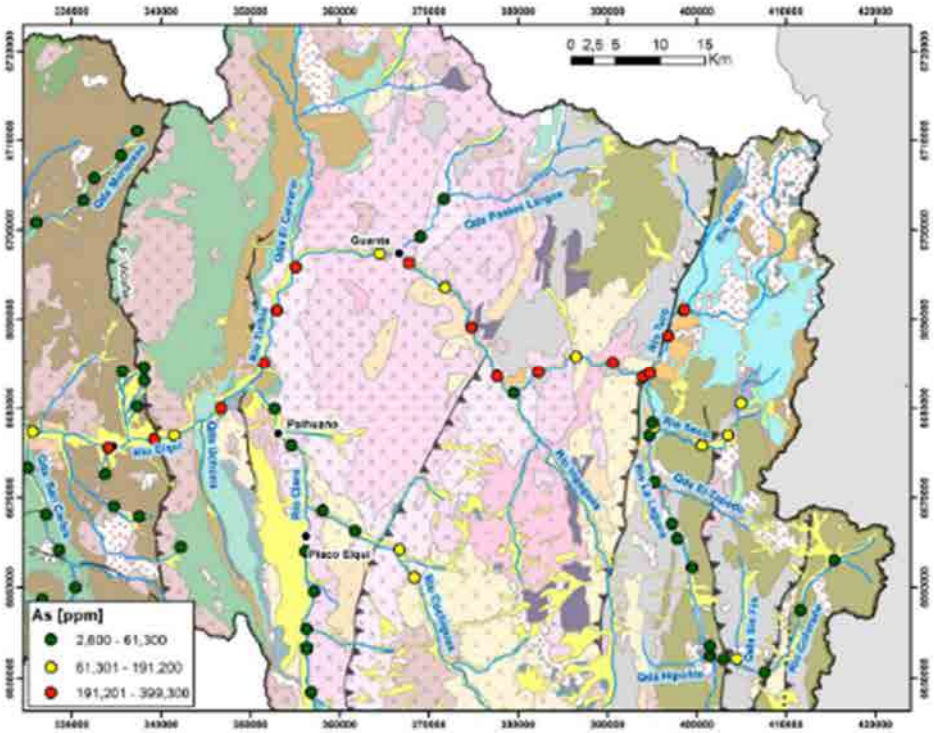


Figura 6-37. **Distribución de las concentraciones de As del río Claro y río Turbio. Fuente: Miralles, 2013.**

26. VILLA OLIVARES, E. Impacto del cambio climático sobre la disponibilidad del agua y sus efectos sobre los usos de agua en la cuenca del río Elqui. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Chile. 2013.

Este estudio determina el impacto del cambio climático sobre la disponibilidad de agua en la cuenca del río Elqui, desde el punto de vista de la oferta hídrica con respecto a la demanda. Las proyecciones se realizan con el modelo climatológico PRECIS, desarrollado por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile.

Se identifica y establece el impacto del cambio climático sobre los recursos hídricos superficiales en la cuenca. Se estima la oferta hídrica disponible actual y futura bajo escenarios de cambio climático. Se identifican y caracterizan los usos hídricos de interés actual y futuro. Se establece y proyecta la demanda con los efectos del cambio climático de los distintos usos hídricos seleccionados. Se realiza un diagnóstico y se pronostica la situación hídrica en la cuenca del río Elqui, como resultado del balance entre la oferta y demanda.

La cuenca del río Elqui, identificada por la DGA como la número 043 (DGA, 1997) está conformada por 4 subcuencas y 21 subcuencas. Las subcuencas son la del río Turbio (0430), río Claro (0431), Subcuenca Media (0432) y Baja (0433).

Los tributarios más importantes de la cuenca del rio Elqui nacen en la cordillera de los Andes, siendo éstos el río Turbio y el río Claro. El río Turbio se origina por la confluencia de los ríos Toro y La Laguna, a 1.370 msnm, recibiendo aportes del río Incaguaz 43 Km aguas arriba de Rivadavia. Su cuenca de drenaje es de 4.190 Km2. Por otro lado, el río Claro se origina en la confluencia del río Cochiguaz y el estero Derecho, a una altura de 1.223 msnm, con un área de 1.510 Km^2.

27. HUBLART, P, RUELLAND, D, DEZETTER, A, y JOURDE, H. Reducing structural uncertainty in conceptual hydrological modelling in the semi-arid Andes. Hidrology and earth system sciences, 2015

Este estudio buscó reducir la incerteza estructural que tienen los modelos conceptuales hidrológicos realizados a mesoescala en cuencas andinas, tomando para el análisis un período de 30 años (1982-2011). Para ello se combinaron múltiples hipótesis, en un esquema de evaluación multicriterio.

El estudio se aplicó sobre la subcuenca del río Claro en Rivadavia, que tiene una superficie de 1.515 Km^2, a partir de la que se definieron modelos digitales de elevación, precipitación y temperaturas medias anuales, tomando los datos desde 1982 hasta 2011. Muchas de las estaciones usadas en este estudio están localizadas fuera de la cuenca y por lo tanto no aparecen en los mapas presentados (**Figura 6-38**).

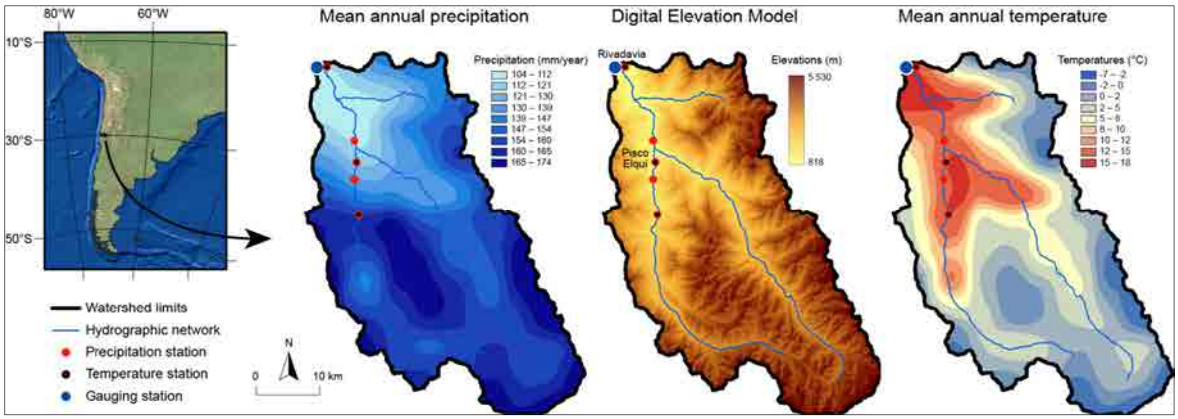


Figura 6-38. Cuenca río Claro, precipitación media anual, modelo de elevación digital y temperatura media anual. Fuente: Hublart *et al*., 2015.

La subcuenca del río Claro tiene características de semiárida y montañosa, localizada en la parte noreste de la región de Coquimbo y en la parte centro norte de Chile. Está caracterizada por elevaciones que varían desde los 800 msnm, a la salida de la cuenca en Rivadavia, hasta sobre los 5.500 msnm en la cordillera de Los Andes.

La topografía está dominada por una serie de bloques montañosos de borde de falla, con intercalación de valles con intensa pendiente. Las rocas de la zona son graníticas con edades que van desde el Pensilvaniano al Oligoceno y localmente se encuentran alteradas.

Sobre los 3.000 msnm las repetidas glaciaciones y la continua acción del congelamiento y descongelamiento a lo largo de los años, han causado una intensa meteorización de las rocas expuestas, dejando un paisaje de rocas desnudas y pedregales desprovisto de suelo. El material de relleno de los valles consiste principalmente en sedimentos aluviales no consolidados del Cuaternario, cubiertos por suelos poco potentes (<1 m) compuestos de texturas arenosas a franco arenosas.

El promedio anual de precipitación va desde un mínimo de 80 mm hasta un máximo de 190 mm. A grandes alturas, la sublimación juega un rol mucho más importante que la evapotranspiración. La tasa de sublimación media anual sobre 2 glaciares localizados en

cuencas vecinas y similares ha sido estimada en 1mm/día. Esto permite estimar una media anual de pérdida de 70 mm entre 2003 y 2011.

La descarga media anual por unidad de área varía desde un mínimo de 20 mm hasta un máximo de 140 mm (**Figura 6-39**). Curiosamente, el coeficiente de escorrentía excede 100% durante varios años en este período (2003, 2006, 2007 y 2009), indicando o bien una subestimación de la precipitación a grandes alturas, como lo sugerido por Favier et al. (2009), o una demora en la contribución del agua subterránea al flujo superficial de un año al otro (Jourde et al., 2011).

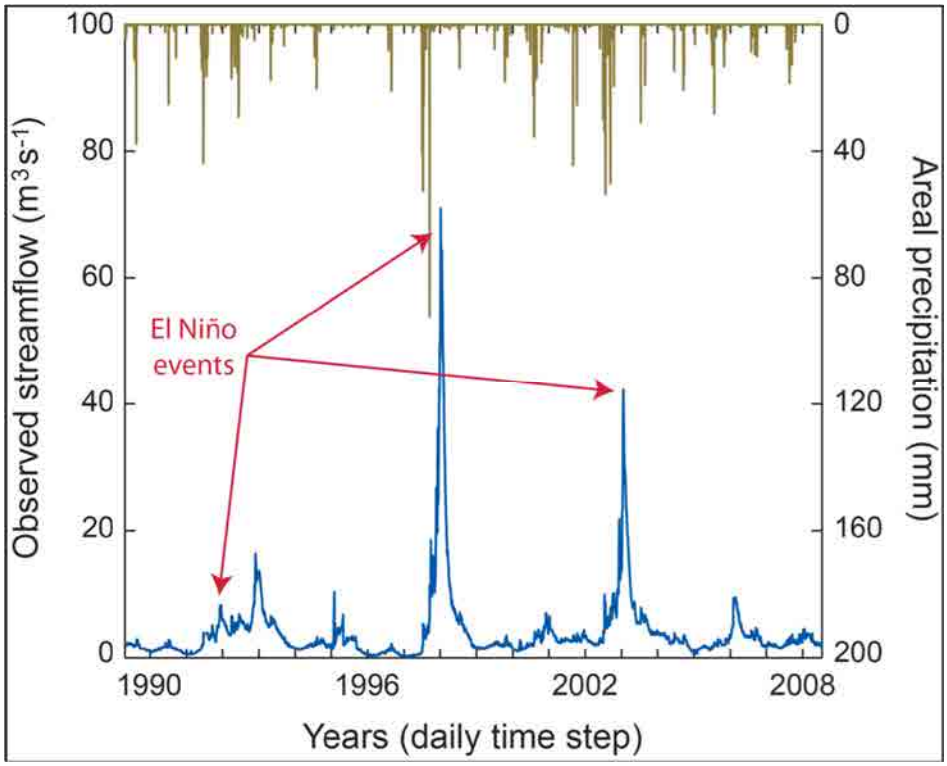


Figura 6-39. Variación interanual de la precipitación y escorrentía. Los valores del flujo son aquellos medidos a la salida de la cuenca antes de contabilizar las captaciones de agua. Los valores de precipitación son aquellos obtenidos después de una interpolación.

El movimiento del agua subterránea en la cuenca es principalmente desde los bloques de la montaña hacia los valles y luego hacia el norte, a lo largo del cauce del río. En las montañas, el flujo y el almacenamiento están controlados primariamente por la permeabilidad secundaria. Los acuíferos alojados en el relleno del valle (no confinados) reciben la recarga desde las montañas, aportando en los márgenes y por la infiltración a través del lecho del canal a lo largo de los tramos que pierden agua (Joude et al., 2011).

Su conductividad hidráulica y su espesor saturado poseen un rango desde los 10 m/d y 40 m, respectivamente en la parte alta de la cuenca hasta más de 30 m/d y 60 m, respectivamente en la desembocadura (CAZALAC, 2006). Esto permite una buena transferencia de agua entre río y acuífero. Los procesos y la dinámica de los flujos en la cabecera del río Turbio se conocen muy poco.

28.Dirección General de Aguas, Balance hídrico de Chile, 1988

En este documento se realiza en balance hídrico de todas las cuencas de Chile, presentando tablas con los valores de entradas y salidas del balance para la cuenca del río Turbio y Claro, el extracto de la tabla general del documento para las cuencas del río Turbio y río Claro se puede observar en la **Tabla 6-14.**

Cuenca	Superficie (Km^2)	Precipitación (mm/año)	Escorrentía (mm/año)	Evapotranspiración real (mm/año)
Río Claro Turbio en Varillar	4196	259	38.4	215.3
Río Claro en Rivadavia	1552	347	61.6	282.5

Tabla 6-14. Balance hídrico cuencas ríos Claro y Turbio. Fuente: DGA, 1988

Tal y como se muestra en la tabla la precipitación promedio en la cuenca del río Turbio es de 259 mm/año y la evapotranspiración real es de 215.3 mm/año, lo que quiere decir que se evapotranspira un 83,1 % de la precipitación total, para el caso del río Claro este porcentaje de evapotranspiración es de un 81.4 %.

El documento también presenta mapas de isoyetas, isotermas y líneas de isoevaporación y evapotranspiración. Las líneas isoyetas muestran que la precipitación aumenta con la altura, encontrándose por tanto las menores precipitaciones en los fondos de los valles y aumentando hacia la cordillera de los Andes. Dichos mapas, extraídos del documento original se muestran en la **Figura 6-41** y la **Figura 6-40.** Líneas isotermas e isoevaporación IV Región. Fuente: DGA, 1988

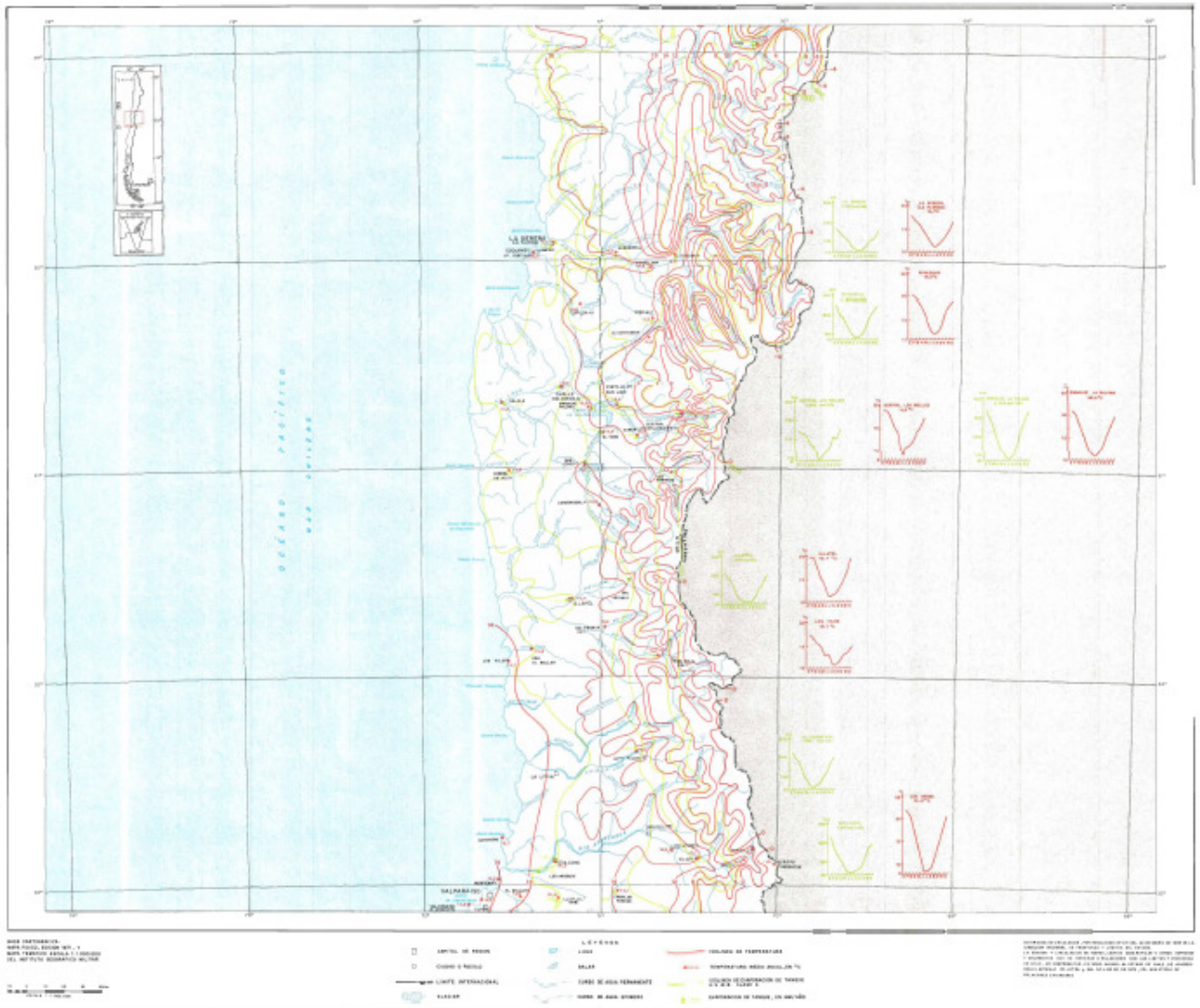


Figura 6-40. Líneas isotermas e isoevaporación IV Región. Fuente: DGA, 1988

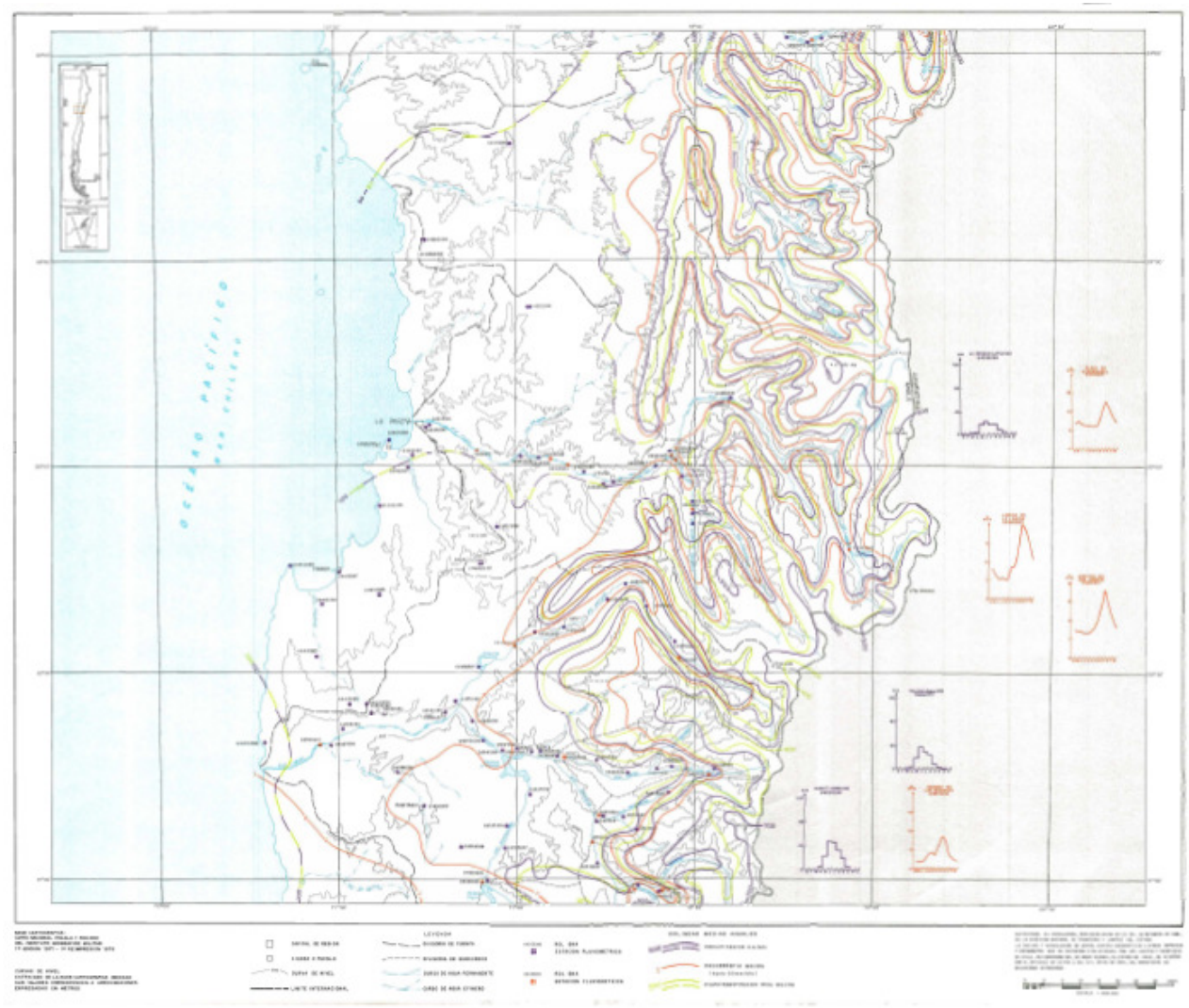


Figura 6-41. Líneas isoyetas e isoevapotranspiración IV Región. Fuente: DGA 1988

29. Melitta Fiebig-Wittmaack, César Pérez v & Emilio Lazo B. Aspectos Climáticos del valle de Elqui. 2008.

En este estudio se hace una caracterización climática del valle del Elqui, con respecto a la temperatura concluye que esta aumenta desde la costa hacia el interior del valle. La variabilidad diaria de la temperatura es menor en la costa que en el sector medio del valle.

El estudio indica que durante el verano se registra un promedio de 12 horas de sol, disminuyendo este promedio a 10 horas durante el invierno. Sobre la radiación solar se indica que en el sector medio del Valle de Elqui, los valores promedio de radiación global máxima ascienden a 1.100 W/m2 en verano y a 600 W/m2 en invierno.

El análisis de precipitaciones concluye que estas presentan una gran variabilidad interanual y se restringen sólo a los meses de invierno en el sector medio del Valle de Elqui, el rocío presenta una escasa variabilidad interanual y se registra durante todos los meses.

El estudio cifra la evapotranspiración real en un 65% de la precipitación anual promedio para la zonas de secano y en un 75% en áreas irrigadas.

6.2 CATASTRO DE CAPTACIONES Y MEDICIÓN DE NIVELES

Este numeral corresponde a la evaluación y análisis de las captaciones de agua subterránea existentes y puntos de observación en el sector de las subcuencas del río Turbio y del río Claro. Como parte de una de las actividades establecidas para la **Etapa I** del *Diagnóstico de Aguas Subterráneas en Acuíferos de la II y IV Región*, el análisis de las captaciones existentes se realiza a partir del **catastro público de aguas (CPA)**, base de datos disponible en el portal de la Dirección General de Aguas con información sobre los derechos de aprovechamiento de aguas a lo largo de Chile.

Inicialmente, se ha evaluado los **antecedentes de los derechos existentes** en el CPA para la IV región, concretamente en el sector de las subcuencas del río Turbio y río Claro. Al mismo tiempo, se ha evaluado los derechos de aprovechamiento pendientes de resolver y los denegados.

6.2.1 REVISIÓN DEL CATASTRO PÚBLICO DE DERECHOS DE LA IV REGIÓN

En la **Figura 6-42** se presenta la localización de todos los derechos de **agua subterránea** (Aprobados, Denegados y En Trámite) en el sector de las subcuencas del río Turbio y río Claro localizadas en la IV Región. Los expedientes de las solicitudes de derechos (Aprobados, Denegados y En Trámite) relacionados con el catastro público se presentan en el **Anexo 1**.

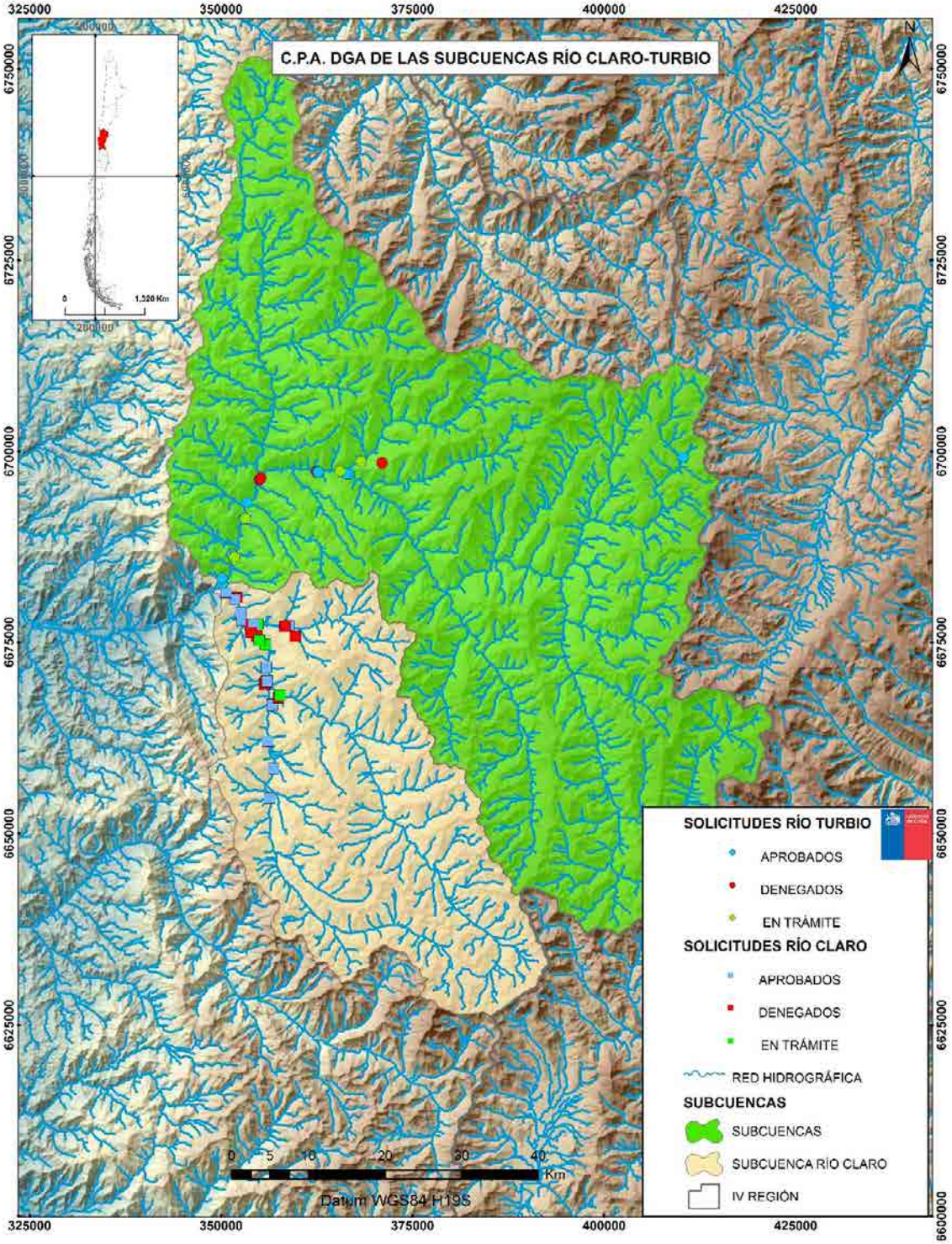


Figura 6-42. Captaciones existentes en el CPA de la DGA en las subcuencas del río Turbio y río Claro. Fuente: Dirección General de Aguas.

En la revisión del CPA se ha podido definir la existencia de 36 solicitudes de derechos de aprovechamiento de agua subterránea correspondientes a 36 expedientes para el sector de la subcuenca del río Claro y 23 solicitudes correspondientes a 23 expedientes para el sector de la subcuenca del río Turbio las cuales se han clasificado entre solicitudes denegadas, aprobadas y en trámite (**Tabla 6-15**).

Ámbito	Solicitados		Denegados		Aprobados		Pendientes/en trámite	
	Solicitudes	Q(L/s)	Expedientes	Q(L/s)	Expedientes	Q(L/s)	Expedientes	Q(L/s)
Río Claro	**36**	**460,9**	14	178,8	15	226,4	7	42,8
Río Turbio	**23**	**632,9**	7	286,0	9	186,9	7	145,0
TOTALES	**59**	**1.093,8**	**21**	**464,8**	**24**	**413,3**	**14**	**187,8**

Tabla 6-15. Solicitudes de derechos de aprovechamiento subterráneos del CPA en las subcuencas del río Claro y del río Turbio. Fuente: Dirección General de Aguas.

En total, entre el sector del río Claro y el sector del río Turbio, se ha solicitado históricamente un caudal de 1.093,8 L/s, aunque de estos, solo se han aprobado u otorgado su explotación 413,3 L/s. En trámite, quedan pendientes por resolver 187,8 L/s.

En relación al tipo de uso de los derechos otorgados existentes en las subcuencas de los ríos Claro y Turbio, se reparten entre Agua Potable, Riego, Industria y Minería, derechos definidos para cada uso en la **Tabla 6-16**.

Usos de los Derechos Aprobados (L/s)				
Ámbito	**Agua Potable**	**Riego**	**Industria**	**Minería**
Río Claro	87,5	88,9	0	50,0
Río Turbio	8,0	104,0	0	74,9
SUB-TOTALES	**95,5**	**192,9**	**0**	**124,9**
TOTALES	**413,3**			

Tabla 6-16. Uso de los derechos de aprovechamiento del CPA en las subcuencas del río Claro y del río Turbio. Fuente: Dirección General de Aguas.

6.2.2 REVISIÓN DE EXPEDIENTES DE SOLICITUDES OTORGADAS EN EL ÁREA DE ESTUDIO

Código	Nombre pozo	Propietario	Zona	Coordenadas (WGS 1984 19S)		Descripción pozo	Ensayo bombeo	Columna litológica
				Este (°/m)	Norte(°/m)			
M-4-233		HUGO ROJAS ASTUDILLO	Paihuano	351.798	6.680.668	No	No	No
ND-0401-1023	Sondaje 1382	COMITÉ DE A.P.R. CHAPILCA	Vicuña	352.970	6.691.098	Sí	No	Sí
ND-0401-1070		NORA AGUIRRE GALLEGUILLOS	Vicuña	366.733	6.697.055	No	Sí	No
ND-0401-1079		COMITÉ DE A.P.R. HORCON	Paihuano	356.888	6.658.485	Sí	No	Sí
ND-0401-1126		COMITÉ DE A.P.R. HORCON	Paihuano	356.379	6.654.599	No	No	No
ND-0401-148		AGROINDUSTRIAL DIAGUITAS LTDA	Paihuano	355.898	6.671.669	No	No	No
ND-0401-1672		CARLOS AGUIRRE DIAZ	Vicuña	366.392	6.697.080	No	No	No
ND-0401-1755		COMITÉ DE A.P.R. QUEBRADA DE PAIHUANO	Paihuano	358.854	6.677.117	Sí	No	Sí
ND-0401-1799		ALICIA DEL CARMEN TRONCOSO MUÑOZ	Paihuano	356.707	6.666.915	No	No	No
ND-0401-1800		ALICIA DEL CARMEN TRONCOSO MUÑOZ	Paihuano	356.735	6.666.839	No	No	No
ND-0401-1801		ALICIA DEL CARMEN TRONCOSO MUÑOZ	Paihuano	356.695	6.666.703	No	No	No
ND-0401-2202		COMITÉ DE AGUA POTABLE RURAL VARILLAR	Vicuña	351.414	6.686.543	Sí	No	Sí
ND-0401-250	PW-1	COMPAÑIA MINERA EL INDIO	Vicuña	410.360	6.699.265	Sí	Sí	Sí
ND-0401-2566	Pozo 2	ASESORIAS SERVICIOS E INVERSIONES INCIENSO LTDA	Paihuano	352.712	6.677.792	Sí	Sí	Sí
ND-0401-2697		AGRICOLA BELLAVITA S.A.	Paihuano	355.828	6.669.754	No	No	No
ND-0401-316	GREZ 1	KARIN JANDER CAMELIO	Vicuña	362.698	6.697.318	Sí	Sí	Sí
ND-0401-381		AGRICOLA ENTRE RIOS LTDA	Vicuña	350.198	6.682.768	Sí	Sí	Sí
ND-0401-388	N°1 Viejo	EMPRESA DE SERVICIOS SANITARIOS DE COQUIMBO S.A.	Paihuano	354.235	6.677.358	Sí	Sí	Sí
ND-0401-405		EMPRESA NACIONAL DE EXPLOSIVOS S.A. (ENAEX S.A.)	Vicuña	350.145	6.683.430	Sí	Sí	No
ND-0401-769		COMITÉ DE A.P.R. SISTEMA LA JARILLA DE PISCO ELQUI	Paihuano	356.024	6.669.898	No	No	No

Código	Nombre pozo	Propietario	Zona	Coordenadas (WGS 1984 19S)		Descripción pozo	Ensayo bombeo	Columna litológica
				Este (°/m)	Norte(°/m)			
ND-0401-770		COMITÉ DE A.P.R. SISTEMA LA JARILLA DE PISCO ELQUI	Paihuano	356.060	6.662.025	No	No	No
NR-0401-124		AGRICOLA EL CHAÑAR	Vicuña	353.424	6.693.348	No	No	No
NR-0401-161		ANDRES URETA CASTRO	Paihuano	352.585	6.678.984	No	No	No
NR-0401-161		ANDRES URETA CASTRO	Paihuano	350.689	6.681.571	No	No	No

Tabla 6-17. Listado de los expedientes encontrados en la zona de estudio y descripción de la información que contienen. Fuente: elaboración propia.

Estos documentos se han analizado y se ha extraído información como ensayos de bombeo, columna litológica y perfil del pozo ubicados principalmente en la zona de Paihuano y río Turbio. La información encontrada es variable según el expediente y con una representatividad sesgada respecto al conjunto de la cuenca. En el **Anexo 3.2.** se muestra la información más relevante extraída de los antecedentes.

6.2.3 CAMPAÑA DE MEDICIÓN DE NIVELES

En los alcances de la **Etapa I** se comprometió la realización de una campaña de terreno con el objetivo de realizar un primer levantamiento de los valores de las profundidades de los niveles en diferentes puntos de observación de agua subterránea en el sector de estudio de la subcuenca del río Claro y río Turbio. Durante el mes **Noviembre de 2015**, se realizó la campaña de terreno para evaluar el estado de los niveles piezométricos y las características de las captaciones existentes en los diferentes puntos a lo largo de todo el ámbito de estudio.

En esta campaña de terreno se caracterizaron puntos de observación existentes y accesibles, con el objetivo de tener un marco referencial para la generación del Modelo Conceptual Hidrogeológico en las posteriores etapas del informe.

Una segunda campaña de terreno se realizó el mes de **Enero de 2016** con el objetivo de medir el nivel en aquellos puntos donde en la anterior campaña no se pudo. Durante la campaña se revisaron todos los puntos del Catastro Público pudiendo revisar y crear una ficha de todos ellos.

Como contexto, se presenta la **Figura 6-43** dónde se puede observar la ubicación de todos los puntos visitados durante la campaña de terreno.

Con los datos levantados en terreno se generaron fichas técnicas descriptivas de cada uno de los puntos visitados, las cuales se adjuntan como catastro de puntos de observación en el **Anexo 2.** En la **Tabla 6-18** se presentan las características de todos los puntos visitados y encontrados.

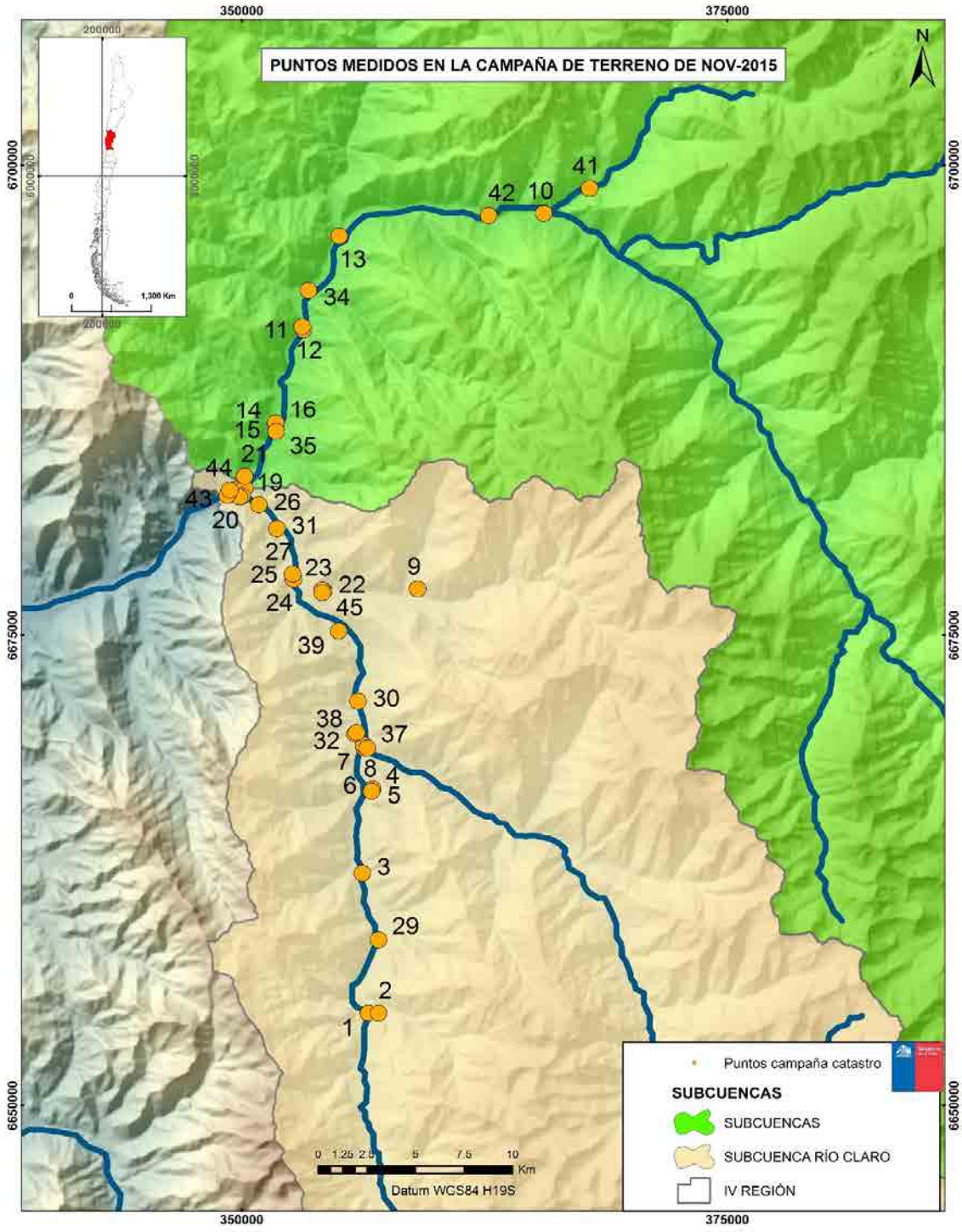


Figura 6-43. Puntos Visitados en la Campaña de Terreno de Nov-2015. Fuente: elaboración propia.

N	Coord. UTM Este_WGS84 (m)	Coord.UTM Norte_WGS84 (m)	Cota Terreno Z (msnm)	Nombre	Fecha visita	Prof. Nivel Piez. (m)	Nivel Piez. (msnm)
1	356.528,00	6.654.903,00	1.667,5	APR Horcón	17-11-2015	1,50	1.666,00
2	357.043,00	6.654.904,00	1.442,4	APR Horcón 2	17-11-2015	1,70	1.440,70
3	356.210,00	6.662.325,00	1.314,0	APR La Jarilla-Pisco Elqui	17-11-2015	1,90	1.312,10
4	356.731,00	6.666.843,00	1.193,9	Alicia Troncoso	17-11-2015	0,20	1.193,70
5	356.729,00	6.666.847,00	1.215,0	Alicia Troncoso 2	17-11-2015	0,20	1.214,80
6	356.689,75	6.666.709,72	1.199,4	Alicia Troncoso 3	17-11-2015	0,10	1.199,30
7	356.299,04	6.668.998,38	1.109,7	APR Horcón **	17-11-2015	1,80	1.107,90
8	356.278,97	6.669.154,05	1.110,5	Hector Arce	17-11-2015	12,10	1.098,40
9	359.056,00	6.677.448,00	1.442,0	Quebrada Paihuano	17-11-2015	0,10	1.441,90
10	365.554,00	6.697.436,00	1.218,0	APR Huanta	18-11-2015	21,20	1.196,90
11	353.187,00	6.691.243,66	946,2	APR Chapilca	18-11-2015	-	946,20
12	353.120,42	6.691.399,69	946,5	APR Chapilca 2	18-11-2015	15,30	931,20
13	355.018,62	6.696.228,74	1.029,0	Bocalume	18-11-2015	-	1.029,00
14	351.750,87	6.686.220,51	876,7	APR Varillar	18-11-2015	40,30	836,50
15	351.750,05	6.686.224,27	877,1	APR Varillar 2	18-11-2015	40,20	837,00
16	351.747,00	6.686.254,20	872,3	APR Varillar 3	18-11-2015	37,40	834,90
17	349.628,27	6.682.727,75	813,7	APR Rivadavia	18-11-2015	11,20	802,60
18	350.167,23	6.682.797,63	827,6	Uni Agri	18-11-2015	-	827,60
19	350.027,01	6.682.375,88	823,8	Inversiones del Pacífico (wanda)	18-11-2015	19,90	803,90
20	349.879,33	6.682.329,19	818,2	Inversiones del Pacífico (wanda) 2	18-11-2015	16,50	801,60
21	350.150,60	6.683.424,14	845,3	Estancia San Juan	18-11-2015	41,10	804,20
22	354.221,45	6.677.343,33	1.010,4	Aguas del Valle	19-11-2015	11,30	999,10
23	354.143,39	6.677.379,41	1.003,0	Aguas del Valle 2	19-11-2015	9,20	993,80
24	352.662,43	6.677.957,71	897,6	Agrícola tres vias	19-11-2015	12,00	885,60
25	352.624,24	6.678.231,43	887,7	Agríloca tres vias 2	19-11-2015	12,00	875,70
26	350.885,28	6.681.906,99	826,0	Fundo San Guillermo	19-11-2015	4,50	821,40
27	352.624,24	6.678.231,43	887,7	Agríloca tres vias 2	12-01-2016	12,00	875,70
28	Sin dato	Sin dato	Sin dato	Andrés Ureta Castro	12-01-2016	Sin dato	Sin dato
29	357.038,00	6.658.785,00	1.448,0	APR Horcón	12-01-2016	.	Sin dato
30	355.989,00	6.671.489,00	1.052,0	Agrícola Copequen	12-01-2016	1,00	1.051,00
31	351.809,00	6.680.651,00	854,0	Hugo Rojas Astudillo	12-01-2016		854,00

N	Coord. UTM Este_WGS84 (m)	Coord.UTM Norte_WGS84 (m)	Cota Terreno Z (msnm)	Nombre	Fecha visita	Prof. Nivel Piez. (m)	Nivel Piez. (msnm)
32	355.828,00	6.669.753,00	1.143,0	Agrícola Bellavita	13-01-2016	Sin dato	Sin dato
33	Sin dato	sin dato	sin dato	Karin Jander Camelio	13-01-2016	Sin dato	Sin dato
34	353.438,00	6.693.339,00	993,0	Agrícola Chañar	13-01-2016	22,70	970,30
35	351.769,00	6.685.795,00	873,0	Sendos IV Región	13-01-2016	Sin dato	Sin dato
36	sin datos	sin datos	sin datos	sin datos	13-01-2016	Sin dato	Sin dato
37	356.460,00	6.668.995,00	1.118,0	Agrícola Bellavita	13-01-2016	Sin dato	Sin dato
38	355.922,00	6.669.821,00	1.141,0	Agrícola Bellavita2	13-01-2016	33,92	1.107,08
39	354.990,00	6.675.206,00	978,0	Sociedad Agrícola Chañar Blanco	13-01-2016	5,27	972,73
40	Sin dato	sin dato	sin dato	Sendos IV Región	13-01-2016	Sin dato	Sin dato
41	367.916,00	6.698.754,00	1.497,0	APR Huanta	14-01-2016	Sin dato	Sin dato
42	362.701,00	6.697.321,00	1.173,0	Agrícola Agromoba ltda.	14-01-2016	Seco	sin dato
43	349.258,00	6.682.406,00	859,0	DGA Rivadavia 1	14-01-2016	4,67	854,33
44	349.384,00	6.682.682,00	824,0	DGA Rivadavia 2	14-01-2016	Sin dato	Sin dato
45	354.150,00	6.677.239,00	1.022,0	Antiguo pozo Paihuano	14-01-2016	16,04	Sin dato

** Pozo conectado al río. Captación de agua superficial.

Tabla 6-18. Ubicación de Pozos y niveles medidos durante las campañas de terreno de Noviembre de 2015 y Enero de 2016 en la zona del río Claro- Turbio. Fuente: elaboración propia.

La información levantada en terreno se cruzó con la información registrada en el catastro público de aguas con el objetivo de realizar una comparativa del caudal otorgado *vs* caudal medido en terreno (**Tabla 6-19**).

Subcuenca río Claro				
Q (L/s)	**Q otorgado**	**Q otorgado-medido**	**Q solicitado**	**Q medido en terreno**
Aprobados	**226,4**	**222,4**		**72,1**
Pendientes/en trámite			**42,8**	**30,8**
Subcuenca río Turbio				
Q (L/s)	**Q otorgado**	**Q otorgado-medido**	**Q solicitado**	**Q medido en terreno**
Aprobados	**186,9**	**35**		**2,8**
Pendientes/en trámite			**145,0**	**2,0**

Tabla 6-19. Comparativa caudal otorgado registrado en el CPA vs caudal medido en terreno. Fuente: elaboración propia.

En la subcuenca del río Claro se encontró un caudal total otorgado para agua subterránea de 226,4 L/s de los cuales, según el registro tomado en terreno, actualmente se están explotando un total de 72,1 L/s. Por otro lado se observó que usuarios con solicitudes en trámite, están explotando un total de 30,8 L/s.

En el caso de la subcuenca del río Turbio se sigue buscando información para un próximo informe la información del caudal explotado en todos los puntos. De los 9 usuarios con derechos otorgados en la cuenca, únicamente en 4 puntos se ha podido saber con certeza el caudal explotado. En términos de caudal, de los 186,9 L/s otorgados en la cuenca, 35 L/s corresponderían a los 4 usuarios citados anteriormente. Según la información levantada en terreno los cuatro usuarios sumarían un caudal de explotación de 2,8 L/s. Por otro lado, los usuarios con solicitudes en trámite, están explotando un total de 2,0 L/s.

Al caudal explotado por usuarios con derechos otorgados y en trámite, habría que sumarle el caudal explotado por algunos usuarios que no constan en el CPA (**Tabla 6-20**).

Usuarios NO registrados en el CPA		
	Q medido en terreno (L/s)	**n° puntos captación**
Subcuenca río Claro	**77**	**9**
Subcuenca río Turbio	**0**	**1**

Tabla 6-20. Caudal explotado por usuarios no registrados en el CPA. Fuente: elaboración propia.

Se han registrado un total de 10 usuarios que no están registradas en el CPA de las cuales 9 se encuentran en la cuenca del río Claro y 1 en la cuenca del río Turbio. Únicamente, algunos de los usuarios de la cuenca del río Claro hacen uso de las captaciones explotando un total de 77 L/s.

Como conclusión de esta sección y con el objetivo de evaluar el estatus actual de la explotación de los recursos subterráneos en esta zona se pueden concluir que:

1. En la subcuenca del río Claro hay otorgado un total de 226,4 L/s y actualmente se explota un total de 179,9 L/s sumando el caudal extraído por los usuarios con derechos otorgados y en trámite (Tabla 6-19) y los usuarios no registrados (Tabla 6-20).

2. En la subcuenca del río Turbio la situación es distinta al no tener información del caudal explotado en todos los puntos. No obstante, el caudal explotado medido en terreno en los puntos con derechos otorgados, muestra valores inferiores al caudal otorgado registrado en el CPA.

Toda la información referente a la comparativa entre el Catastro Público de Aguas y la información levantada en terreno se muestra en el **Anexo 2.1**.

6.3 CARACTERIZACIÓN GEOMORFOLÓGICA

6.3.1 DESCRIPCIÓN GENERAL

El marco geomorfológico de la Región de Coquimbo describe el segmento andino chileno comprendido como formado por 4 unidades morfoestructurales principales, dispuestas en franjas orientadas norte – sur (**Figura 6-44**). De oeste a este estas son:

1. Franja Litoral
2. Cordillera de la costa
3. Media Montaña
4. Alta Cordillera

La definición de estas grandes unidades de relieve la describe Paskoff (1970) como:

> **a) Franja Litoral.** Unidad de altura y ancho variable, fluctuando este último parámetro entre algunos centenares de metros y decenas de kilómetros. Se caracteriza por la presencia de una serie de terrazas marinas (generalmente tres), labradas sobre rocas de diversos tipos (rocas metamórficas, granitos y areniscas recientes poco consolidadas).
>
> **b) Cordillera de la Costa**. Cadena montañosa más próxima al mar, compuesta por cerros que rara vez sobrepasan los 2.000 msnm.
>
> **c) Media Montaña.** Cadena discontinua con cumbres que alcanzan alturas variables entre los 1.000 y 3.000 msnm. Se desarrolla aproximadamente hasta los 70°45’ W, dando paso a la Alta Cordillera hacia el este.
>
> **d) Alta Cordillera**. Cadena elevada y maciza, cuyas cumbres sobrepasan los 4.000 msnm, con alturas máximas que superan los 6.000 msnm. En esta unidad se observan vestigios de la acción reciente de glaciares y es donde se identifican las mayores pendientes.

Además, en el segmento comprendido entre los 29° S y 30° S se desarrollan morfologías conocidas como los Valles Transversales, que corresponden a valles fluviales que en sus cursos inferiores escurren de este a oeste y aguas arriba se ramifican formando una red de

tributarios dendríticos, que escurren en varias direcciones. En su parte superior (3.000-3.500 msnm) poseen un perfil transversal en "U" que los derrumbes activos y los coluvios no han llegado a obstruir. A veces, en sus cursos medios presentan anchos mayores, tomando el aspecto de pequeñas cuencas interiores.

En particular, la sub-cuenca del Elqui Alto se emplaza en la Región de Coquimbo constituyendo una sub-cuenca exorreica definida en la Cuenca del Río Elqui (DGA, 1987), la cual está formada por las sub-cuencas del Río Turbio y del río Claro. Estas subcuencas se emplazan en las unidades geomorfológicas de Cordillera Andina de Retención Crionival y Cordones o Valles Transversales, con cursos fluviales característicos de un discurrimiento de este a oeste, formados por una red de tributarios dendríticos.

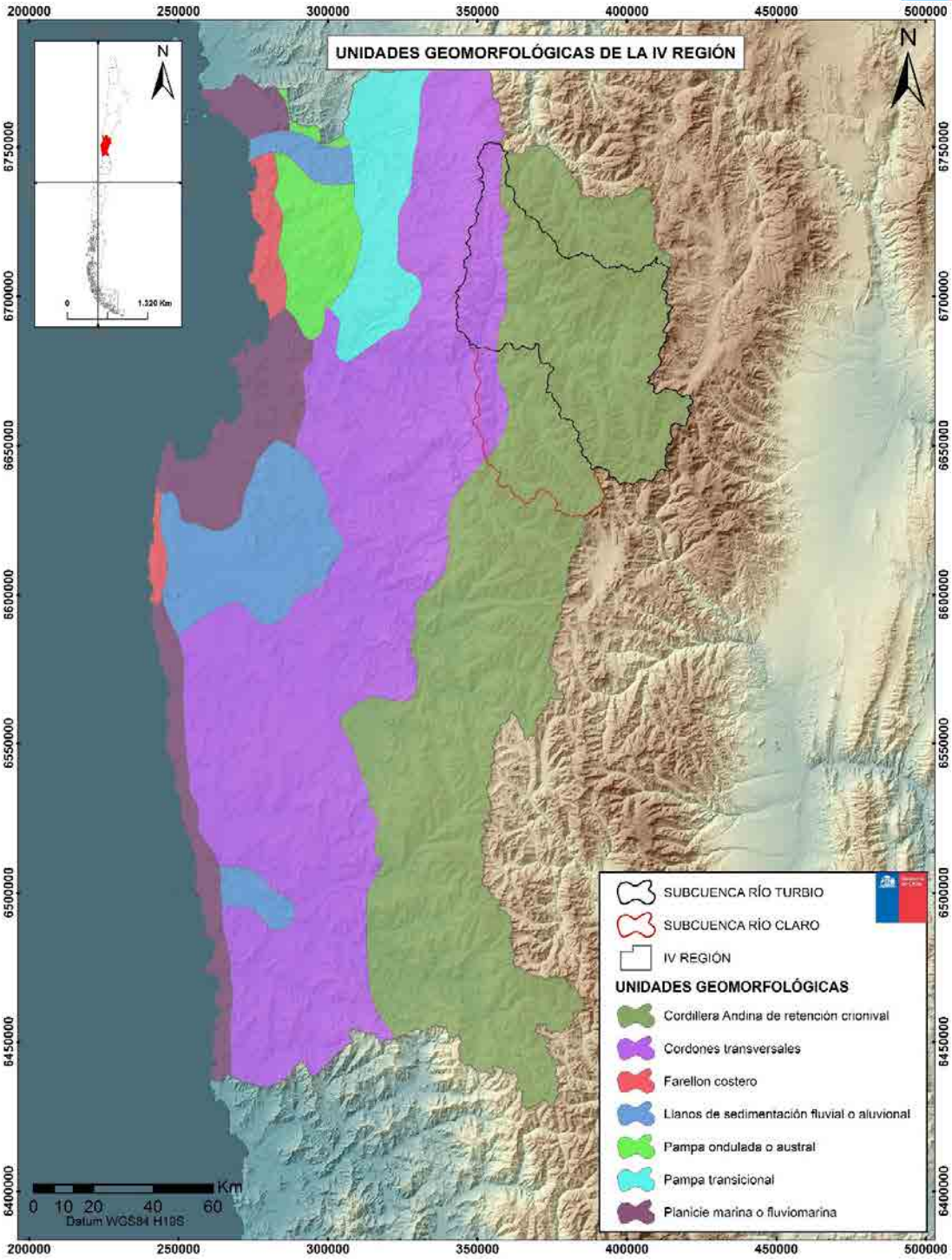


Figura 6-44. Unidades Geomorfológicas de la Región de Coquimbo. Fuente: Ministerio de Obras Públicas, 2015

6.3.2 DELIMITACIÓN CUENCAS Y SUBCUENCAS

En este numeral se detalla la metodología y se explica el proceso llevado a cabo para la delimitación en la Región de Coquimbo de la geometría específica de las subcuencas del río Claro y del río Turbio, obteniendo sus respectivas áreas y la longitud de los drenajes y quebradas principales mediante un sistema de información geográfica.

A partir de un modelo digital del terreno (DEM) de 30 m de pixel perteneciente a la Región de Coquimbo, obtenido desde el servicio ASTER GDEM del METI y la NASA, se han aplicado diferentes tratamientos matemáticos para la obtención de la red de drenaje principal de toda la región. Depurando las imperfecciones existentes del propio modelo digital de elevaciones, en primera instancia se define las principales direcciones de flujo del ámbito de estudio. En la **Figura 6-45** se presenta el DEM cuyas características se describen en la **Tabla 6-21.**

Área del DEM para la Región de Coquimbo (90 m de pixel)		**Área del DEM para las subcuencas río Claro y Turbio (30 m de pixel)**	
Límite Norte	UTM Norte: 6.789.396,5	Límite Norte	UTM Norte: 6.815.880,32
Límite Sur	UTM Norte: 6.424.207,5	Límite Sur	UTM Norte: 6.579.314,56
Límite Este	UTM Norte: 424.715,7	Límite Este	UTM Este: 506.502,19
Límite Oeste	UTM Norte: 230.566,8	Límite Oeste	UTM Este: 248.020,89

Tabla 6-21. Coordenadas características del DEM de la Zona de Estudio. Fuente: elaboración propia

La depuración del Modelo Digital de Elevación permite determinar el número de celdas aguas arriba vertientes sobre cada una de las celdas inmediatamente aguas abajo. Este análisis genera la diferenciación de celdas de acumulación con las cuales se caracteriza la red de drenaje de la cuenca de estudio. En la **Figura 6-46** se muestra un detalle ejemplo de la red de drenaje obtenida a partir del DEM para el sector de los ríos Claro y río Turbio.

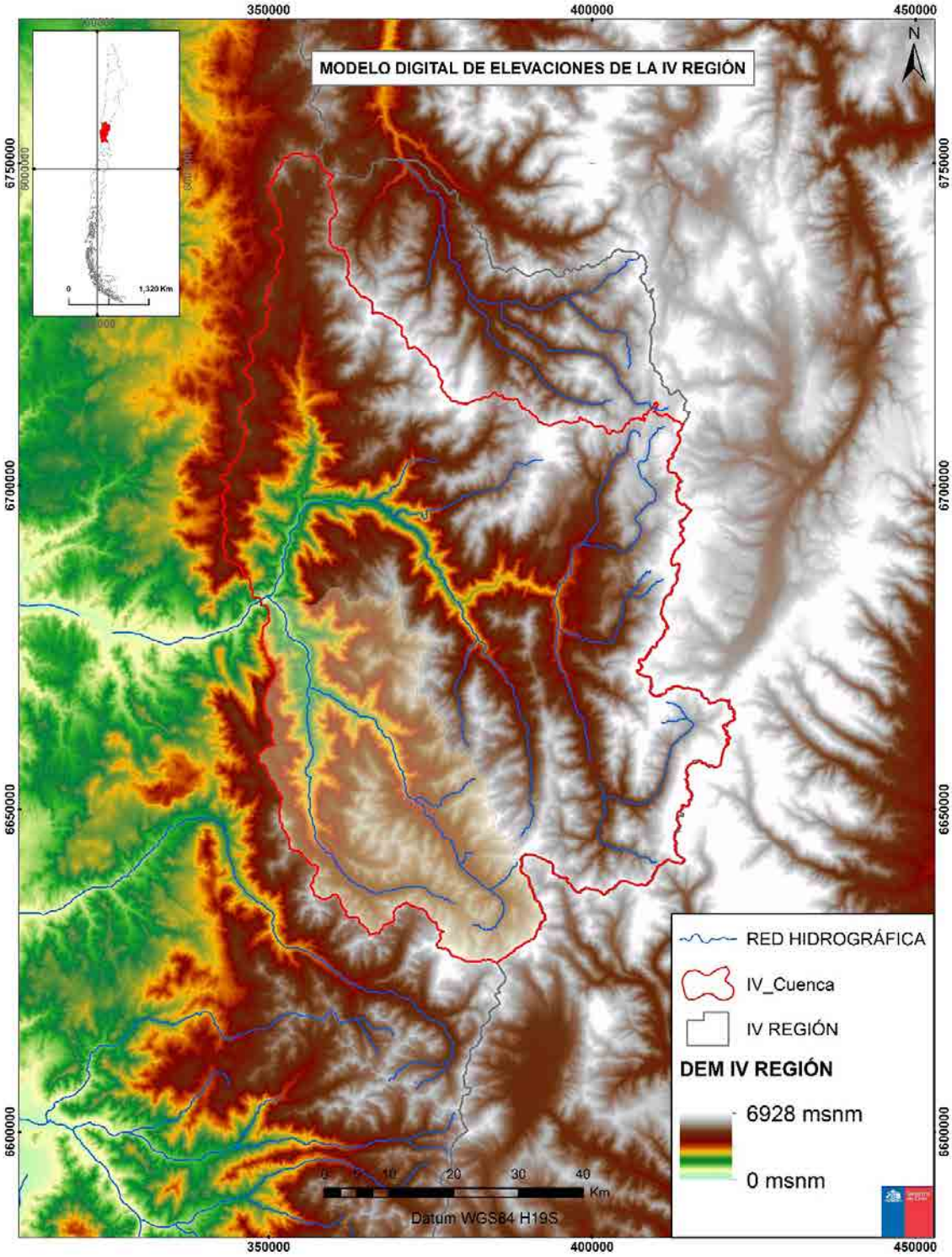


Figura 6-45. DEM descargado de ASTER GDEM para la Región de Coquimbo. Fuente: METI y NASA

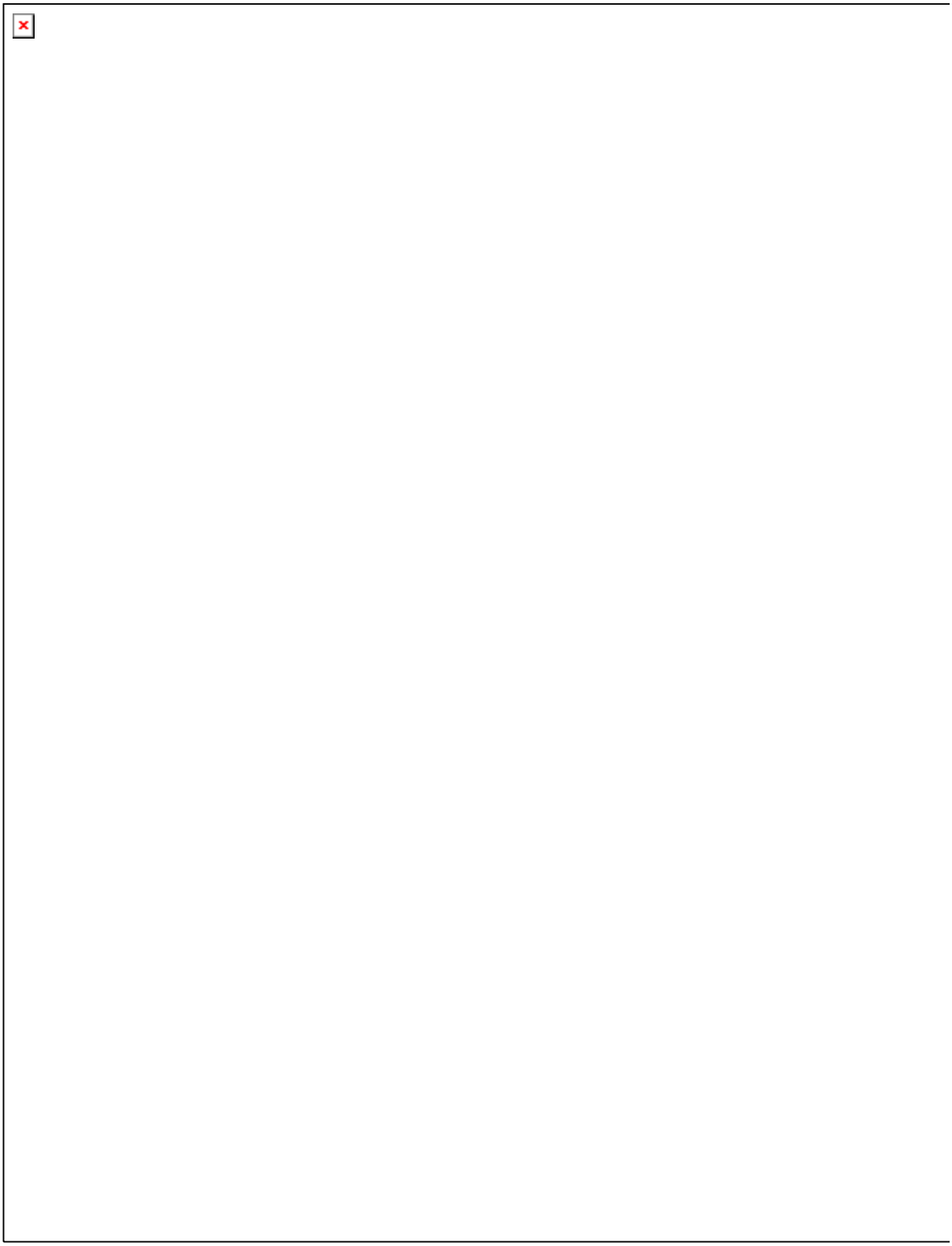


Figura 6-46. Red de drenaje generada a partir del DEM para el río Turbio y río Claro. elaboración Propia

La definición de la red de drenaje permite realizar la delimitación automática de cuencas hidrográficas, o dicho de otra forma, definir las áreas (829 áreas) relacionadas con drenajes de diferentes órdenes asignando un orden numérico a los enlaces de la red. Con esta definición, se han generado las sub-subcuencas de la zona de estudio las cuales se presentan en la **Figura 6-47**.

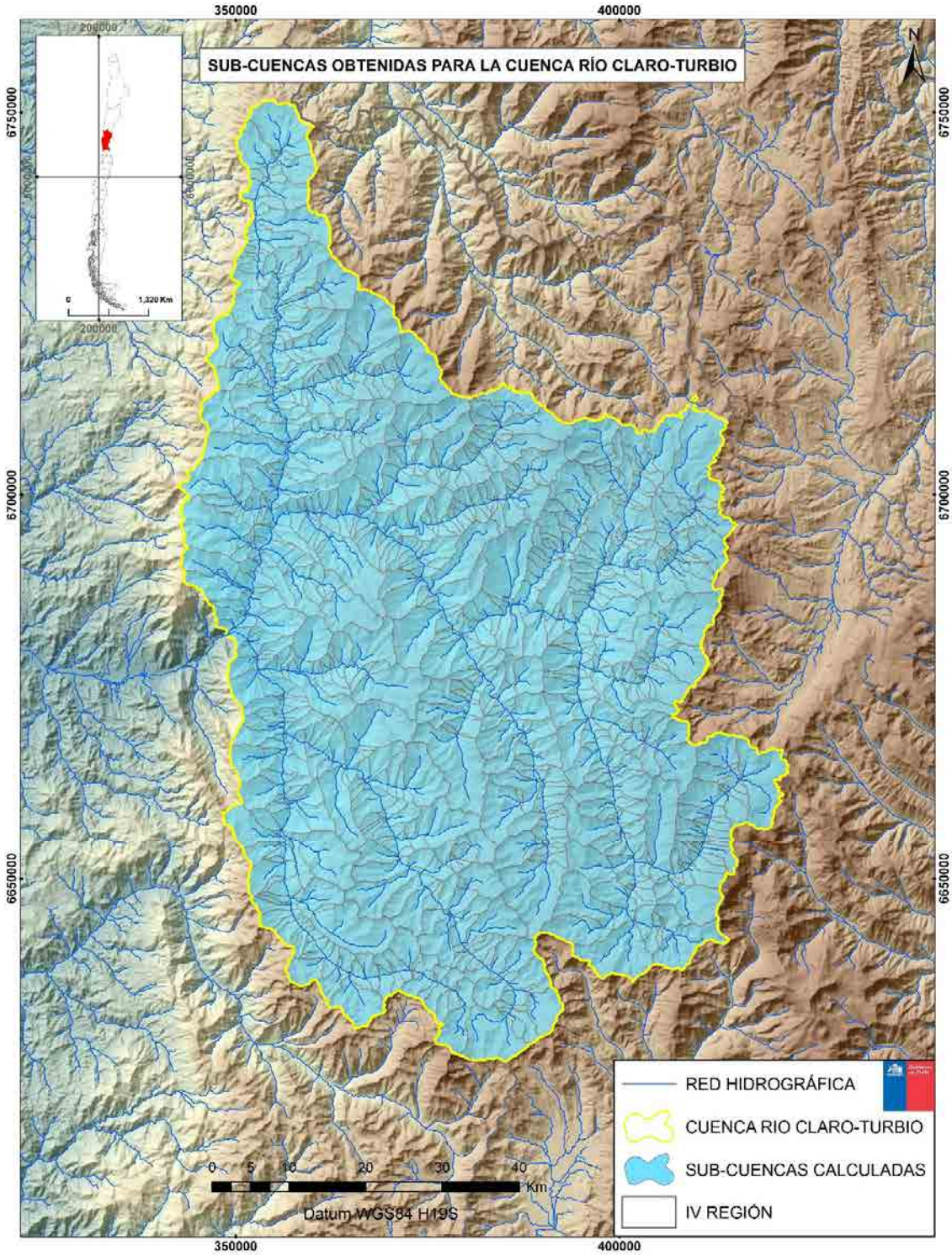


Figura 6-47. Sub-Subcuencas generadas para el río Turbio y río Claro. elaboración Propia

6.3.3 DEFINICIÓN DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA

La generación de las sub-subcuencas del sector definido por las subcuencas del río Claro y río Turbio ha permitido definir dos subcuencas discretizadas para cada uno de los ríos, características de las cuales se presentan en la **Tabla 6-22**.

CUENCA	CÓDIGO CUENCA	CÓDIGO SUBCUENCA	SUBCUENCA	ÁREA SUBCUENCA HISTÓRICA (Km^2)	ÁREA SUBCUENCA PROPUESTA (Km^2)
RÍO ELQUI	043	04308001	RÍO TURBIO	4.156	4.123
		04314002	RÍO CLARO	1.523	1.516
			TOTAL	**5.679**	**5.639**

Tabla 6-22. Definición de las Subcuencas del río Claro y río Turbio. Fuente: elaboración Propia

Con el análisis geomorfológico realizado, se ha redefinido la cuenca existente tanto para el río Claro como para el río Turbio. En la **Figura 6-48** se muestra la redefinición de las subcuencas del río Claro y río Turbio, donde los bordes negros son el límite antiguo de las subcuencas y el borde amarillo representa la nueva delimitación.

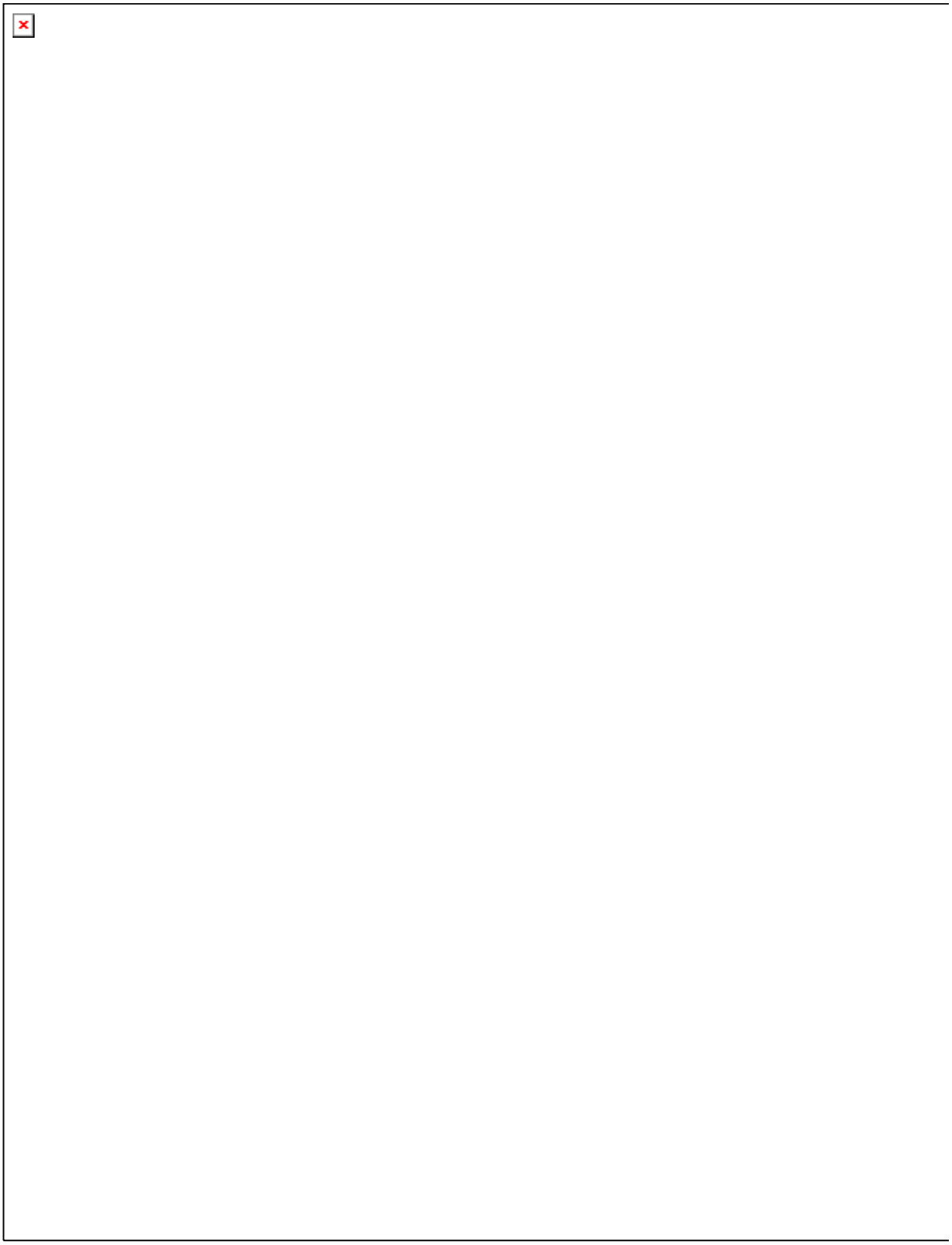


Figura 6-48. Redefinición del límite de la cuenca del río Claro y Turbio. Fuente: elaboración Propia

6.4 ANÁLISIS DE VARIABLES HIDROMETEOROLÓGICAS

En este numeral, se presenta la información analizada para el estudio de precipitaciones, temperaturas, evaporación y caudales de las cuencas objeto de estudio en la IV Región.

Todos los datos meteorológicos han sido obtenidos en la red de monitoreo hidrometeorológico de la Dirección General de Aguas. Las estaciones meteorológicas de las cuales se han obtenido los datos, se han seleccionado en función de características geográficas, de la cantidad y calidad de datos disponibles.

A modo de resumen, se puede indicar lo siguiente de cada una de las variables estudiadas en el presente numeral:

- **Precipitación:** De la observación de los promedios mensuales de las series, se desprende, que estos muestran una marcada estacionalidad. En el caso de la precipitación, los máximos ocurren en el periodo junio- agosto y los mínimos, casi cero, ocurren en el periodo noviembre – febrero, esto se puede observar en toda el área de estudio. El valor medio anual de la precipitación en toda el área varía entre 70 y 159 mm/año.
- **Temperatura:** La temperatura promedio anual, al contrario que la precipitación disminuye con la altura, en un gradiente de -0,41°C por cada 100 m de altitud, encontrando máximos en las zonas bajas de los valles (14°C - 19°C) y mínimos en las cumbres de las montañas circundantes, alcanzado temperaturas mínimas cercanas a -3° C en algunos puntos. Su patrón de variación mensual es inverso al de las precipitaciones, con máximos en los meses de verano (diciembre – febrero) y mínimos en invierno (junio – agosto).
- **Análisis de caudales:** El análisis de caudales se ha realizado en base a seis estaciones fluviométricas y se ha seleccionado un intervalo de tiempo de 32 años que va desde el 1983 hasta 2015. El patrón mensual de caudales muestra que los ríos siguen un régimen de alimentación nival con máximos en los meses de primavera-verano (diciembre – enero) y mínimos de forma casi continua en los meses de abril a agosto. A nivel global, el caudal máximo mensual se promedia en el mes de diciembre en la estación "Río Elqui en Algarrobal", con 21,23 m^3/s y caudal mínimo se promedió en la estación "Rio Toro antes junta Rio La Laguna" con un valor de 0,59 m^3/s en el mes de junio.

6.4.1 PRECIPITACIONES

Las precipitaciones en la cuenca objeto de estudio son monitoreadas por una serie de estaciones, las cuales se encuentran tanto dentro del área de estudio como en las zonas aledañas.

Las estaciones utilizadas en el análisis de precipitaciones fueron seleccionadas en base a su ubicación geográfica y el periodo de registros disponible.

Inicialmente se evaluaron un total de 14 estaciones, de las cuales, 4 están dentro de la cuenca del río Turbio (Huanta, Juntas, La Laguna, Molino Yaco), 5 en la cuenca del río claro (Cochiguaz, Los Nichos, La Ortiga, Monte Grande y Pisco Elqui) y 4 en la cuenca del río Elqui (Almendral, La Serena, Vicuña y Rivadavia).

Además de las anteriores, también se tuvo en cuenta la estación de Pabellón, la cual se encuentra en la cuenca vecina del río Hurtado.

La estación de Cerro Olivares, en la cabecera del río Turbio, no llego a ser evaluada por no encontrarse datos de precipitaciones dentro del registro de la Dirección General de Aguas.

Las coordenadas y altitud de cada una de las estaciones se pueden observar en la **Tabla 6-23**.

Estación	UTM* Este (m)	UTM* Norte (m)	Elevación (msnm)	Cuenca
Cochiguaz	364.495	6.664.334	1.560	Río Claro
Los Nichos	355.486	6.663.573	1.330	Río Claro
Monte Grande	355.830	6.669.982	1.120	Río Claro
Pisco Elqui DMC	355.931	6.666.412	1.250	Río Claro
La Ortiga	357.132	6.658.422	1.560	Río Claro
Huanta	366.029	6.696.897	1.240	Río Turbio
Juntas	394.208	6.682.885	2.150	Río Turbio
La Laguna embalse	399.475	6.657.844	3.160	Río Turbio
Molino Yaco	376.275	6.685.470	1.550	Río Turbio
La Serena (Escuela agrícola)	282.014	6.689.100	15	Río Elqui
Rivadavia	349.128	6.682.332	820	Río Elqui
Vicuña (Inia)	334.305	6.673.314	730	Río Elqui
Almendral	314.695	6.681.255	370	Río Elqui
Pabellón	350.481	6.634.254	1.920	Río Hurtado

* WGS84, Huso 19S

Tabla 6-23. Coordenadas de estaciones meteorológicas con información de precipitación IV Región. Fuente: Dirección General de Aguas.

Con respecto a su distribución altitudinal, las estaciones cubren el rango de cotas entre los 15 msnm en la Serena y los 3.160 msnm en la estación a mayor altura (La Laguna).

Los periodos de registro de las estaciones, son muy variables, la estación más antigua (Rivadavia) comenzó su registro en 1936 mientras que la más modernas (Huanta y Cochiguaz) iniciaron registro en 1989, dichos periodos de registro así como el tipo de datos registrados se muestran en la **Tabla 6-24**.

	Periodo de registro		Tipo de dato		
Estación	**Inicio**	**Fin**	**PP. Mensual (mm)**	**PP. Diaria (mm)**	**Cuenca**
Cochiguaz	mar-89	V	Sí	Sí	Río Claro
Los Nichos	dic-76	V	Sí	Sí	Río Claro
Monte grande	ago-58	V	Sí	Sí	Río Claro
Pisco elqui DMC	dic-76	V	Sí	Sí	Río Claro
La Ortiga	dic-78	V	Sí	Sí	Río Claro
Huanta	mar-89	V	Sí	Sí	Río Turbio
Juntas	dic-89	V	Sí	Sí	Río Turbio
La Laguna embalse	dic-63	V	Sí	Sí	Río Turbio
Molino Yaco	ago-58	dic-65	Sí	Sí	Río Turbio
La Serena (Escuela agrícola)	dic-70	V	Sí	Sí	Río Elqui
Rivadavia	dic-36	V	Sí	Sí	Río Elqui
Vicuña (Inia)	dic-70	V	Sí	Sí	Río Elqui
Almendral	ago-58	V	Sí	Sí	Río Elqui
Pabellón	abr-68	V	Sí	Sí	Río Hurtado

V- Vigente

Tabla 6-24. Estaciones pluviométricas IV Región, periodos de registro y tipo de dato. Fuente: Dirección General de Aguas.

La única estación descartada para el análisis de precipitaciones fue la estación de Molino Yaco por interrumpir su registro en el año 1965.

Tras la revisión de los datos de las estaciones se decidió realizar el análisis de precipitaciones teniendo en cuenta los registros entre enero de 1980 y diciembre de 2015.

El análisis de consistencia de los datos fue realizado mediante el método de dobles masas, y el completado de datos se realizó mediante regresión lineal simple, tal y como se describe en el **numeral 5.4.1.1**.

En la **Figura 6-49** se muestra un mapa con las estaciones utilizadas para el análisis de precipitaciones.

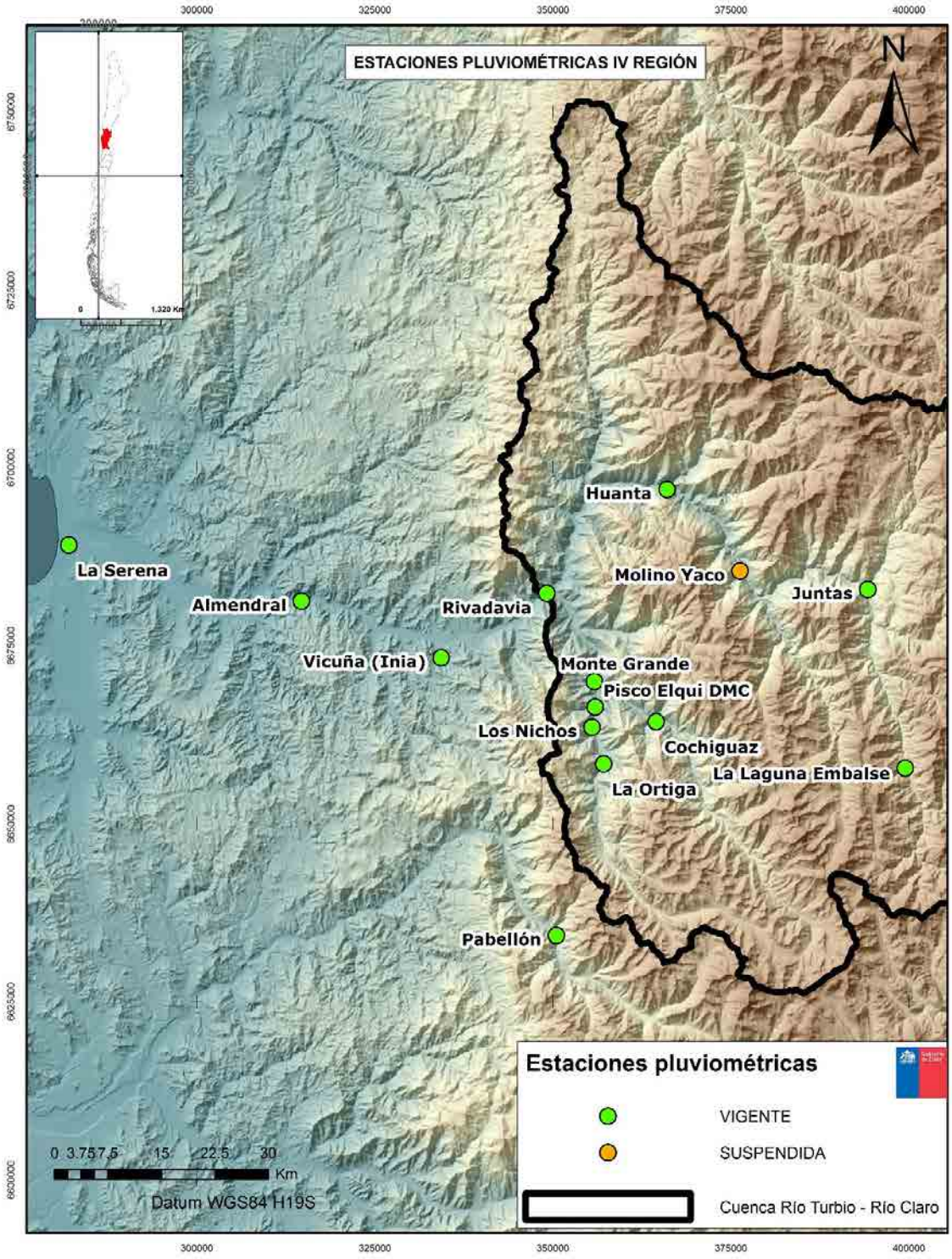


Figura 6-49. Estaciones meteorológicas con información de precipitación en las cuencas del río Claro-Turbio. Fuente: Dirección General de Aguas.

6.4.1.1 PROMEDIOS MENSUALES Y ESTACIONALIDAD

En toda el área de estudio, la precipitación presenta una marcada estacionalidad. Ésta se caracteriza por presentar máximos en el periodo Junio-Agosto y mínimos en el periodo Noviembre – Febrero (**Tabla 6-25**).

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Cuenca
Cochiguaz	0,00	0,06	3,88	3,41	12,98	24,96	34,32	17,19	2,72	0,95	0,78	0,15	Río Claro
Los Nichos	0,15	0,36	3,02	6,78	12,84	32,67	48,70	20,38	4,65	1,71	0,31	0,00	Río Claro
Monte Grande	0,00	0,06	2,55	2,31	8,15	20,74	30,04	12,72	2,17	1,00	0,31	0,00	Río Claro
Pisco Elqui DMC	0,00	0,16	2,56	5,06	10,82	27,61	38,18	17,94	2,33	1,53	0,28	0,00	Río Claro
La Ortiga	0,10	0,35	3,23	5,19	15,65	40,13	50,61	22,86	4,65	2,29	0,21	0,07	Río Claro
Huanta	0,24	0,62	2,67	2,81	7,56	15,39	25,15	11,26	2,17	1,65	0,31	0,01	Río Turbio
Juntas	1,60	2,23	4,92	5,84	14,45	23,39	33,49	18,15	5,24	2,58	0,58	1,08	Río Turbio
La Laguna (Embalse)	4,35	3,93	5,50	9,78	21,49	29,20	42,75	28,78	6,24	3,74	1,19	2,03	Río Turbio
La Serena (Escuela Agrícola)	0,14	0,08	1,18	1,75	11,46	25,78	29,33	14,92	4,04	2,87	0,44	0,04	Río Elqui
Rivadavia	0,04	0,38	2,81	4,48	8,80	24,83	37,09	17,38	4,18	2,05	0,06	0,08	Río Elqui
Vicuña (Inia)	0,01	0,03	2,51	4,64	11,46	23,36	33,89	17,39	4,07	2,67	0,05	0,04	Río Elqui
Almendral	0,03	0,04	1,92	1,58	12,42	24,07	31,57	16,85	3,03	2,71	0,06	0,08	Río Elqui
Pabellón	1,64	1,46	4,35	11,54	20,44	38,95	41,78	23,38	6,67	4,35	1,35	0,38	Río Hurtado

Tabla 6-25. Precipitación media mensual (mm/mes) en estaciones meteorológicas del área de estudio y zonas aledañas. Fuente: Dirección General de Aguas.

La cuenca del río Claro presenta una dispersión menor, bien asociada a la aglomeración de las estaciones en cotas entre 820 msnm en Rivadavia y 1.560 msnm en Cochiguaz y La Ortiga. En la **Figura 6-50** se muestra un gráfico que representa la precipitación media mensual para la cuenca del río Claro.

Como se observa en **Figura 6-50**, la estación de Rivadavia ha sido comparada con los datos de la cuenca del río Claro, esto es debido a que esta estación se encuentra situada justo en la confluencia entre el río Claro y el río Turbio, por lo que se ha considerado en los análisis de todas las cuencas.

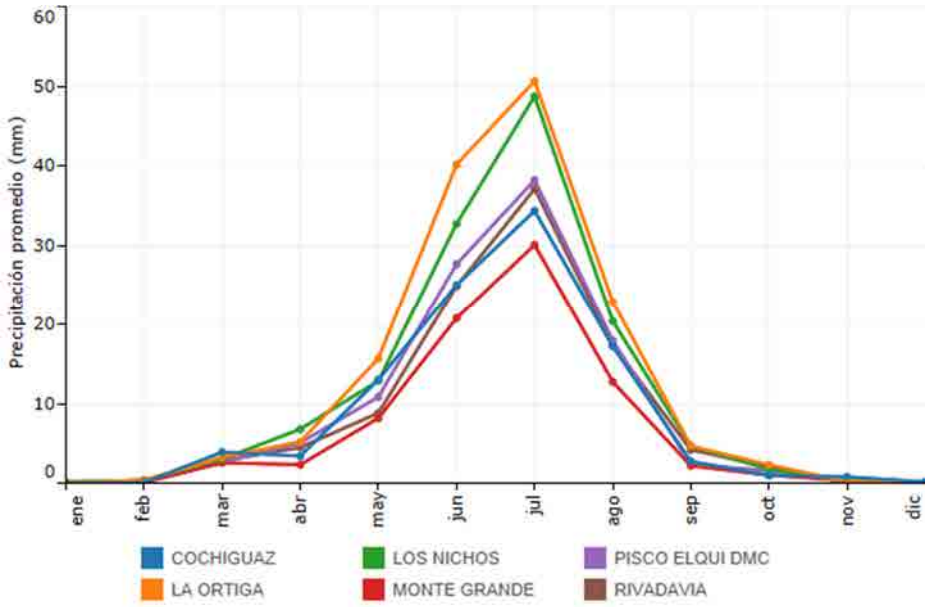


Figura 6-50. Precipitaciones medias mensuales para la cuenca del río Claro. Fuente: Dirección General de Aguas.

La cuenca del río Turbio presenta mayor dispersión que la del río Claro, lo cual es coherente con la situación geográfica de sus estaciones, las cuales se sitúan entre 820 m en Rivadavia y 3.160 m de altitud en la Laguna. (**Figura 6-51**).

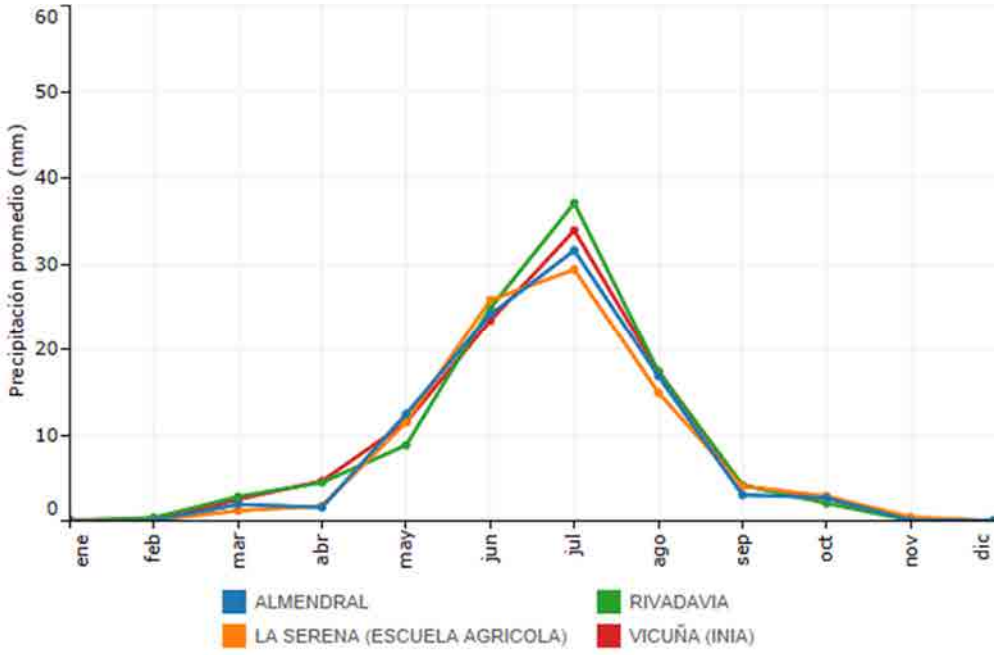


Figura 6-51. Precipitaciones medias mensuales para la cuenca del río Turbio. Fuente: Dirección General de Aguas.

Por último, la zona aguas abajo de la confluencia de los ríos Claro y Turbio se observa también un comportamiento homogéneo de todas las estaciones, a pesar de que se distribuyen en un rango de altitud entre 15 msnm en la Serena y 820 msnm en Rivadavia (**Figura 6-52**).

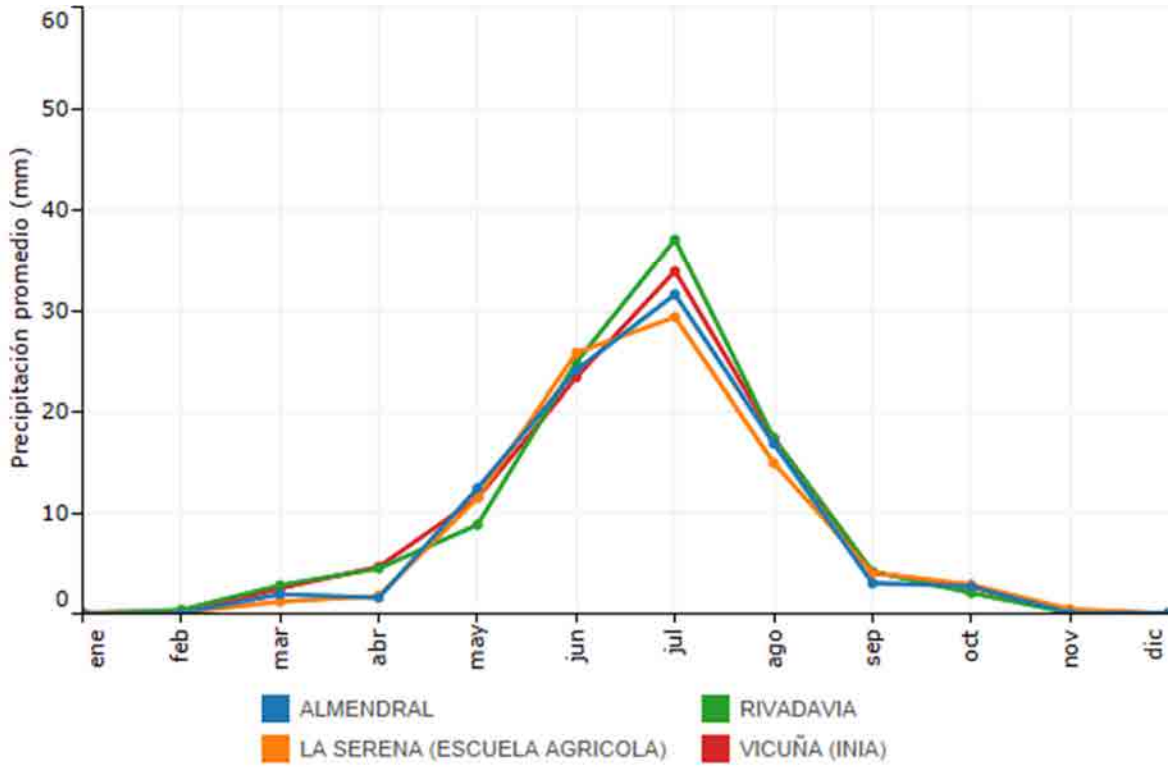


Figura 6-52. Precipitaciones medias mensuales en estaciones del río Elqui. Fuente: Dirección General de Aguas.

6.4.1.2 EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE PRECIPITACIONES

El estudio de la serie de precipitaciones anuales acumuladas permite determinar cuál es la precipitación promedio de toda la serie, así como las secuencias de años húmedos y secos.

Los valores de precipitación acumulada anual para cada una de las estaciones se muestran en el **Anexo 4 Variables Hidrometeorológicas**.

La evolución de la precipitación anual en el periodo estudiado se muestra en la **Figura 6-53** para el río Turbio, **Figura 6-54** para el río Claro y **Figura 6-55** para el río Elqui.

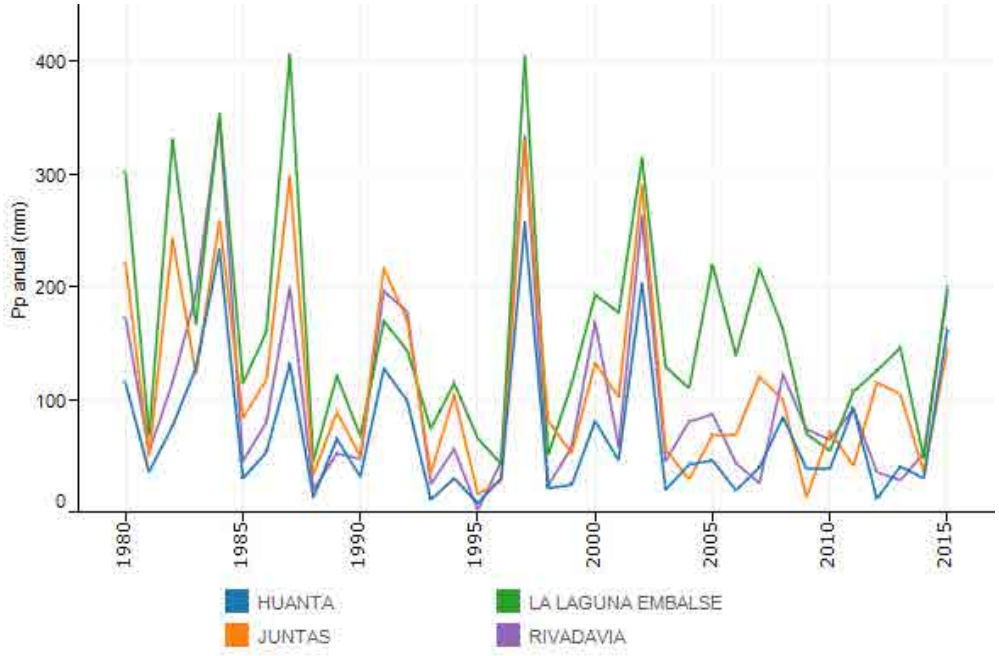


Figura 6-53. Precipitaciones anuales en el a cuenca del río Turbio. Fuente: Dirección General de Aguas.

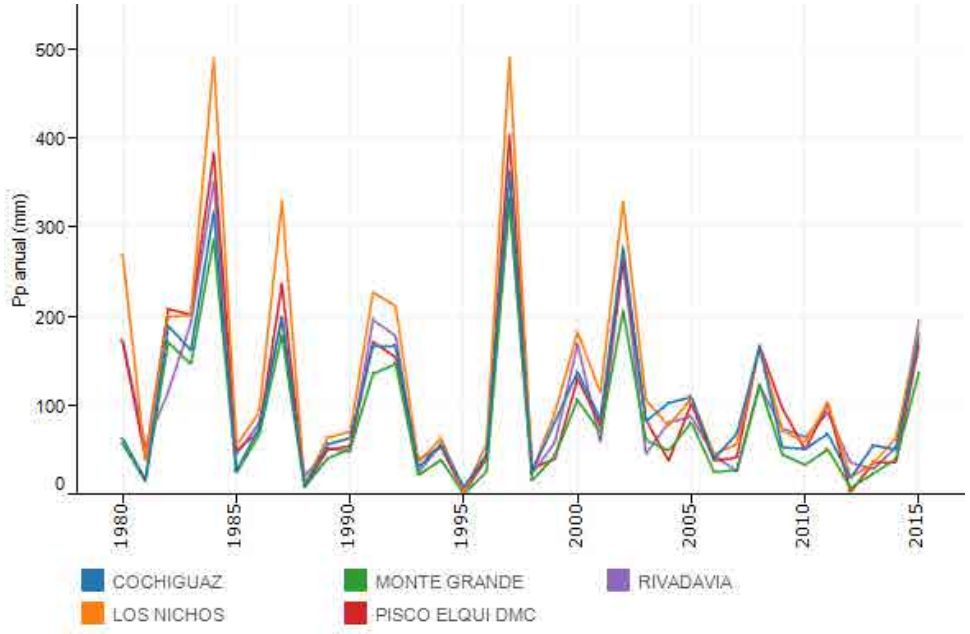


Figura 6-54. Precipitaciones anuales en la cuenca del río Claro. Fuente: Dirección General de Aguas.

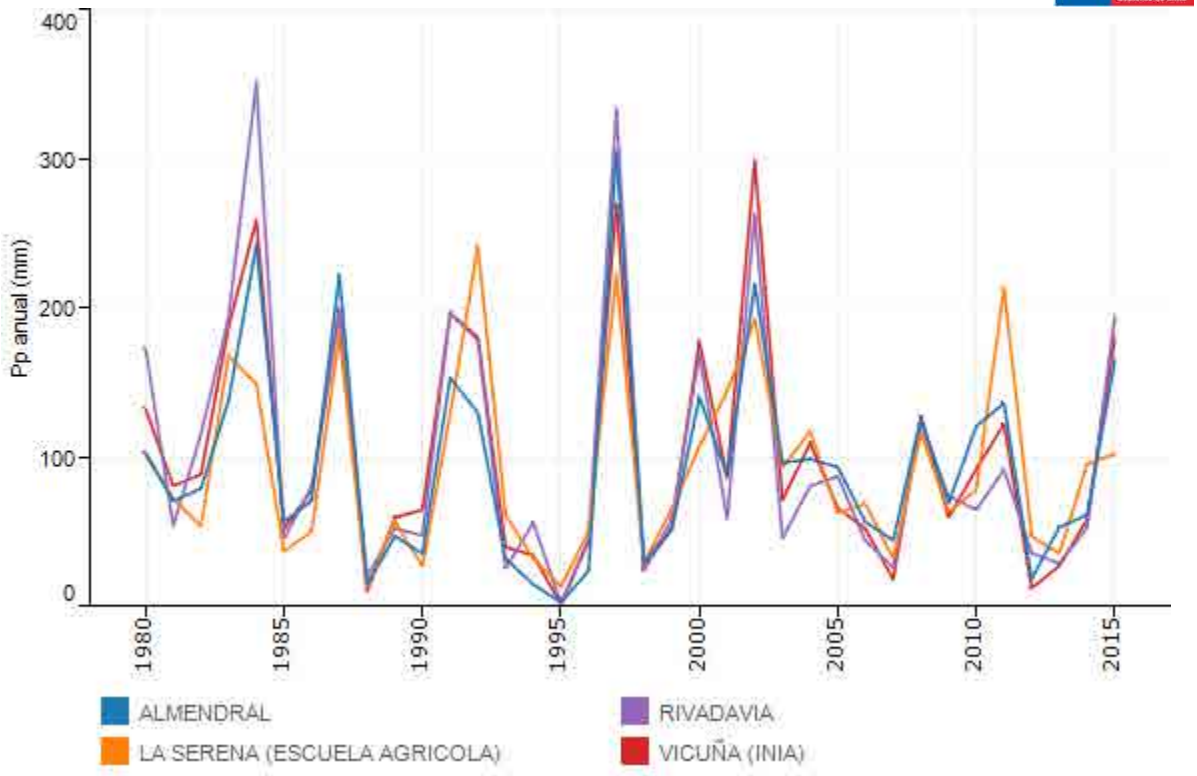


Figura 6-55. Precipitaciones anuales en la cuenca del río Elqui. Fuente: Dirección General de Aguas.

Para determinar el valor promedio de precipitación anual de las estaciones, se realizó la media aritmética de precipitación anual acumulada de las estaciones, a partir de dichos promedios anuales se calculó el promedio de precipitaciones la serie completa (1980 y 2015). Este promedio de precipitaciones para toda la serie es de 40,4 mm/año. Para la realización de este promedio de precipitaciones acumuladas anuales se tuvieron en cuenta únicamente las estaciones que se encontraban dentro de las cuencas del río Claro y río Turbio.

Al igual que en la II Región, la determinación de secuencias húmedas y secas se realizó se según la metodología explicada en Martínez *et al.*, 2006.

Según este método la representación de la diferencia acumulada versus el tiempo nos permite identificar secuencias secas y húmedas, siendo secuencias secas aquellas en que la curva tiene una pendiente negativa y secuencias húmedas aquellas en la que curva tienen un pendiente positiva.

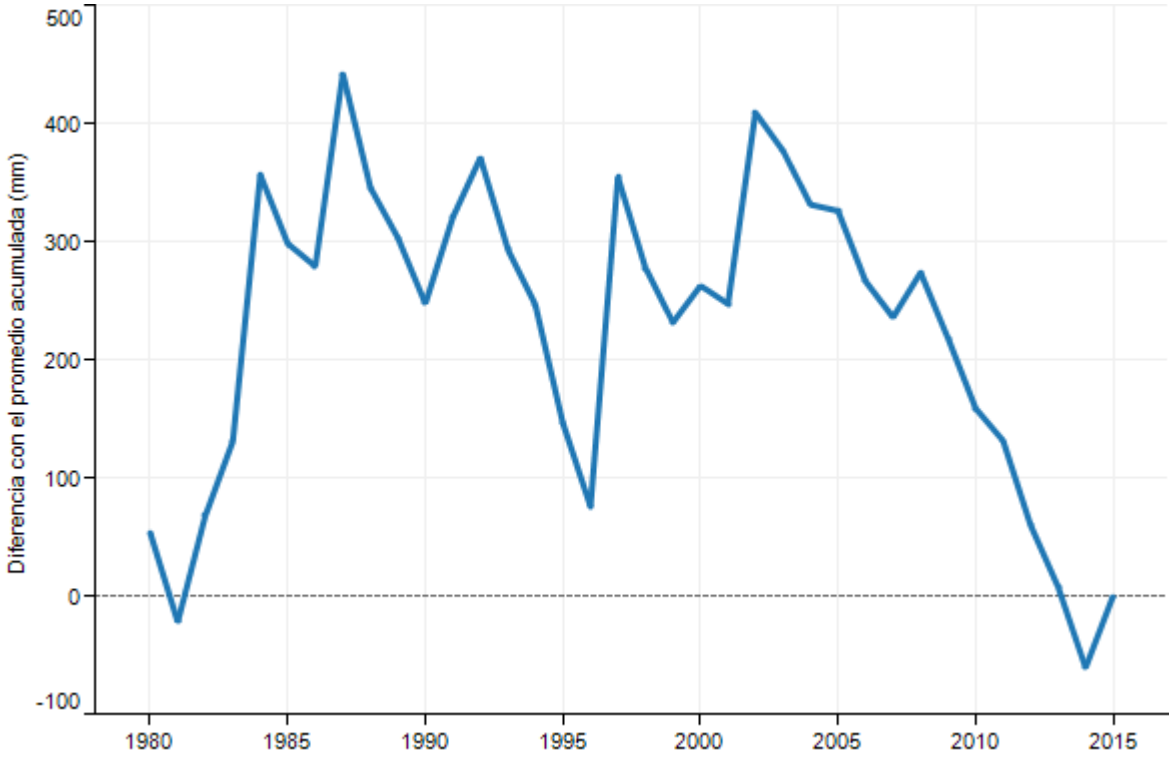


Figura 6-56. Series húmedas y secas de precipitación en IV Región. Fuente: Dirección General de Aguas.

Tal y como se observa en la **Figura 6-56,** existe una alternancia de secuencias húmedas y secas para el área de estudio, estas secuencias se muestran en la **Tabla 6-26** y presentan una duración promedio de 8,3 años, la tendencia actual de la gráfica indica que el año 2015 es el inicio de una secuencia húmeda.

Secuencia	Año inicio	Año fin	Duración (años)
Seca	-	1981	-
Húmeda	1981	1987	6
Seca	1987	1996	9
Húmeda	1996	2002	6
Seca	2002	2014	12
Húmeda	2014	-	-
Promedio duración series			8,3

(-) Valor desconocido

Tabla 6-26. Secuencias de precipitaciones IV Región. Fuente: Dirección General de Aguas.

6.4.1.3 PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL Y GRADIENTE ALTITUDINAL

La precipitación media anual para todas las estaciones del área se encuentra entre 69 y 159 mm (**Tabla 6-27**).

Estación	Promedio anual de precipitaciones (mm)	Elevación (msnm)	Cuenca
Cochiguaz	101,4	1.560	Río Claro
Los Nichos	131,6	1.330	Río Claro
Monte Grande	80,0	1.120	Río Claro
Pisco Elqui	106,5	1.250	Río Claro
La Ortiga	145,3	1.560	Río Claro
Huanta	69,8	1.240	Río Turbio
Juntas	113,6	2.150	Río Turbio
La Laguna (Embalse)	159,0	3.160	Río Turbio
La Serena (Escuela Agrícola)	92,0	15	Río Elqui
Rivadavia	102,2	820	Río Elqui
Vicuña (Inia)	100,1	730	Río Elqui
Almendral	94,3	370	Río Elqui
Pabellón	156,3	1.920	Río Hurtado

Promedios de precipitación calculados con las series completadas desde enero de 1980 a diciembre de 2015.

Tabla 6-27. Precipitaciones medias anuales IV Región. Fuente: Dirección General de Aguas.

El rango más acotado se encuentra en bajo la confluencia de los ríos Claro y Turbio, con magnitudes entre 92 y 102 mm/año. En la cuenca del río Claro, las medias anuales se encuentran entre 80 y 145 mm/año y en la del río Turbio entre 70 y 159 mm/año. Esta última cuenca contiene los máximos y mínimos de la zona.

La representación de la precipitación media anual versus la altitud de cada estación muestra la existencia de gradientes altitudinales diferentes en la cuenca del río Elqui y en la cuenca del río Claro y río Turbio.

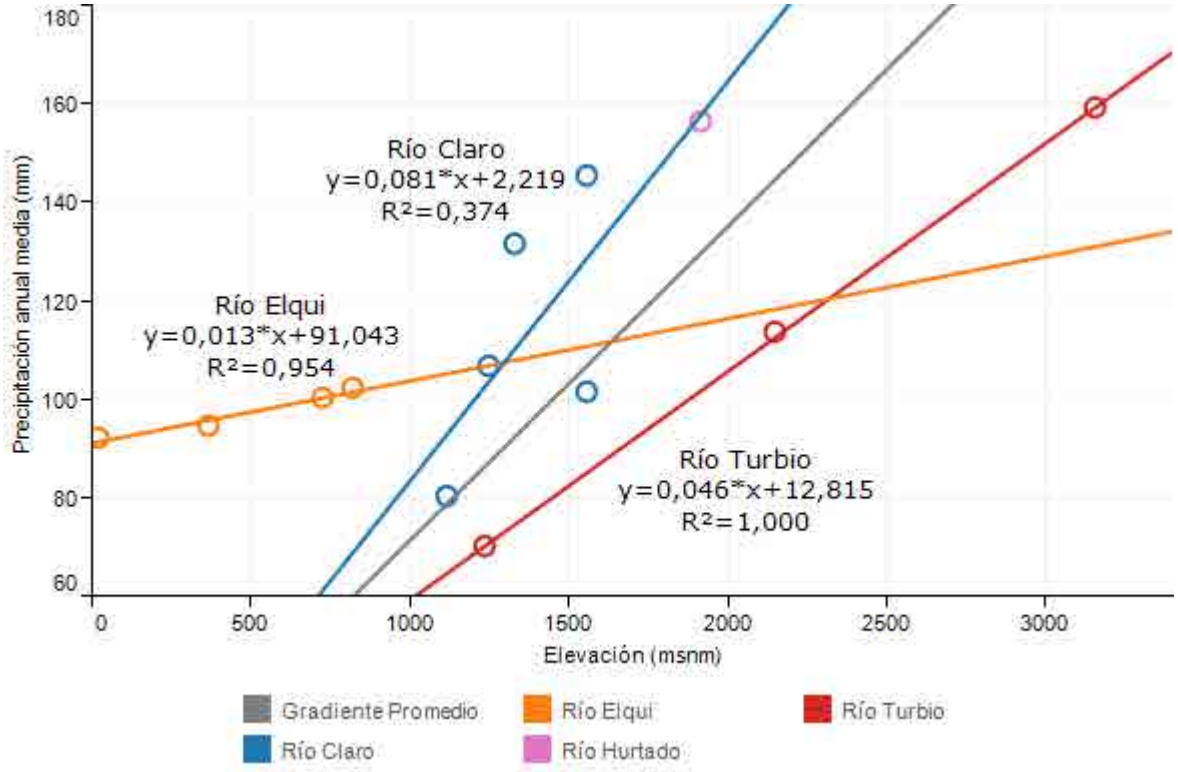


Figura 6-57. Gradiente altitudinal de precipitaciones en río Elqui, río Claro y río Turbio. Fuente: Dirección General de Aguas.

De este modo, para las estaciones aguas abajo de la confluencia de los ríos Claro y Turbio, el gradiente de precipitación es de 1,3 mm cada 100 m de altitud. En la cuenca del río Claro el gradiente es de 8,1 mm cada 100 m de altitud y en la cuenca del río Turbio el gradiente es de 4,5 mm cada 100 m de altitud. Se ha de tener en cuenta que para el caso del río Turbio, el gradiente altitudinal se ha construido únicamente en base a 3 estaciones, por lo tanto este gradiente tiene cierta incertidumbre, a pesar de que el ajuste de la recta sea bueno.

6.4.1.4 CÁLCULO DE PRECIPITACIONES SOBRE LA CUENCA

Al igual que en la II región, la precipitación caída sobre la cuenca se calculó a través de la aplicación del gradiente altitudinal al modelo digital del terreno, generando a continuación el mapa de isoyetas, el cual se puede observar en la **Figura 6-58.** Debido a que existen diferentes gradientes altitudinales para la zona de estudio, para la generación del mapa de isoyetas se aplicó el gradiente correspondiente a cada cuenca, y en la zona intermedia entre ambas cuencas se aplicó el gradiente promedio es de 6,37 mm por cada 100 m de altitud.

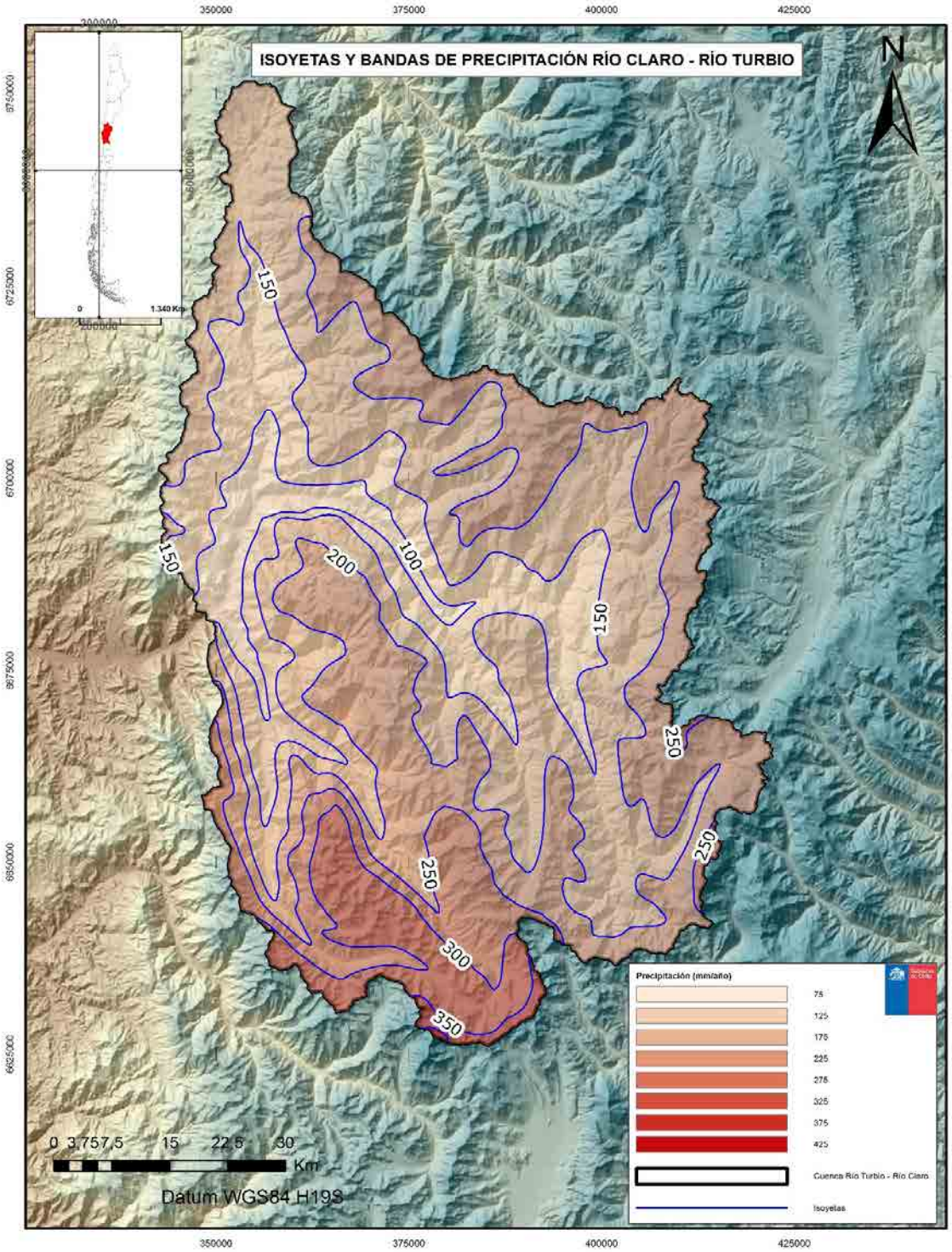


Figura 6-58. Isoyetas y bandas de precipitación IV Región. Fuente: elaboración propia.

El cálculo de la precipitación total sobre la cuenca, se realizó mediante la división de la cuenca en bandas de precipitación, las cuales se encuentran limitadas por las isoyetas. El valor de precipitación, se obtuvo multiplicando el área de cada banda por la precipitación promedio de dicha banda. El sumatorio de la precipitación en cada banda representa la precipitación total anual sobre la cuenca, cuyo valor es de 1.092,31 hm^3, equivalente a 34.637 L/s. De los cuales 11.689 L/s corresponden a la precipitación en la cuenca del río Claro y 22.984 L/s a la precipitación en la cuenca del río Turbio.

En publicaciones anteriores se pueden observar valores superiores, aunque dentro del mismo orden de magnitud, tal es el caso de Balance hídrico de Chile (DGA, 1988) en el cual obtienen un valor de precipitación total anual de 1.736 hm^3, o de 1.469 hm^3 según Comisión Nacional de Riego, 1987.

6.4.2 TEMPERATURA

Las estaciones utilizadas para el análisis de temperaturas fueron seleccionadas en base a su ubicación geográfica, a la cantidad y calidad de los datos registrados.

Inicialmente se evaluaron 7 estaciones, las cuales se muestran en la **Tabla 6-28,** de las cuales se descartó la estación de La Serena (Escuela agrícola), por presentar un registro temporal de muy corta duración. De esta manera, se seleccionaron 6 estaciones meteorológicas con control de temperatura, de las cuales la estación con una mayor longitud de registro es Rivadavia, que opera desde diciembre de 1936 hasta la actualidad.

Estación	Inicio de registro	Fin de registro	T° media mensual	Cuenca
La Laguna Embalse	dic-63	V	Sí	Río Turbio
Juntas	dic-89	dic-13	Sí	Río Turbio
La Ortiga	dic-78	V	Sí	Río Claro
Almendral	ago-58	dic-89	Sí	Río Elqui
La Serena (Escuela Agrícola)	dic-70	jun-78	Sí	Río Elqui
Rivadavia	dic-36	V	Sí	Río Elqui
Hurtado	dic-42	V	Sí	Río Hurtado

V - Vigente

Tabla 6-28. Estaciones meteorológicas con información de temperatura en el área de estudio y zonas aledañas. Fuente: Dirección General de Aguas.

Los datos de las estaciones utilizadas en el análisis de temperaturas, fueron sometidos a análisis de consistencia de los datos mediante el método de doble masa, así mismo, los datos faltantes dentro de las series fueron completados mediante regresión lineal simple, tal y como se explica en el **numeral 5.4.1.1**. El análisis de dobles masas para este caso muestra que los datos de todas las estaciones se alinean en una recta sin cambios de pendiente, lo cual indica que los datos mantienen la proporcionalidad a lo largo del tiempo y por tanto se consideraron fiables.

La serie de datos utilizada para cada estación se muestra en el **Anexo 4 Variables Hidrometeorológicas**.

Con respecto a su ubicación geográfica, las estaciones se encuentran distribuidas en las cuencas del río Claro, Turbio, Elqui y Hurtado, en un rango altitudinal que varía entre los 370 msnm en la estación Almendral y los 3.160 msnm en la estación de La Laguna, las coordenadas, altitud y cuenca en la que se encuentra cada estación se muestra en la **Tabla 6-29.**

Estación	UTM* Este (m)	UTM* Norte (m)	Elevación (msnm)	Cuenca
La Laguna Embalse	399.475	6.657.844	3.160	Río Turbio
Juntas	394.208	6.682.885	2.150	Río Turbio
La Ortiga	357.132	6.658.422	1.560	Río Claro
Almendral	314.695	6.681.255	370	Río Elqui
Rivadavia	349.128	6.682.332	820	Río Elqui
Hurtado	336.666	6.647.851	1.100	Río Hurtado

*WGS 1984

Tabla 6-29. Coordenadas de estaciones con información de temperatura en el área de estudio. Fuente: Dirección General de Aguas.

La **Figura 6-59**, muestra un mapa con la ubicación de todas las estaciones evaluadas para el análisis de temperaturas.

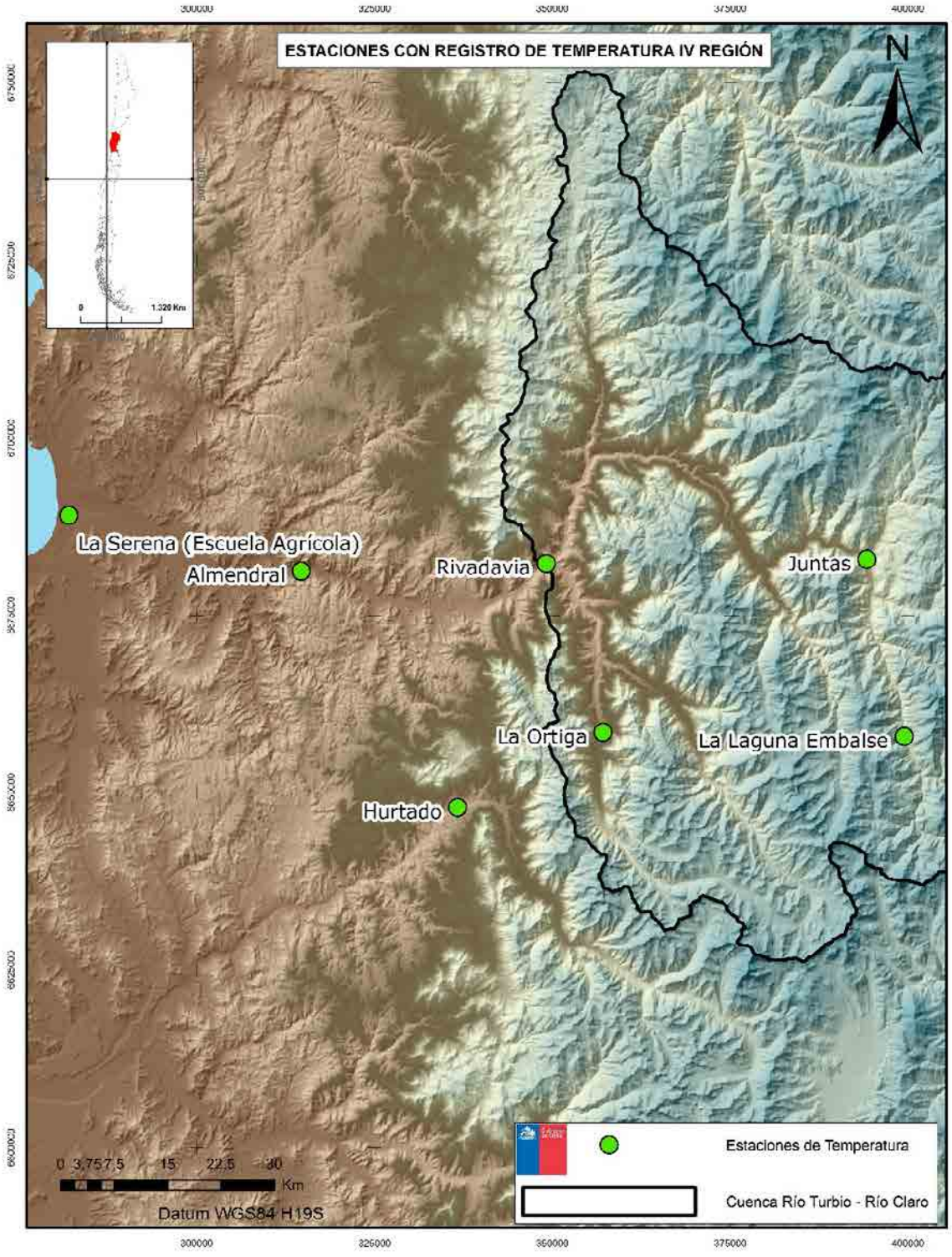


Figura 6-59. Estaciones meteorológicas con información de temperatura. Fuente: Dirección General de Aguas.

6.4.2.1 PROMEDIOS MENSUALES Y ESTACIONALIDAD

Las temperaturas medias mensuales, muestran una marcada estacionalidad con máximos en los meses de verano (diciembre – febrero) y mínimos en invierno (junio – agosto), tal y como se observa en la **Figura 6-60**

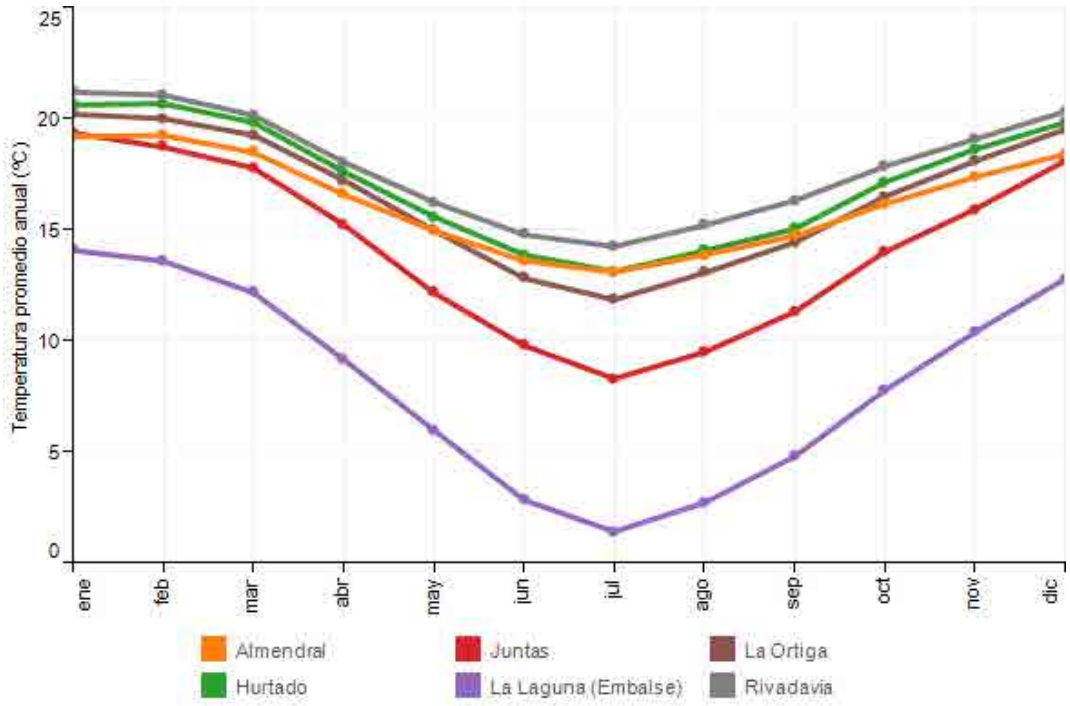


Figura 6-60. Temperatura media mensual en estaciones del área de estudio IV Región y zonas aledañas. Fuente: Dirección General de aguas.

El patrón de estacionalidad es muy similar para las estaciones de las diferentes cuencas. La temperatura máxima mensual registrada es de 21,2°C en la estación Rivadavia, para el mes de enero, esta estación se encuentra en la confluencia de los ríos Claro y Turbio, en la parte a menor altitud de la zona de estudio. Por su parte, la mínima temperatura media mensual es de 1,4 °C y se identifica en la estación La Laguna, la cual es la de mayor altitud. Los valores de temperatura media mensual para cada estación se muestran en la **Tabla 6-30.**

Mes	Almendral	Hurtado	Juntas	La Laguna (Embalse)	La Ortiga	Rivadavia
Enero	19,2	20,6	19,3	14,1	20,2	21,2
Febrero	19,2	20,7	18,7	13,6	20,0	21,0
Marzo	18,5	19,8	17,8	12,1	19,2	20,1
Abril	16,6	17,6	15,2	9,1	17,2	18,0
Mayo	14,9	15,6	12,1	6,0	15,0	16,2
Junio	13,6	13,8	9,8	2,8	12,8	14,8
Julio	13,1	13,1	8,3	1,4	11,8	14,2
Agosto	13,8	14,0	9,5	2,7	13,0	15,2
Septiembre	14,7	15,0	11,3	4,8	14,4	16,3
Octubre	16,1	17,1	14,0	7,7	16,5	17,8
Noviembre	17,3	18,6	15,9	10,4	18,1	19,1
Diciembre	18,4	19,8	18,1	12,8	19,5	20,3

Tabla 6-30. Temperatura media mensual (ºC) en estaciones meteorológicas del área de estudio y zonas aledañas. Fuente: Dirección General de Aguas.

6.4.2.2 TEMPERATURA MEDIA ANUAL Y GRADIENTE ALTITUDINAL

La temperatura media anual se obtuvo a través de los promedios de las temperaturas medias mensuales. Estos valores de temperatura media anual de cada estación, así como la altitud de cada una de ellas se muestran en la **Tabla 6-31.**

Estación	Elevación (msnm)	Temperatura media anual (°C)	Cuenca
La Laguna Embalse	3.160	8,11	Río Turbio
Juntas	2.150	14,16	Río Turbio
La Ortiga	1.560	16,47	Río Claro
Almendral	370	16,28	Río Elqui
Rivadavia	820	17,85	Río Elqui
Hurtado	1.100	17,14	Río Hurtado

Tabla 6-31. Temperatura media anual estaciones IV Región. Fuente: Dirección General de Aguas.

Como se observa en la **Tabla 6-31,** las estaciones a mayor altitud tienen una temperatura media anual menor, esto es debido a que existe un gradiente altitudinal de -0,41°C por

cada 100 m de altitud, el cual se muestra en la **Figura 6-61,** este gradiente sucede exclusivamente a partir de los 820 m de altitud (Estación de Rivadavia), en cotas inferiores la temperatura se comporta de diferente manera y la temperatura media anual aumenta con la altura.

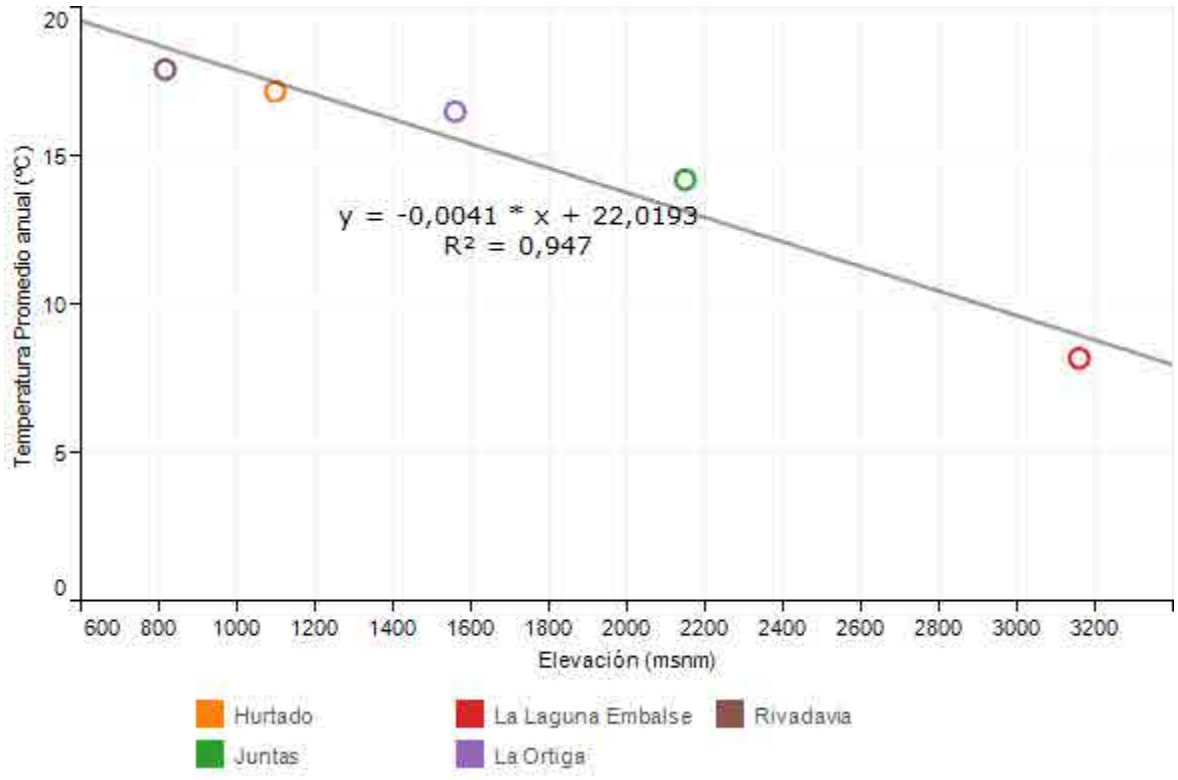


Figura 6-61. Gradiente altitudinal de temperaturas IV Región. Fuente: Dirección General de Aguas.

La representación de la evolución de temperaturas medias anuales muestra que la temperatura tiene un comportamiento bastante estable a lo largo del periodo de estudio (1974 – 2015), tal y como se muestra en la **Figura 6-62.** La máxima desviación con respecto al promedio se encuentra en el año 1975 (3,3°C en la estación de Almendral), el cual fue especialmente cálido.

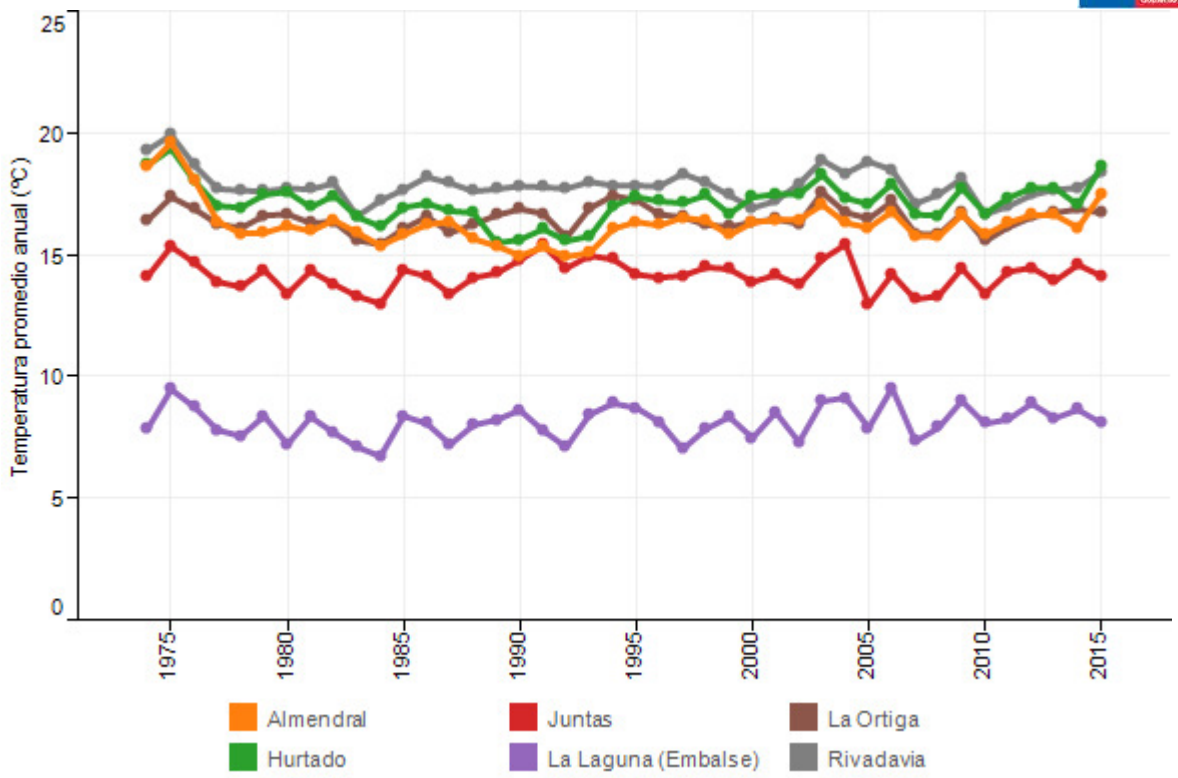


Figura 6-62. Temperatura media anual para la zona de estaciones área de estudio y zona aledañas. Fuente: Dirección General de Aguas.

6.4.2.3 CARACTERIZACIÓN ESPACIAL, ISOTERMAS

La caracterización espacial de temperaturas se realizó mediante la herramienta ARCGIS, aplicando el gradiente altitudinal obtenido en el numeral anterior al modelo digital del terreno, de esta forma se obtuvo un modelo digital de temperaturas sobre el cual se trazaron líneas isotermas cada 2°C. De esta manera se generó el mapa de isotermas y polígonos de temperatura que se muestra en la **Figura 6-63,** dichos polígonos de temperatura, se encuentran limitados por las líneas isotermas y representan áreas cuya temperatura promedio se muestra en la leyenda del mapa.

En la **Figura 6-63,** se observa que las mayores temperaturas se obtienen en las zonas de menor altitud, correspondientes a las partes bajas de los valles, disminuyendo hacia la cordillera y alcanzando mínimos de temperatura en las cumbres de la cordillera de los Andes, que hacen de divisoria de aguas.

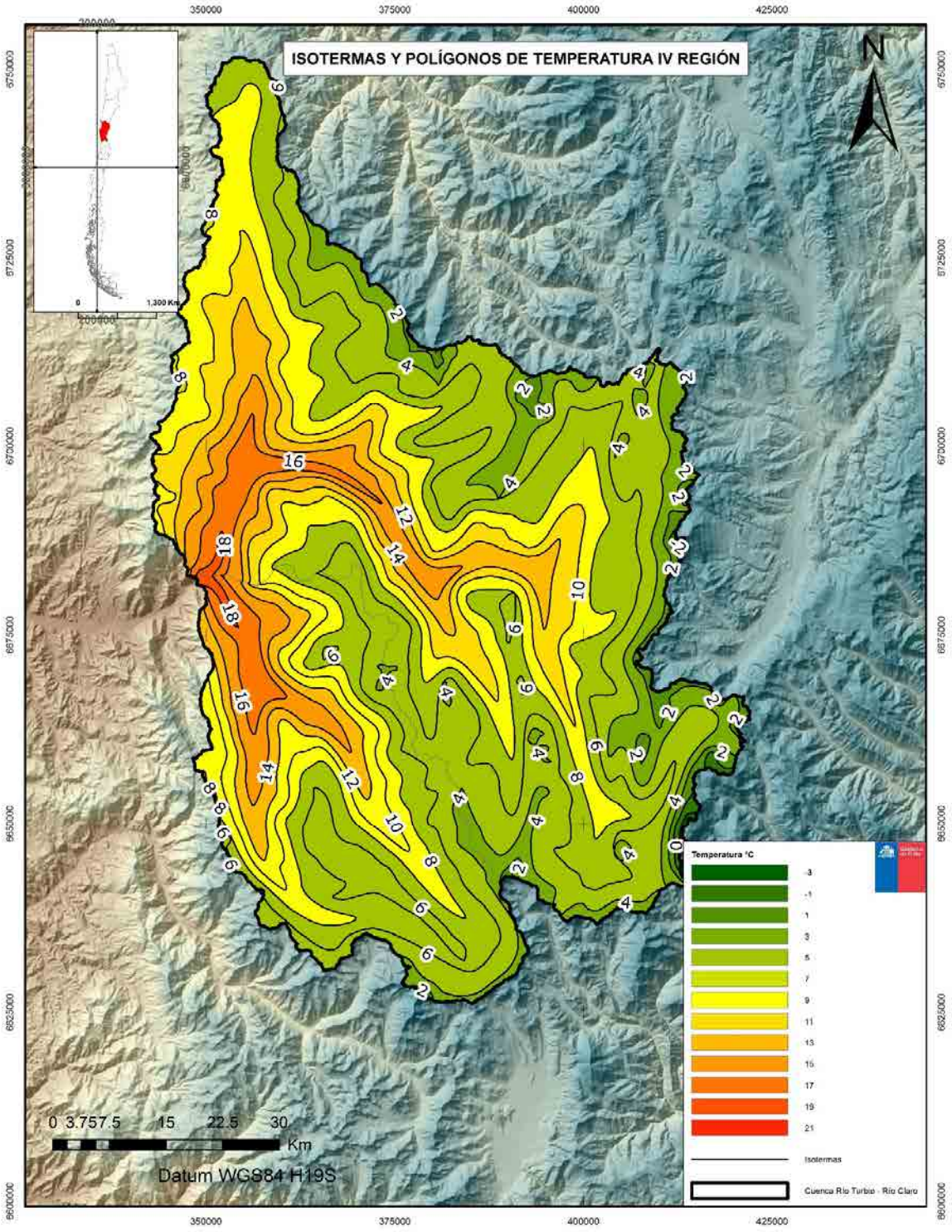


Figura 6-63. Isotermas y bandas de temperatura media anual. Fuente: elaboración propia.

6.4.3 ANÁLISIS DE CAUDALES

El comportamiento anual y mensual de los ríos y canales se refleja mediante el análisis de caudales. Este análisis se desarrolla a partir de los registros históricos en las estaciones de aforo al interior de la zona de estudio.

La zona de estudio se divide en dos cuencas las cuales convergen cerca de la población de Rivadavia. Las cuencas del río Turbio y río Claro presentan un total de 17 puntos de medición de caudal distribuidos entre ambas. Cabe destacar que algunos de los puntos marcados en el mapa no son estaciones construidas, sino que son puntos dónde se realizan aforos una vez al mes (color verde oscuro en la **Figura 6-64**).

En la cuenca del río Claro existen un total de cuatro estaciones fluviométricas de las cuales tres siguen vigentes. Una estación en la parte baja de la cuenca (río Claro en Rivadavia) mide el caudal de salida y dos estaciones más miden el caudal de los afluentes Estero Derecho y río Cochiguaz que alimentan el río Claro. En la confluencia de ambos afluentes se encuentra la estación de río Claro en Montegrande, la cual está suspendida.

En la cuenca del río Turbio actualmente hay 2 estaciones con datos disponibles, una ubicada en Juntas y otra cerca de la salida de la cuenca en Varillar. La estación "río Toro antes junta río La Laguna" mide el caudal proveniente del sector de la mina el Indio mientras que la estación "río Turbio en Varillar" mide el caudal del río Turbio antes de unirse con el río Claro. No todas las estaciones registradas en la página web de la Dirección General de Aguas, tienen disponibles los datos de caudales tal y como sucede con la estación "río Incaguaz antes junta río Turbio".

La salida de ambas cuencas se controla desde las estaciones ubicadas en Rivadavia (río Claro) y Varillar (río Turbio). Aguas abajo de la convergencia de ambos ríos se encuentra la estación de "río Elqui en Algarrobal" la cual se ocupará para calcular el caudal que sale del área de estudio.

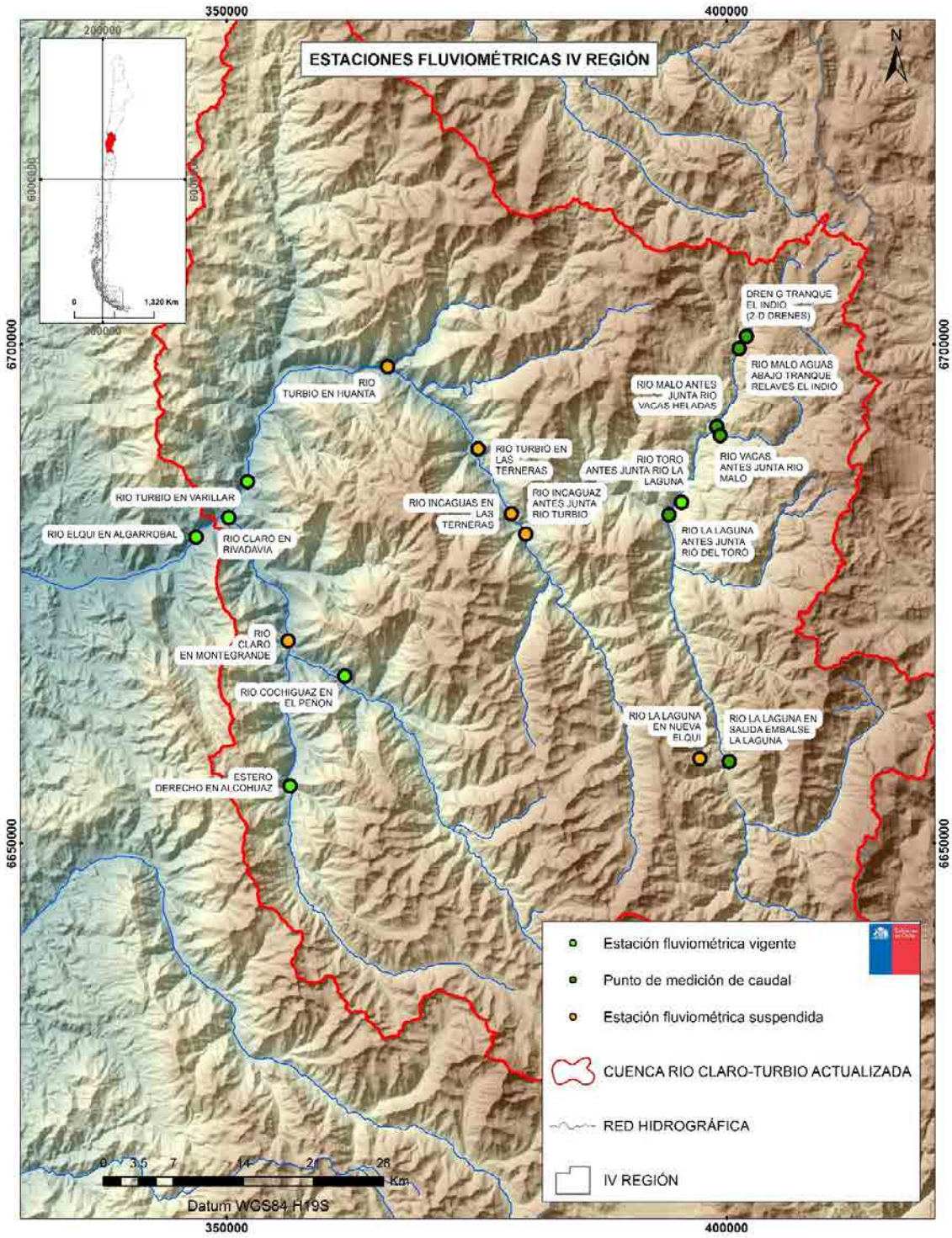


Figura 6-64. Ubicación de las estaciones fluviométricas situadas en la IV Región. Fuente: Modificado de Dirección General de Aguas.

De las 17 estaciones que se encuentran registradas en la Dirección General de Aguas, 14 presentan medidas de caudal, el resto no presentan datos de caudal, aun estando registradas. En la **Tabla 6-32** se presenta un listado con las estaciones fluviométricas que presentan registro de datos.

Estación	Fecha		Coord. UTM*	
	Inicio	Final	Este (m)	Norte (m)
Río Claro en Rivadavia	1914	V	350.119	6.682.461
Río Turbio en Varillar	1914	V	351.733	6.686.388
Río Elqui en Algarrobal **	1916	V	346.938	6.880.100
Río La Laguna en Salida Embalse La Laguna	1928	1977	399.676	6.657.932
Río La Laguna en Nueva Elqui	1928	1931	397.119	6.658.192
Río Turbio en Huanta	1928	1983	365.888	6.697.419
Río Incaguaz en Las Terneras	1946	1948	380.266	6.679.444
Río Claro en Monte Grande	1947	1983	355.830	6.669.982
Río Cochiguaz en El Peñón	1983	V	356.128	6.655.453
Estero Derecho en Alcohuaz	1983	V	356.128	6.655.453
Río Toro antes Junta Río La Laguna	1985	V	394.586	6.683.646
Río Turbio en Las Terneras	1946	1948	376.849	6.685.570
Dren G Tranque el Indio	2002	2002	401.772	6.700.441

V: vigente * WGS84, Huso 19S **Estación fuera del área de estudio

Tabla 6-32. Estaciones fluviométricas en el área de estudio y zonas aledañas. Fuente: Dirección General de Aguas.

El análisis de caudales se ha realizado en base a dos estaciones en la cuenca del río Turbio, tres estaciones en la cuenca del río Claro y una última estación (Río Elqui en Algarrobal) aguas abajo de la confluencia de ambas cuencas. Para ello se han seleccionado un intervalo de tiempo de 32 años que va desde el 1983 hasta 2015.

Analizando los datos disponibles en las diferentes estaciones, únicamente 6 de ellas disponían de un registro suficientemente completo como para ser rellenadas durante el periodo de tiempo seleccionado. Estas estaciones son, "río Toro antes junta río La Laguna" y "río Turbio en Varillar" para la cuenca del río Turbio y "río Cochiguaz en el Peñón", "estero derecho en Alcohuaz" y "río Claro en Rivadavia" para la cuenca del río Claro. La estación "río Elqui en Algarrobal" se utilizará para realizar el cierre de la cuenca (**Figura 6-65**).

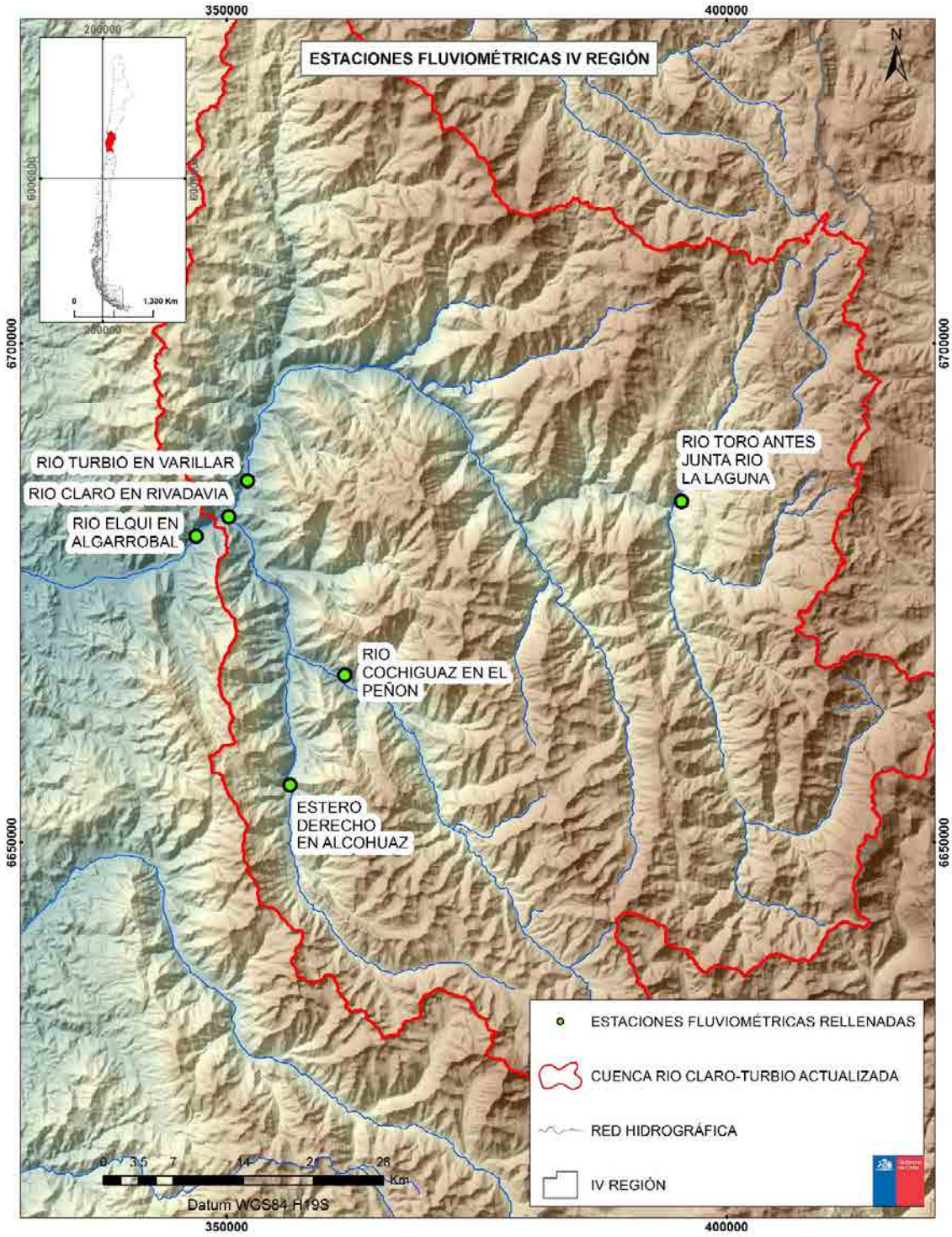


Figura 6-65. Estaciones fluviométricas con información de caudales en la IV Región. Fuente: Dirección General de Aguas.

El relleno de las series de datos de caudal se realizó mediante el método de regresión lineal simple de la misma forma que se utilizó para el rellenado de las series de datos de precipitación. La metodología detallada se describe en el **numeral 5.4.1.1**.

Antes de empezar el análisis de caudales, cabe destacar que el régimen del caudal de un río está determinado por los diferentes tipos de aportes. Estos son: precipitación de lluvia, aportes por derretimiento nival y aportes del acuífero.

En la **Figura 6-66** se muestra un gráfico con los tipos de régimen de caudal, los cuales se describen a continuación:

- Ríos de régimen pluvial: se alimentan principalmente por precipitación pluvial. Se caracterizan por presentar un aumento o crecida del caudal coincidiendo con la época de máximas precipitaciones. Por el contrario, en los meses de menor precipitación el caudal del río debiera coincidir con los valores más bajos. En esta zona las máximas precipitaciones coinciden con los meses de invierno (junio-septiembre) por lo que si se tratase de un río con régimen pluvial se debiera ver reflejado en los registros de caudales.
- Ríos de régimen nival: su alimentación proviene del deshielo proveniente de las nieves de las zonas altas. Durante los meses más fríos, la precipitación en las zonas altas se produce en forma de nieve almacenando en algunos casos grandes volúmenes de nieve. Esta nieve al aumentar la temperatura durante los meses de primavera-verano se funde aportando agua al río. Se caracterizan por tener bajos caudales en invierno y crecidas de importancia en primavera y/o verano. Por tanto dependen fundamental-mente de la temperatura y de la cantidad de nieve acumulada durante el invierno.
- Ríos de régimen mixto: se alimentan tanto de lluvias como del derretimiento de las nieves. Se caracterizan por tener dos periodos de crecidas en el año, una corresponde al máximo de precipitaciones (invierno junio-septiembre) y otra, debido al derretimiento de nieves durante la primavera-verano.
- Ríos con regulación natural desde el acuífero: se alimentan principalmente por el aporte del acuífero y muestran un caudal con menores variaciones durante el año. Estas variaciones dependerán de las variaciones del nivel freático en el acuífero y su relación con el río. Las variaciones del nivel freático en el acuífero acostumbran

a guardar relación con los momentos de mayor precipitación y derretimiento nival existiendo un desfase temporal entre los periodos de mayor aporte al acuífero y el incremento del nivel freático. Este desfase temporal dependerá del tiempo de tránsito entre la zona de recarga y la zona de aporte de agua desde el acuífero al río.

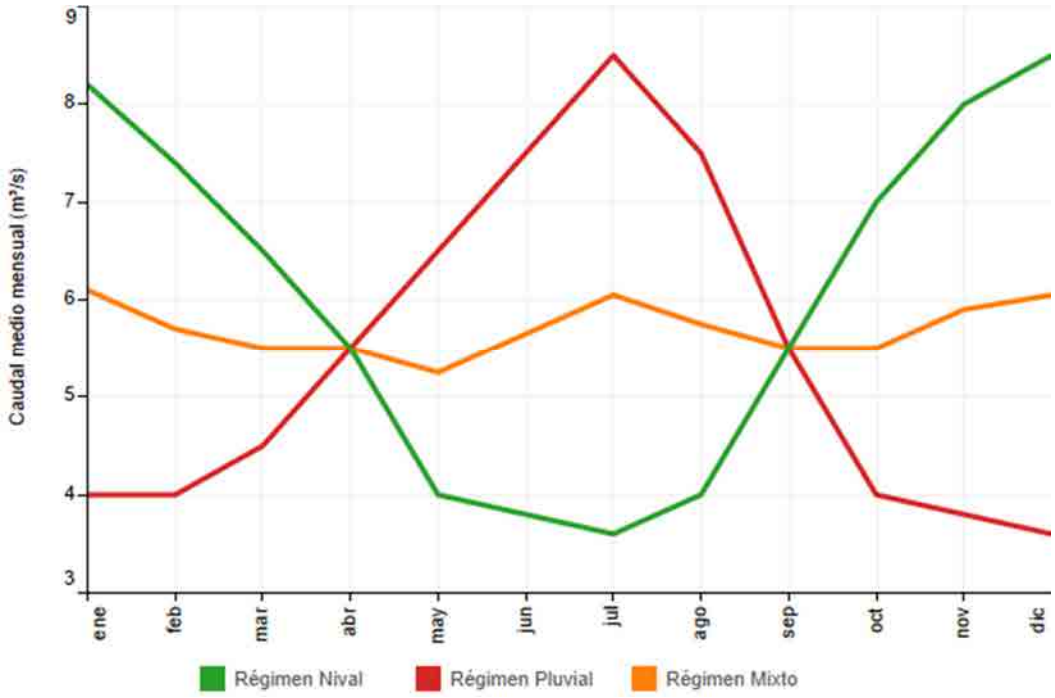


Figura 6-66. Gráfico con los diferentes tipos de régimen que tiene un río en esta zona. Fuente: elaboración propia.

6.4.3.1 PROMEDIOS MENSUALES Y ESTACIONALIDAD

En la cuenca del río Claro se ha realizado el análisis a partir de los datos de cuatro estaciones. En la **Figura 6-67** se muestra la distribución de los caudales a lo largo del año donde se observa como las crecidas se producen durante los meses de primavera-verano coincidiendo con el deshielo.

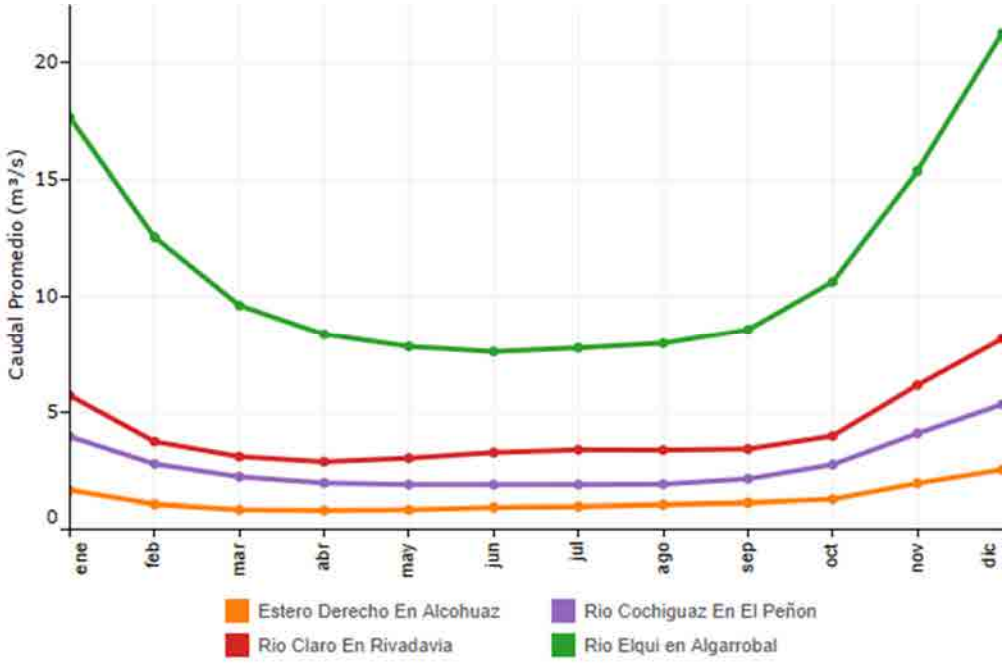


Figura 6-67. Caudal medio mensual en estaciones de la cuenca del río Claro. Fuente: elaboración propia.

Del mismo modo, en la cuenca del río Turbio se ha realizado el análisis a partir de los datos de tres estaciones y se ha observado la misma distribución a lo largo del año (**Figura 6-68**).

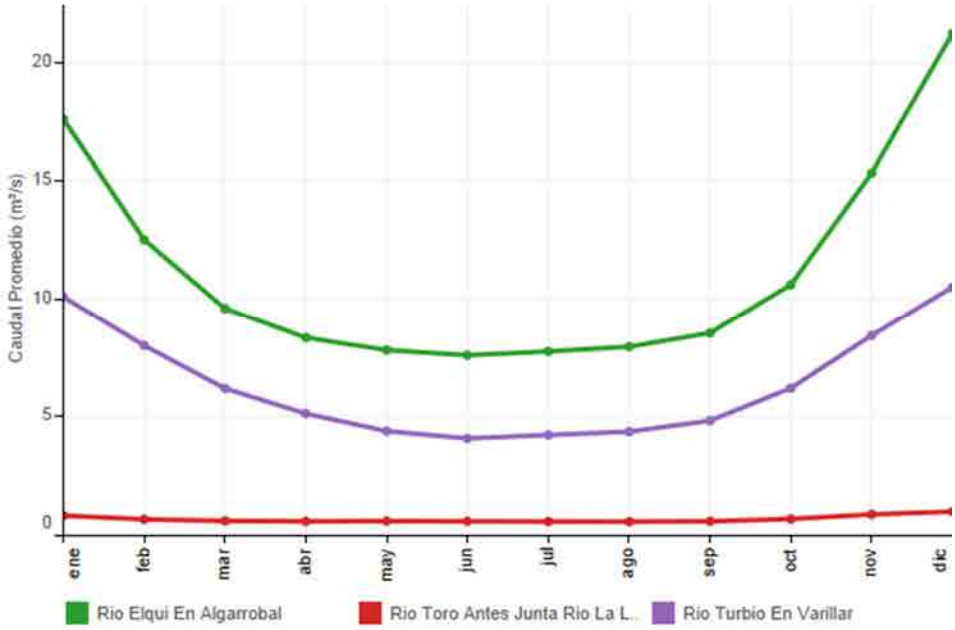


Figura 6-68. Caudal medio mensual en estaciones de la cuenca del río Turbio. Fuente: elaboración propia.

Tal y como se observa en ambas gráficas anteriores, ambas cuencas reflejan un régimen de alimentación nival de los ríos con máximos en los meses de primavera-verano (diciembre – enero) y mínimos de forma casi continua en los meses de abril a agosto.

A nivel global, el caudal máximo mensual se promedia en el mes de diciembre en la estación "Río Elqui en Algarrobal", con 21,23 m^3/s. Esta estación se encuentra unos 4 Km aguas abajo de los ríos Turbio y Claro. El caudal mínimo se promedió en la estación "Río Toro antes junta Río La Laguna", ubicada en la parte alta de la cuenca del río Turbio, con un valor de 0,59 m^3/s en el mes de junio (**Tabla 6-33**).

Estación	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic
Estero Derecho En Alcohuaz	1,66	1,07	0,84	0,81	0,84	0,93	0,97	1,05	1,13	1,27	1,95	2,53
Rio Claro En Rivadavia	5,71	3,74	3,09	2,87	3,03	3,27	3,38	3,37	3,42	3,98	6,16	8,15
Rio Cochiguaz En El Peñón	3,95	2,78	2,23	1,96	1,89	1,89	1,89	1,91	2,14	2,75	4,09	5,33
Rio Elqui En Algarrobal	17,61	12,52	9,60	8,35	7,82	7,60	7,76	7,97	8,55	10,62	15,34	21,23
Rio Toro Antes Junta Rio La Lag	0,85	0,69	0,63	0,61	0,61	0,61	0,60	0,59	0,61	0,70	0,90	1,01
Rio Turbio En Varillar	10,10	8,02	6,20	5,13	4,39	4,08	4,23	4,37	4,83	6,21	8,44	10,52

Tabla 6-33. Caudal medio mensual (m^3/s) en estaciones fluviométricas del área de estudio y zonas aledañas. Fuente: modificado de Dirección General de Aguas.

Para concluir esta sección se han relacionado los caudales medios mensuales de cada año con las precipitaciones medias mensuales. Para ello se ha utilizado la estación fluviométrica de "río Elqui en Algarrobal" y la estación meteorológica de "La Laguna" (**Figura 6-69**).

Con el objetivo de observar el régimen del río, se han relacionado los eventos de precipitación con las crecidas registradas. En todos los casos se observa un desfase temporal de unos seis meses donde las precipitaciones máximas se registran entre Junio y Septiembre y las crecidas máximas durante los meses de primavera-verano corroborando así el régimen nival de los ríos en la zona de estudio.

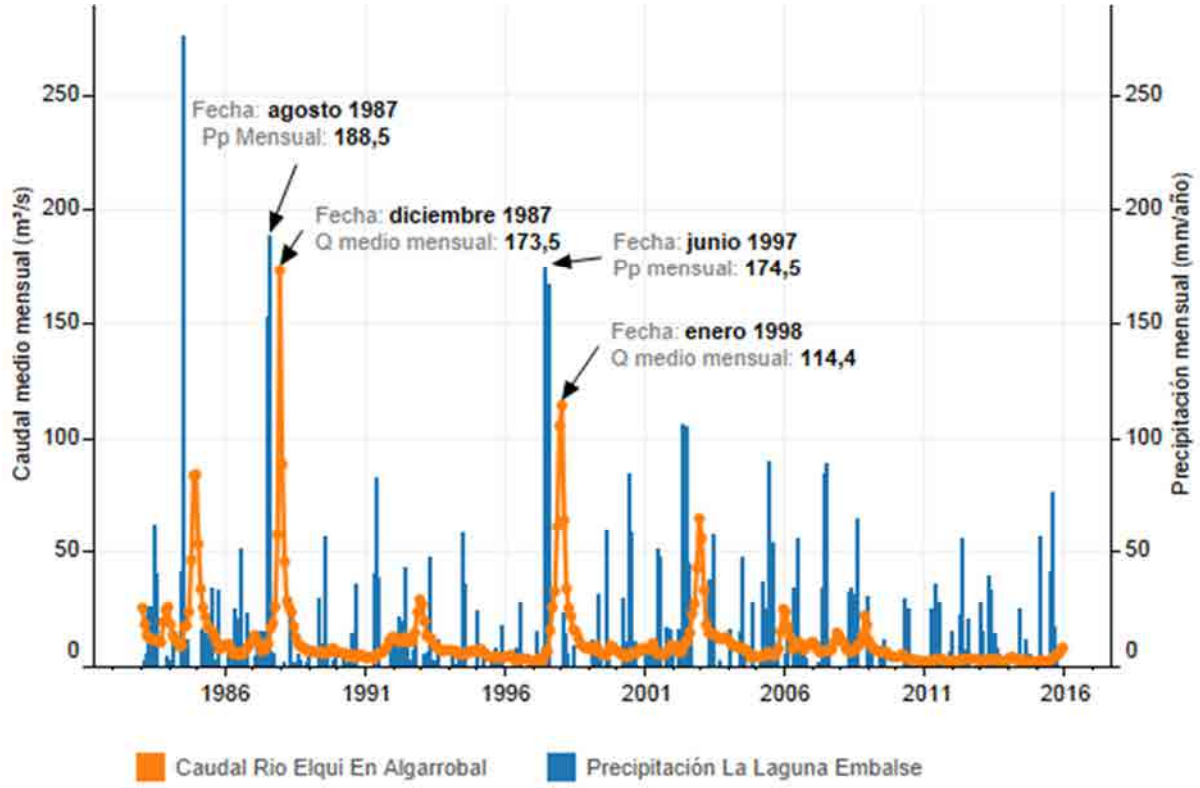


Figura 6-69. Gráfico que relaciona los caudales medios mensuales de cada año con las precipitaciones medias mensuales. Fuente: modificado de Dirección General de Aguas.

6.4.3.2 CAMPAÑA DE TERRENO DE MEDICIÓN DE CAUDALES

Durante el mes de enero de 2016 se realizó una campaña de aforos en la que se midió el caudal en diferentes puntos del área de estudio.

Para realizar la campaña de aforos, se utilizó un medidor de flujo modelo **OTT MF pro**. Se trata de un medidor de caudal magnético-inductivo el cual realiza un cálculo automático del caudal circulante y está pensado para cauces descubiertos. Tiene la posibilidad de medir el flujo y el nivel de agua en condiciones desfavorables tales como en aguas de poca velocidad, en condiciones de turbulencia y en cauces con muchas plantas.



- Margen de medición: 0 - 6 m/s
- Precisión: ±2 % del valor medido ±0,015 m/s (0 – 3 m/s) y ± 4 % del valor medido ±0,015 m/s (3 - 5 m/s)

El cálculo del caudal circulante se realizó mediante el método de Mitad Sección. Este método divide la sección transversal en segmentos de flujo individuales. Con el método de Mitad Sección, los segmentos están definidos por la mitad de la distancia a los verticales vecinos en cada caso. Este factor condiciona que los puntos medidos en los extremos del cauce deben hacerse lo más cerca posible de los márgenes.

A continuación en la **Figura 6-70** se muestra un esquema del método de cálculo de la Mitad Sección.

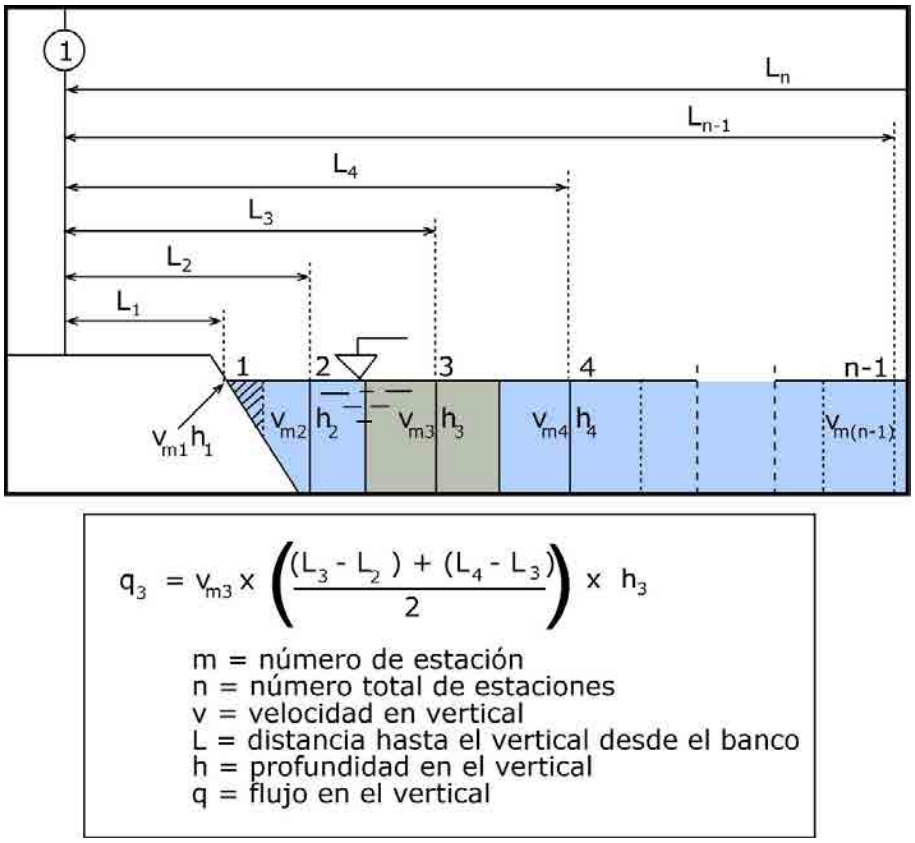


Figura 6-70. Esquema del método de cálculo de la Mitad Sección. Fuente: modificado de manual OTT MF Pro.

A continuación en **Figura 6-71** se presenta la ubicación de los puntos aforados durante la campaña y en la **Tabla 6-34** un resumen de los resultados obtenidos. Antes de la visita a terreno, se diseñó la distribución de los puntos de aforo con el objetivo de caracterizar hidrológicamente la cuenca y definir los puntos de medición del caudal de los principales afluentes de cada cuenca.

Cuenca	N° Aforo	Ubicación	Caudal medido (L/s)
Río Turbio	1	Río Toro	749
	2	Río Toro	952
	3	Río Toro en Juntas	574
	4	Río Incahuaz	671
	5	Río Turbio en Varillar	7.477
Río Claro	6	Río Cochiguaz	2.712
	7	Río Alcohuaz	2.140
	8	Río Claro en Montegrande	3.629
	9	Río Claro en Rivadavia	4.580

Tabla 6-34.Resultados de la campaña realizada en enero de 2016. Fuente: elaboración propia.

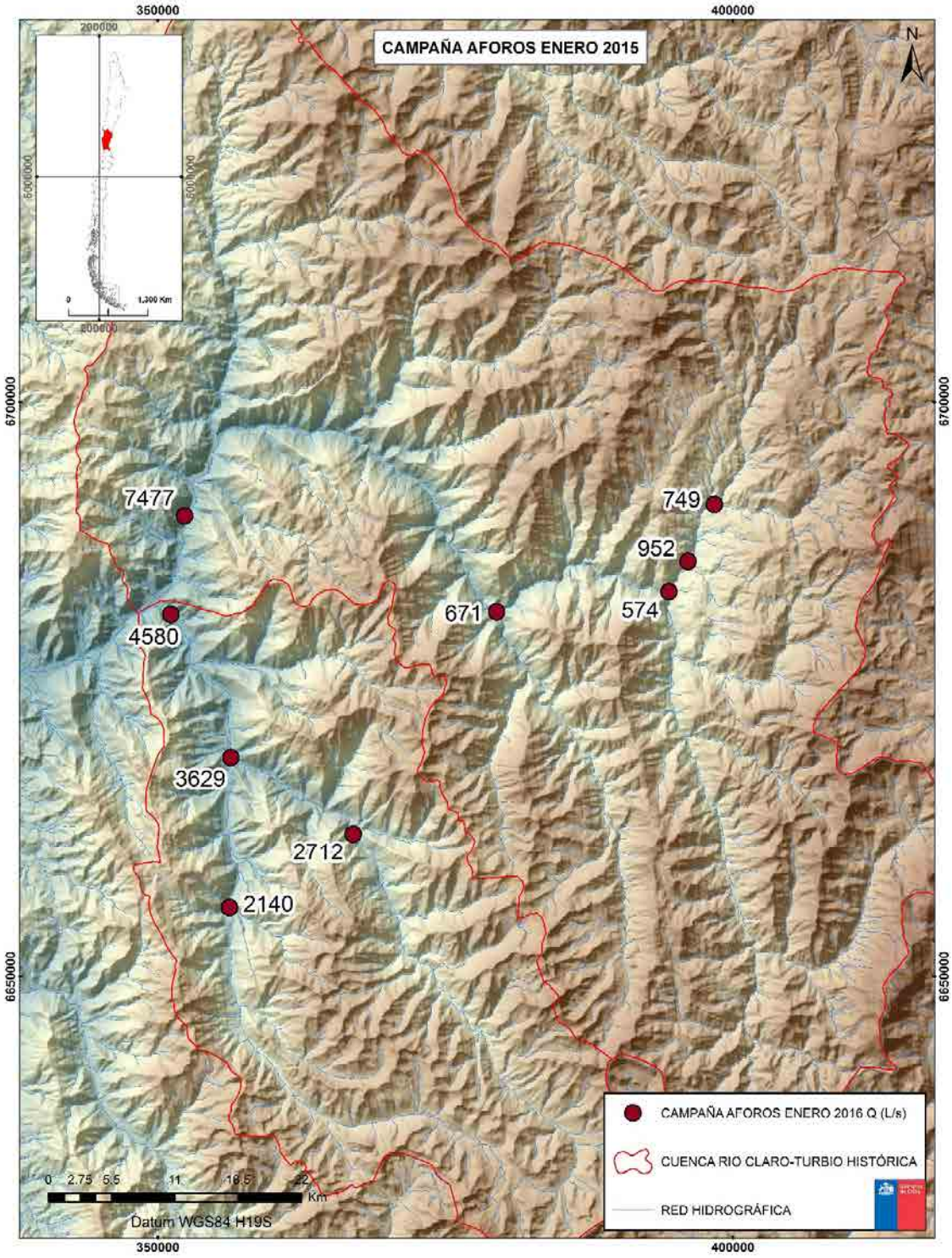


Figura 6-71. Distribución de los puntos aforados durante la campaña realizada en enero de 2016. Fuente: elaboración propia.

6.4.3.3 CAUDAL MEDIO ANUAL EN ESTACIONES

Según se observa en la **Tabla 6-35**, el caudal medio anual en las estaciones tratadas en esta etapa varía entre 0,7 m^3/s en "Río Toro antes junta Río La Laguna" y 11,25 m^3/s en "Río Elqui en Algarrobal".

Estación	Q medio anual (m^3/s)	Altura (msnm)	Cuenca
Rio Claro en Rivadavia	4,18	820	Río Claro
Rio Cochiguaz en El Peñon	2,73	1.360	Río Claro
Estero Derecho en Alcohuaz	1,25	1.971	Río Claro
Rio Toro Antes Junta Rio La Laguna	0,70	2.091	Río Turbio
Rio Turbio en Varillar	6,38	890	Río Turbio
Rio Elqui en Algarrobal	11,25	760	Aguas abajo confluencia

Tabla 6-35. Caudal medio anual en las estaciones del área de estudio y zonas aledañas. Fuente: Dirección General de Aguas.

6.4.3.4 GRADIENTE ALTITUDINAL

En este punto se ha analizado la variación del caudal medio anual con la altitud para las diferentes estaciones del área de estudio. La variación de la escorrentía con la altitud no necesariamente debiera presentar una buena correlación, debido a los regímenes de alimentación, la interacción agua superficial – agua subterránea y el uso de derechos de aprovechamiento, entre otros factores. A pesar de ello, se ha graficado esta relación, para ver indicios generales de algún patrón espacial.

Como se observa en el gráfico de la **Figura 6-72**, la distribución de los puntos parece ser coherente con una tendencia de disminución de la escorrentía media anual con la altitud que dibuja una línea de tipo exponencial decreciente. Esto cobra sentido en ausencia de derechos de aprovechamiento superficiales significativos en relación al caudal del río. Únicamente hay dos puntos que saldrían fuera de la recta: río Elqui en Algarrobal y río Claro en Rivadavia. El primer punto nos entrega un valor mayor de caudal para la cota topográfica en la que se encuentra. Este hecho se debe a que se encuentra aguas abajo de la confluencia de ambos ríos y por tanto el caudal medido es la suma del río Claro y río Turbio. Por el contrario el segundo punto tiene valores menores debido dos posibles factores: por un lado, esta estación se encuentra en una zona de alta actividad agrícola con una serie de canales que durante el año 2015 desviaban un caudal medio anual de 1.900

L/s. Otro factor podría ser la diferencia de tamaño entre cuencas. Las estaciones "río Turbio en Varillar" y "río Claro en Rivadavia" coinciden en cota topográfica pero la cuenca del río Turbio tiene mayor tamaño que la cuenca del río Claro por lo que sería coherente esperar que para una misma cota una estación registrara caudales mayores que la otra. Debido al reducido número de estaciones fluviométricas en el río Turbio no se ha considerado adecuado analizar el gradiente altitudinal de los caudales medios para cada una de las cuencas.

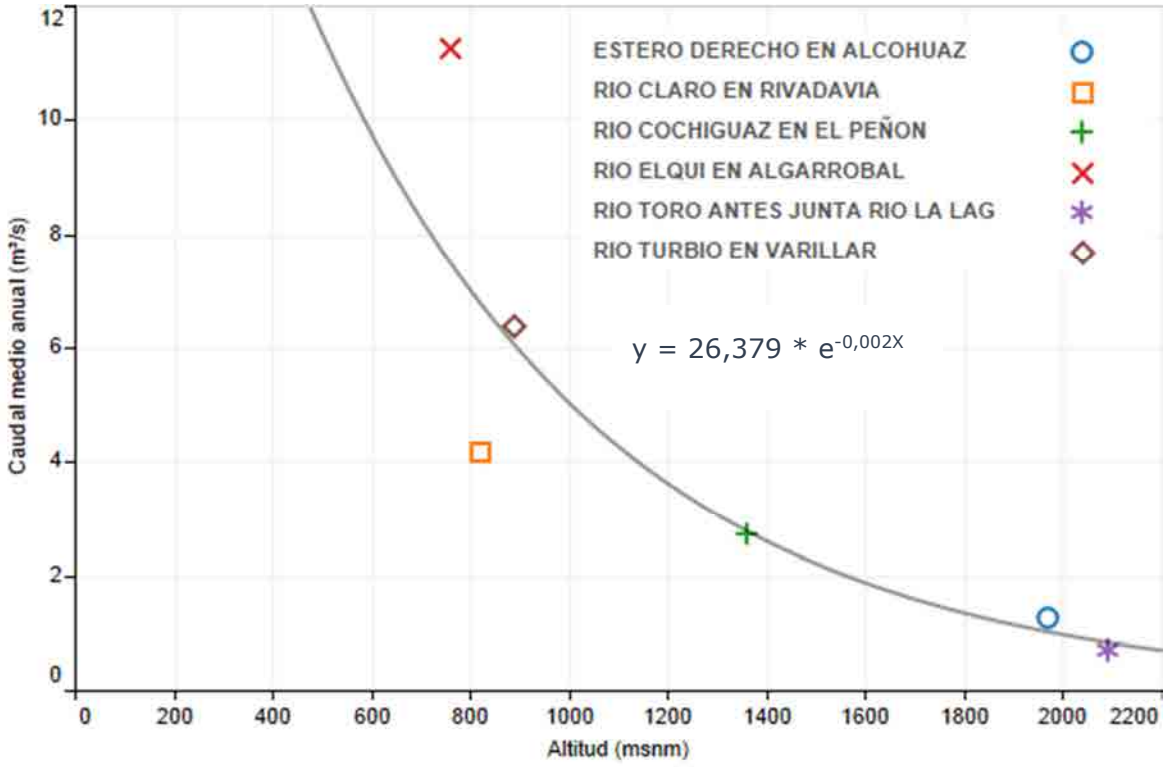


Figura 6-72. Variación del caudal medio anual con la altura en estaciones del área de estudio y zonas aledañas. Fuente: elaboración propia.

6.4.3.5 CARACTERIZACIÓN TEMPORAL (TENDENCIA)

En este punto se ha analizado la evolución temporal de los caudales con el objetivo de definir si existe una tendencia de los datos registrados.

En la **Figura 6-73** se presenta la evolución temporal de los datos registrados en las estaciones de la cuenca del río Claro y río Turbio. En esta zona se observa una tendencia decreciente de los caudales en todas las estaciones tal y como se observa en las rectas de

regresión representadas en el gráfico en línea discontinua. En ambos gráficos además de observarse una tendencia decreciente, todas las estaciones muestran una tendencia similar.

Tal y como se expone en el **numeral 6.4.1** de análisis de precipitaciones, el principal factor que provocaría el descenso de los caudales sería la disminución de la precipitación con el tiempo. Otro factor podría ser que desde el 1983 hasta la actualidad ha habido un incremento de la actividad agrícola en la zona y con ello ha aumentado la demanda hídrica por parte de los canales. No obstante creemos que este hecho no sería el causante de la tendencia decreciente ya que en estaciones ubicadas aguas arriba de la zona con actividad agrícola, se observa esta misma tendencia.

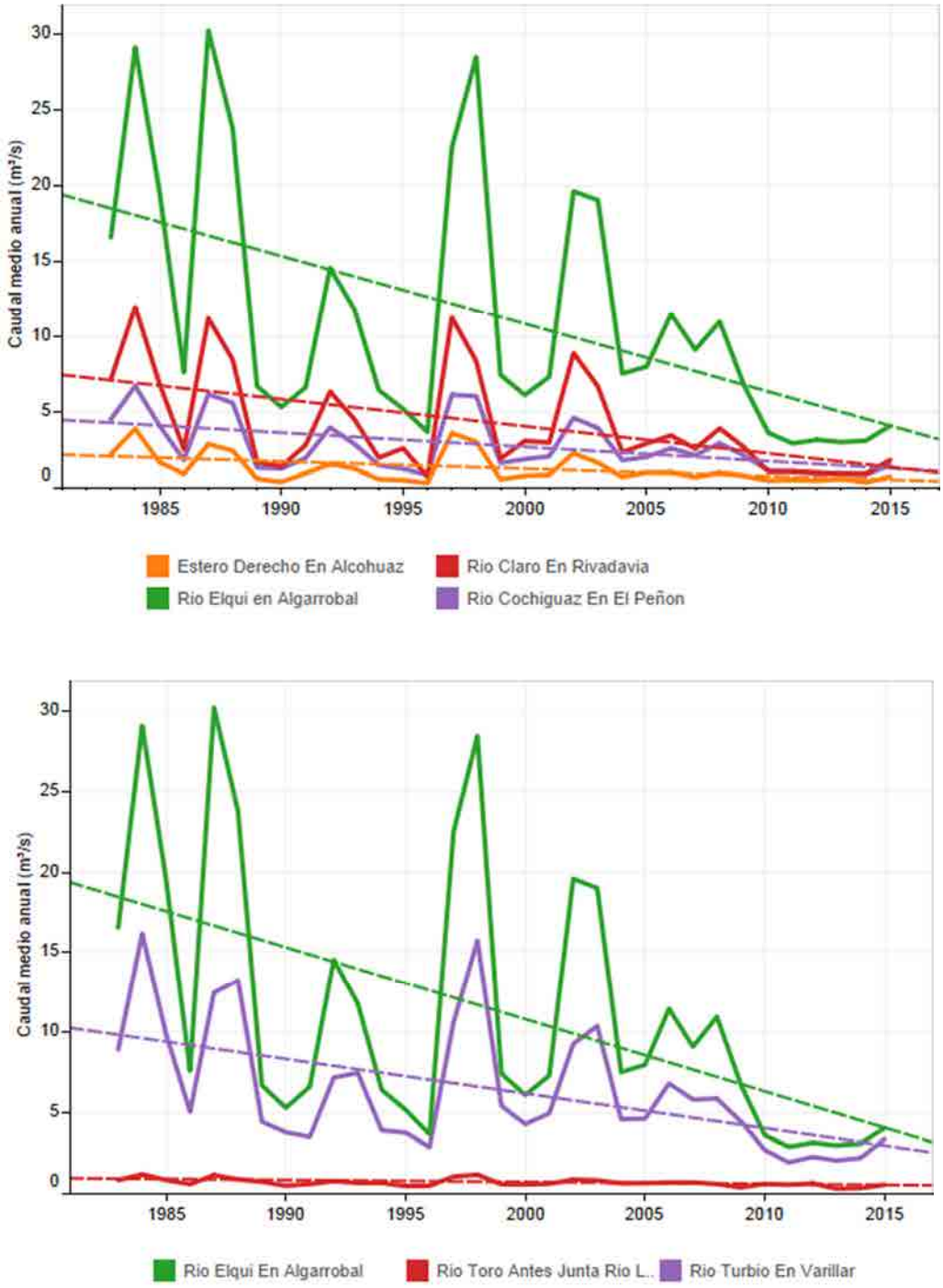


Figura 6-73. Evolución temporal de los caudales en la cuenca del río Claro y cuenca del río Turbio. Fuente: Dirección General de Aguas.

6.4.4 EVAPORACIÓN

En la cuenca de los ríos Claro y Turbio, se estima que la evaporación se produce mayormente desde superficies libres (lagunas) y humedales.

La evaporación tanto desde lámina libre como desde humedales depende principalmente de las condiciones meteorológicas tales como radiación solar, temperatura, humedad relativa y ventilación.

La expresión utilizada para obtener la descarga total en una cuenca corresponde a la **Ecuación 6-1**. En los siguientes puntos de este numeral se detalla cómo ha sido calculado cada uno de los términos (CAZALAC-RODHOS, 2006.).

Ecuación 6-1

$$Descarga\ total = E_L + ET + E_N$$

Donde,

$Descarga\ total$: es la salida del balance hídrico por evapotranspiración *[L^3/T]*

E_L: evaporación de lámina libre *[L^3/T]*

ET: evapotranspiración desde vegetación *[L^3/T]*

E_N: evaporación desde napas *[L^3/T]*

De los tres parámetros que conforman el cálculo de la descarga total, se han tenido en cuenta la evaporación desde lámina libre y la evapotranspiración desde vegetación. No se ha estimado la evaporación desde napa al no existir zonas con la profundidad del nivel freático somero. Tal y como se observa en la caracterización hidrogeológica, la profundidad del nivel freático en el acuífero aluvial se encuentra por sobre los 2 m (profundidad de extinción) por lo que se considera que no existe evaporación desde napa.

6.4.5 ZONAS DE EVAPORACIÓN

En base al mapa de usos de suelo del Ministerio de Medioambiente de Chile, se han distinguido dos sectores con potencial evaporante.

En la parte alta de la cuenca del río Turbio, se encuentra el embalse La Laguna, con una superficie de 1,58 Km^2 y en la parte intermedia de la misma cuenca, se encuentra un sector de humedales de gran extensión los cuales tiene una extensión de 2,95 Km^2 (**Figura 6-74**). Los datos de superficie de ambos cuerpos se han calculado en base al mapa de usos de suelo.

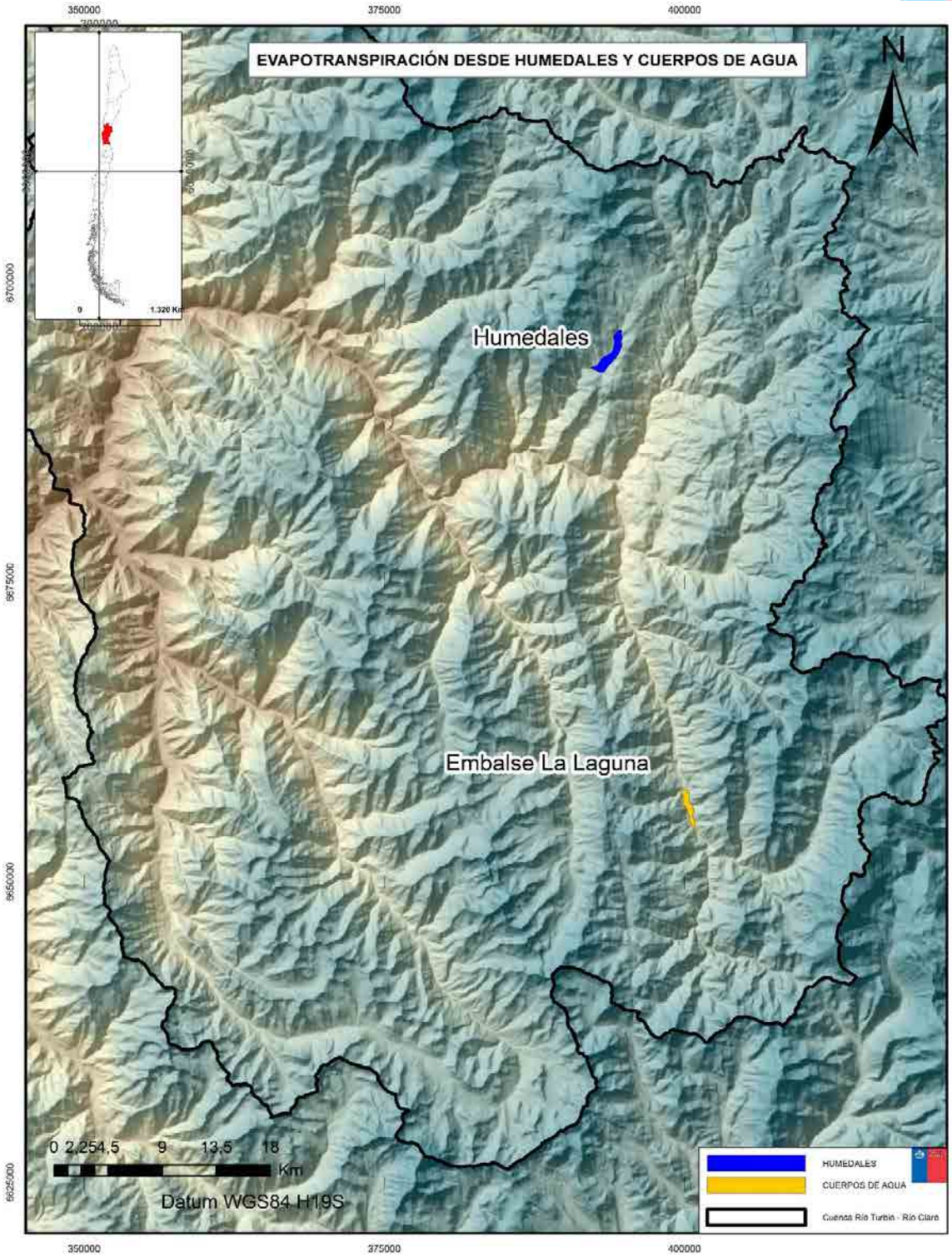


Figura 6-74. Distribución de lagunas y humedales en la zona de estudio: Fuente: modificado de Ministerio de Medioambiente de Chile.

6.4.6 EVAPORACIÓN DESDE LÁMINA LIBRE (LAGUNAS)

Se entiende como evaporación desde lámina libre, toda evaporación que se produce desde lagunas o cuerpos de agua expuestos de forma directa a la radiación solar.

La evaporación desde lámina libre se calcula a partir de multiplicar la evaporación potencial (EP) por el coeficiente de reducción por salinidad (K_s) y por la superficie de lámina libre, es decir por el área de cada laguna. En este caso como el agua de la laguna tiene una densidad de 1,0 g/cm^3, este factor no afecta al resultado.

El cálculo se realiza de acuerdo a la metodología empleada por Mardones (Mardones, 1998) y por DICTUC (DICTUC, 2004) mediante la **Ecuación 6-2**:

$$E_L = EP \cdot k_s \cdot A_L \qquad \textbf{Ecuación 6-2}$$

Donde,

E_L: evaporación desde lámina libre *[L^3/T]*

EP: evaporación potencial *[L/T]*

k_s: coeficiente de reducción por salinidad *[1]*

A_L: área de la superficie en lámina libre *[L^2]*

Los datos de evaporación potencial (EP) se calcularon a partir de los datos de Evaporación potencial de referencia (EP_0) extraídos del informe de CAZALAC, 2006 y se ajustaron con un coeficiente de embalse (k_e) de 0,7 (DGA, 2009). Según CAZALAC, 2006 la tasa de evaporación potencial de referencia (EP_0) en el embalse La Laguna es de 2.203 mm/a que multiplicado por el coeficiente de embalse (k_e = 0,7), sería de 1.542 mm/a (4,22 mm/d).

A continuación en la **Figura 6-36** se presentan los resultados del cálculo de la evaporación desde lámina libre en el embalse La Laguna.

Sector	Superficie (m^2)	EP (mm/d)	Et (L/s)
Embalse La Laguna	1.582.210	4,22 mm/d	77,4

*Datos utilizados: Ks = 1; K_e= 0,7; EP_0 = 4,22 mm/d.

Tabla 6-36. Resultados del cálculo de la salida por evaporación en el embalse La Laguna. Fuente: elaboración propia.

6.4.7 EVAPOTRANSPIRACIÓN DESDE VEGETACIÓN

La transpiración de la vegetación (T) es la salida de agua a la atmosfera que se produce a causa de los procesos metabólicos de las plantas. La cuenca del río Turbio presenta un sector de humedales donde las plantas se alimentan del agua del acuífero haciendo que en una zona con un clima árido, de forma natural existan zonas vegetadas. Para el cálculo de la evapotranspiración, no se han considerado las areas cultivadas puesto que el agua utilizada para riego se extrae únicamente de los canales y esta salida ya se ha considerado.

Este numeral se estructura detallando la metodología de cálculo de la transpiración vegetal y su aplicación, entregando como resultado la demanda de agua que mantiene la vegetación en buen estado.

6.4.7.1 METODOLOGÍA DE CÁLCULO

El cálculo de la transpiración de la vegetación (T) se realiza a partir del valor de la evaporación potencial (EP), que se obtuvo en el numeral anterior, corregido por el coeficiente de cultivo (kc). El coeficiente de cultivo es utilizado para limitar la magnitud de la evaporación potencial en función de las características fisiológicas de las plantas (FAO, 2006). Finalmente, al igual que para la evaporación desde lámina libre, el valor de la evaporación resultante se aplica a una determinada área correspondiente a un tipo de vegetación (**Ecuación 6-3**).

$$T = EP \cdot k_c \cdot A_c \qquad \textbf{Ecuación 6-3}$$

Donde,

T: evapotranspiración de la vegetación *[L^3/T]*

EP: evaporación potencial *[L/T]*

k_c: coeficiente de cultivo *[1]*

A_c: área de vegetación *[L^2]*

En el informe de la FAO (2006), se muestran una serie de coeficiente de cultivo que depende del tipo de cobertura vegetal. Estos valores asumen una cobertura tipo densa de la vegetación en la que las plantas se disponen una al lado de la otra. De este modo, para el caso de coberturas de vegetación con densidad inferior a ésta, las áreas de cada tipo de vegetación deben corregirse a partir de sus niveles de cobertura.

En el caso de los humedales, al ser zonas con alta densidad de vegetación y con el nivel freático muy cerca de la superficie, se les otorga un valor de coeficiente de cultivo de 1.

A continuación en la **Tabla 6-37** se presentan los resultados del cálculo de la evapotranspiración desde humedales en el área de estudio.

Sector	Superficie (m^2)	EP (mm/d)	Et (L/s)
Humedal	2.955.076	4,22 mm/d	**144,5**

*Datos utilizados: Kc = 1; K_e= 0,7; EP_0 = 4,22 mm/d.

Tabla 6-37. Cálculo de la evapotranspiración desde humedales en el área de estudio. Fuente: elaboración propia.

Para concluir la sección, el volumen total evaporado resultante de la suma de la evapotranspiración desde humedales (144,5 L/s) y desde la lámina libre (77,4 L/s) es de **221,9 L/s.**

6.5 CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA

Desde el punto de vista geológico, la zona alta de la cuenca, donde se desarrollan los ríos Claros y Turbio, fue intensamente afectada por las glaciaciones del Pleistoceno. A pesar de que las formas glaciales están poco desarrolladas y se limitan a las partes superiores de los valles, su influencia ha llegado incluso hasta algunos kilómetros aguas abajo de Rivadavia, presentándose a lo largo de este recorrido depósitos morrénicos de hasta más de 100 m de espesor provenientes de arrastre.

En la cuenca de estudio hay una fuerte presencia de materiales graníticos, principalmente de edad Paleozoica, aunque también más recientes.

Debido a la dinámica erosiva fluvial y glacial, se han ido desarrollando pequeños rellenos sedimentarios que son los que conforman los acuíferos.

Se presenta a continuación una descripción de las unidades geológicas incluidas en la Cuenca del río Claro y río Turbio (SERNAGEOMIN, 2010).

6.5.1 PALEOZOICO

El Paleozoico está representado por materiales sedimentarios marinos y transicionales, metamórficos, volcánicos y plutónicos, siendo éstos últimos los más representativos en cuanto a presencia en la zona de estudio.

Secuencias sedimentarias marinas (DC1)

De edad Devónico Carbonífero. Secuencias sedimentarias marinas y en parte transicionales, formadas por arenisca cuarzofeldespática, lutitas y conflomerados.

Con presencia testimonial en la zona de estudio, concretamente de forma aislada al sur de la cuenca del río Claro.

Metareniscas (DC4)

También de edad Devónico Carbonífero, con poca representación en la zona de estudio pero algo mayor que la anterior. Se trata de rocas metamórficas, concretamente metareniscas, filitas, mármol y chert.

Batolito granítico (CPg)

Batolito del Carbonífero-Pérmico, compuesto por granitos, granodioritas, tonalitas y dioritas fundamentalmente. Ocupa la mayor parte de la zona de estudio, aflorando en una gran franja norte-sur, en la mitad oeste de la cuenca de estudio. Es la principal roca de caja de los materiales acuíferos.

Secuencias volcánicas continentales (CP3)

Secuencias volcánicas del Carbonífero-Pérmico, con predominio de andesitas, riolitas, y algunas intercalaciones de areniscas y calizas. Afloran en la parte centro-norte de la cuenca del río Turbio.

Fm Pantanoso y Estratos de Guanaso Sonso (PTr3)

Formación volcánica, Permo-Triásica, que aflora en la parte más alta de la cuenca del río Turbio formando coladas de lava y domos. Las rocas principales de esta formación son riolitas, dacitas con intercalaciones de areniscas y conglomerados.

Batolito Permo-Trias (PTrg)

También de edad Permo-Triásica, se trata de un batolito granítico de cierta importancia en cuanto a su extensión areal, que aflora en la zona central mayoritariamente. Compuesto por granitos, pórfidos graníticos y granodioritas.

6.5.2 MESOZOICO

En el mesozoico también se encuentran tanto materiales sedimentarios marinos, continentales y transicionales, como volcánicos y plutónicos.

Granitoides triásicos (Trg)

Aflorando de forma aislada por distintos puntos de la zona de estudio, se encuentran estos materiales plutónicos de edad Triásica, compuestos por granitos, granodioritas, dioritas y pórfidos graníticos.

Secuencias volcánicas continentales (TrJ3)

En la zona este y noreste de la cuenca, aforan unas secuencias volcánicas continentales y transicionales del Triásico-Jurásico inferior, formadas por brechas volcánicas, basaltos, riolitas y areniscas.

Secuencias sedimentarias marinas litorales (Ji1m)

Del Jurásico inferior-medio, y con muy poca representatividad en la zona de estudio, se encuentran unas secuencias sedimentarias formadas por calizas, areniscas calcáreas, lutitas y basaltos en menor medida.

Secuencias sedimentarias y volcánicas continentales (Js2c)

Del Jurásico medio-superior, y también con poca representatividad en la zona de estudio, afloran unas secuencias sedimentarias y volcánicas continentales formando unos depósitos piroclásticos de dacitas, andesitas y riolitas con intercalaciones de rocas sedimentarias.

Secuencias sedimentarias continentales aluviales, fluviales y lacustres (Kia1c)

De edad Aptiano-Cenomanian, estas secuencias sedimentarias afloran en prácticamente todo el límite oeste de la cuenca de los ríos Turbio y Claro, y son rocas consolidadas tales como las areniscas, conglomerados, limolitas y calcilutitas.

Volcánico continental (Ks3i)

Afloran junto con las anteriores, en su borde occidental. De edad Cretácico superior, estas secuencias forman lavas y domos formados por basaltos, dacitas, depósitos piroclásticos y materiales sedimentarios intercalados.

Batolito (KTg)

En la zona oeste de la cuenca, aflora un pequeño batolito granítico de edad Cretácico-Paleógeno. Granodiorita, diorita y pórfido granítico.

6.5.3 CENOZOICO

Secuencias y complejos volcánicos continentales (PE3i)

Lavas y domos volcánicos del Paleoceno-Eoceno compuesto por andesita basáltica, dacitas y depósitos piroclásticos con alternancias de materiales sedimentarios.

Intrusivos (PEg)

Materiales intrusivos de edad Paleoceno-Eoceno compuestos por monzodioritas, granodioritas, monzogranitos y dioritas. Afloran al norte de la cuenca de estudio.

Intrusivos (Og)

Granodioritas, mozongranitos, tonalitas y dioritas del Oligoceno, que afloran localmente al sur de la cuenca del río Claro.

Volcanosedimentarios (OM2c)

Andesitas, dacitas y materiales sedimentarios del Oligoceno-Mioceno que se localizan en la parte alta de la cuenca.

Secuencias y centros volcánicos (OM3)

Oligoceno-Mioceno. Centros volcánicos aislados, formados por andesitas, riolitas, brechas volcánicas y piroclastos.

Depósitos de remoción en masa (PPl1r)

Brechas, limos y arenas del Plioceno-Pleistoceno.

6.5.4 CUATERNARIO

Depósitos morrénicos, fluvioglaciares y glaciofluviales (Q1g)

Pequeños depósitos del cuaternario (Pleistoceno-Holoceno), localizados en la parte alta de la cuenca, formados por bloques, limos, arcilla y gravas mal clasificado muy heterogéneos en su distribución litológica.

Depósitos aluviales, coluviales o lacustres (Qa)

Depósitos aluviales del cuaternario, formados por gravas, arenas, limos y arcillas.

Depósitos fluviales (Qf)

Depósitos fluviales, ligados a los cauces de los ríos y esteros, compuestos por gravas, arenas, limos y arcillas.

A continuación en la **Figura 6-75** se muestra la distribución de las unidades geológicas que conforman el área de estudio.

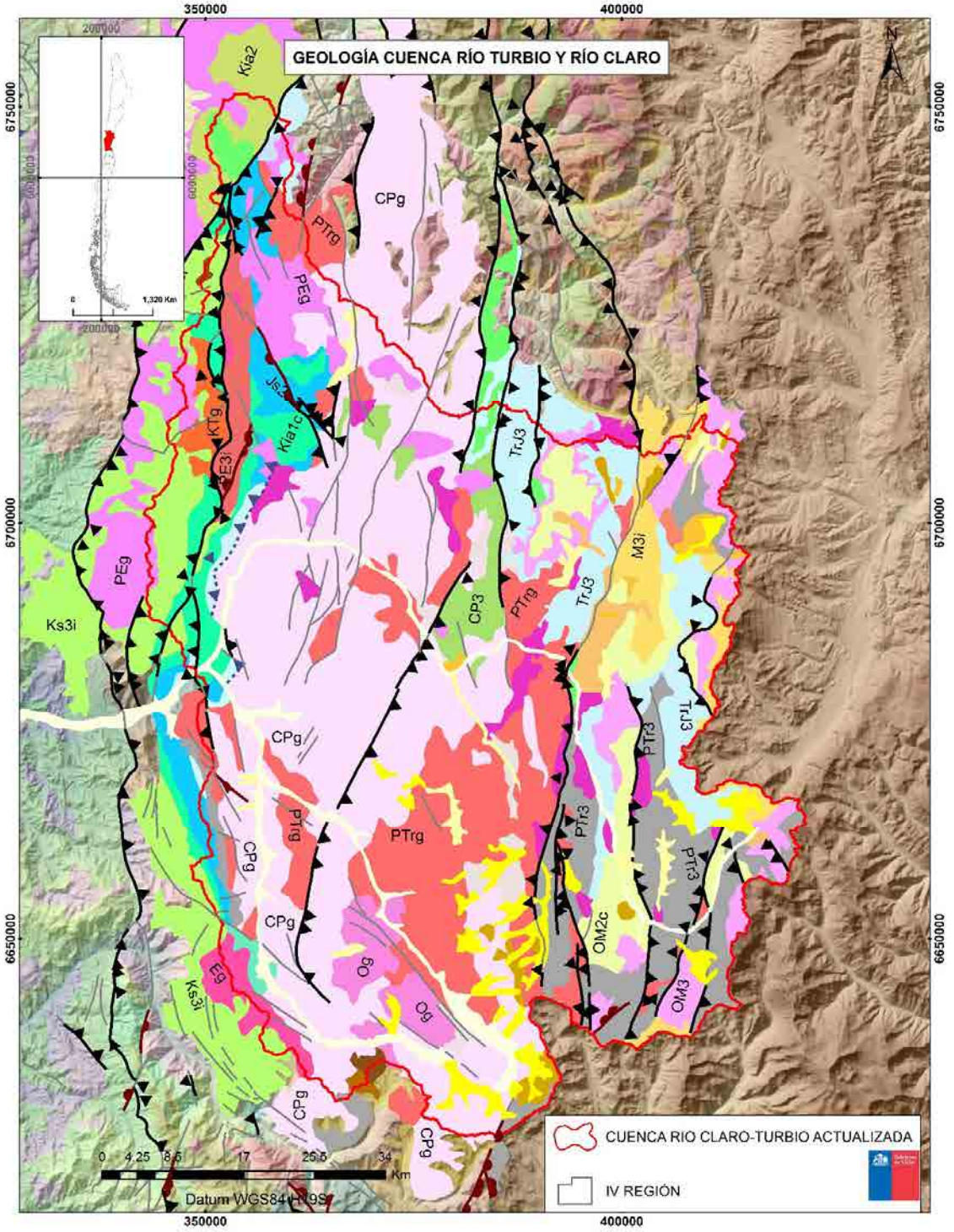


Figura 6-75. Geología de la cuenca de los ríos Turbio y Claro. Fuente: SERNAGEOMIN (2010).

6.6 CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA

Durante el mes de mayo de 2016 se realizó una campaña de geofísica en las cuencas de los ríos Turbio y río Claro la cual tuvo como objetivo caracterizar hidrogeológicamente el acuífero aluvial.

Se realizaron un total de siete perfiles, tres perfiles por cada cuenca y un perfil ubicado en el cierre del área de estudio.

En cada perfil se realizaron mediciones mediante los métodos TEM y Gravimetría. El primer método se utilizó con el objetivo de definir la superficie freática y el contacto entre los depósitos aluviales y el basamento, y el segundo método para definir la geometría del basamento.

Se realizaron un total de 22 puntos TEM y 59 puntos de gravimetría repartidos entre los 7 perfiles.

En el **Anexo 6 Geofísica** se presenta el informe realizado por la empresa Geodatos donde se explican los métodos utilizados además de los resultados observados. La interpretación hidrogeológica de los resultados se describe en los numerales de geometría y piezometría que se muestran a continuación.

A continuación se presenta la ubicación general de los perfiles realizados, así como el detalle de cada perfil se muestra en las siguientes figuras.

- **Figura 6-77**: perfiles salida río Turbio, salida río Claro y salida del área de estudio (río Elqui).
- **Figura 6-78, Figura 6-79**: perfiles río Claro.
- **Figura 6-80, Figura 6-81:** perfiles río Turbio.

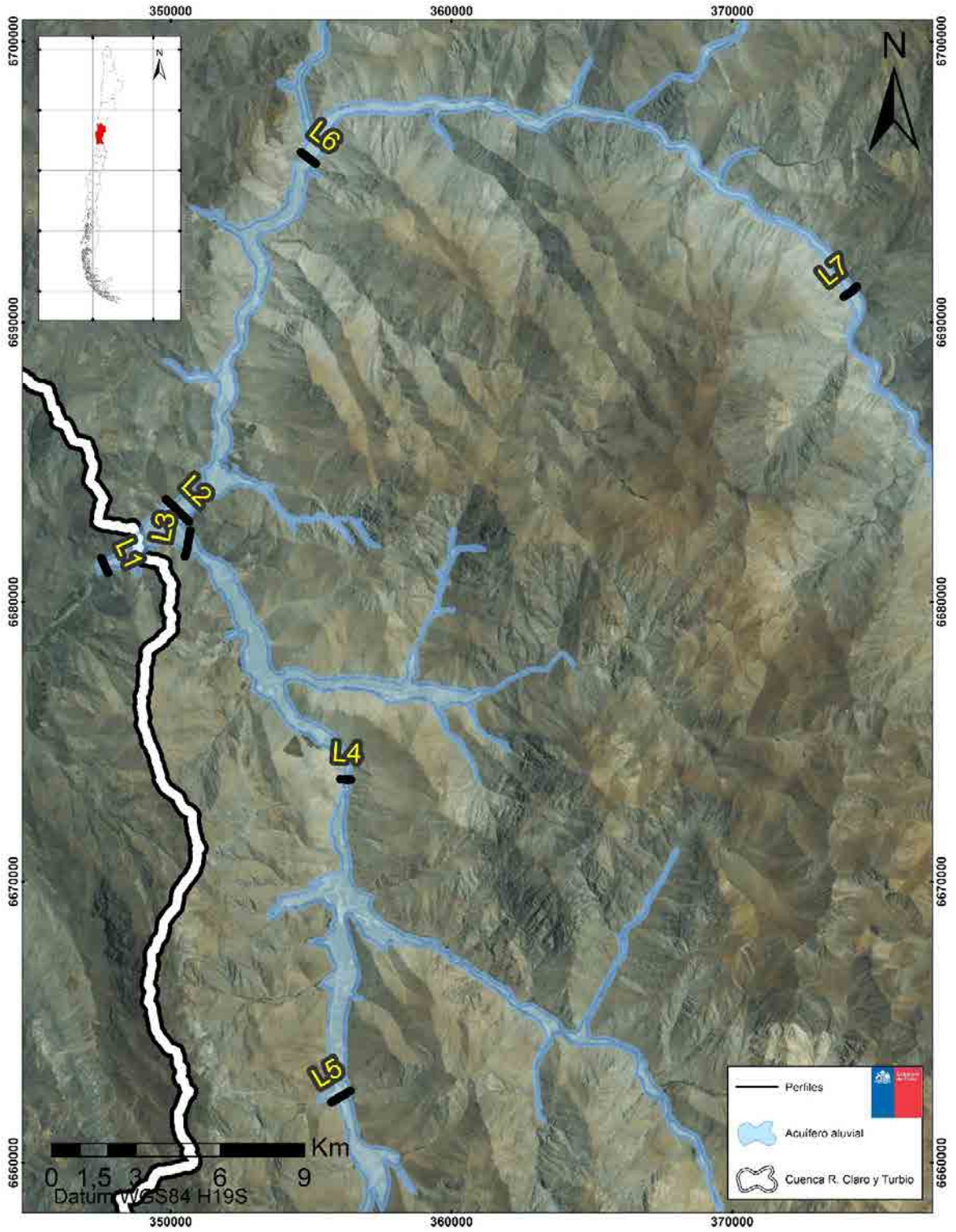


Figura 6-76. Delimitación del acuífero aluvial y ubicación de los perfiles de geofísica. Fuente: elaboración propia.

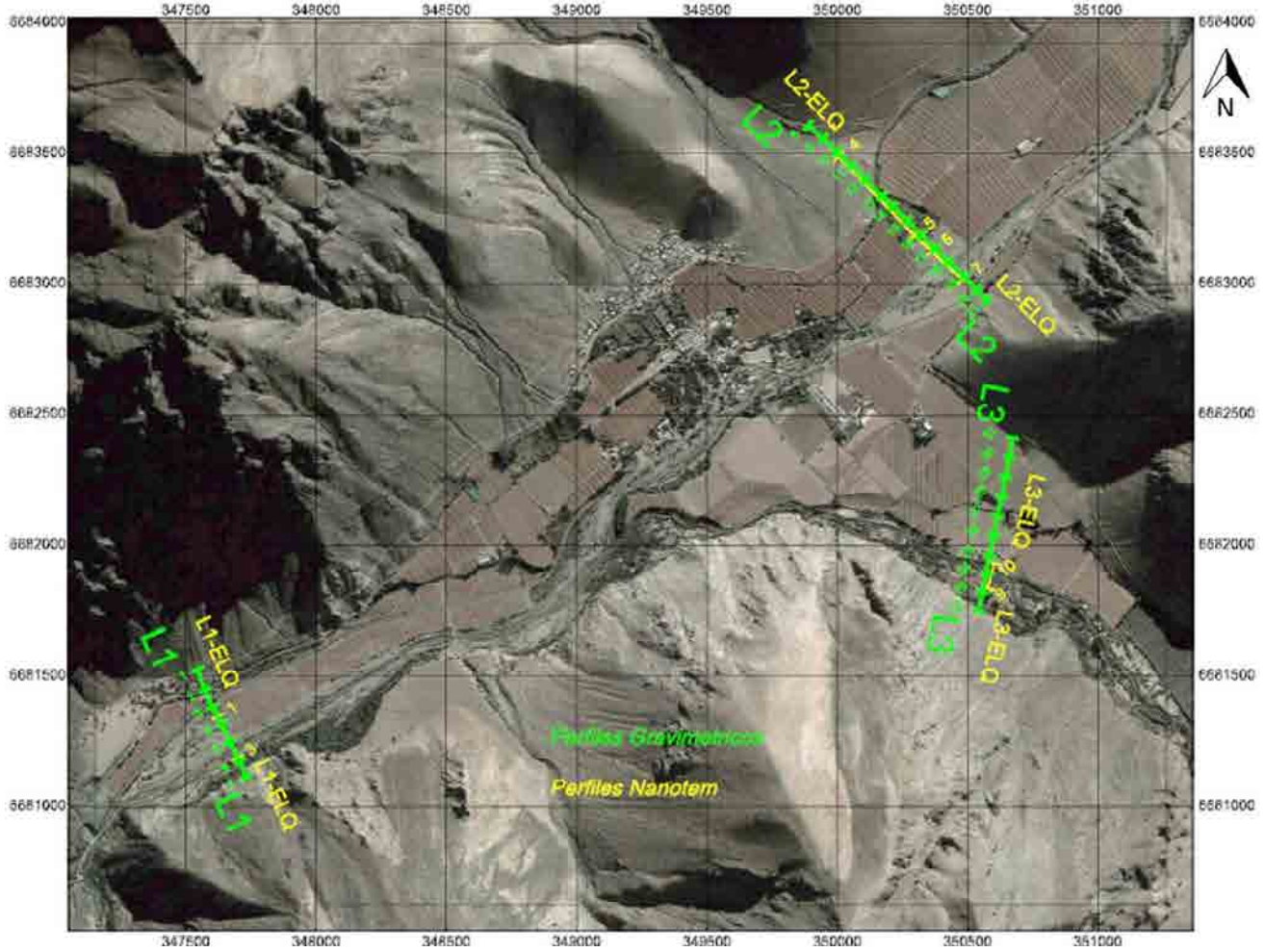


Figura 6-77. Ubicación perfiles geofísicos en la salida de las cuencas del río Turbio y río Claro. Fuente: Geodatos.

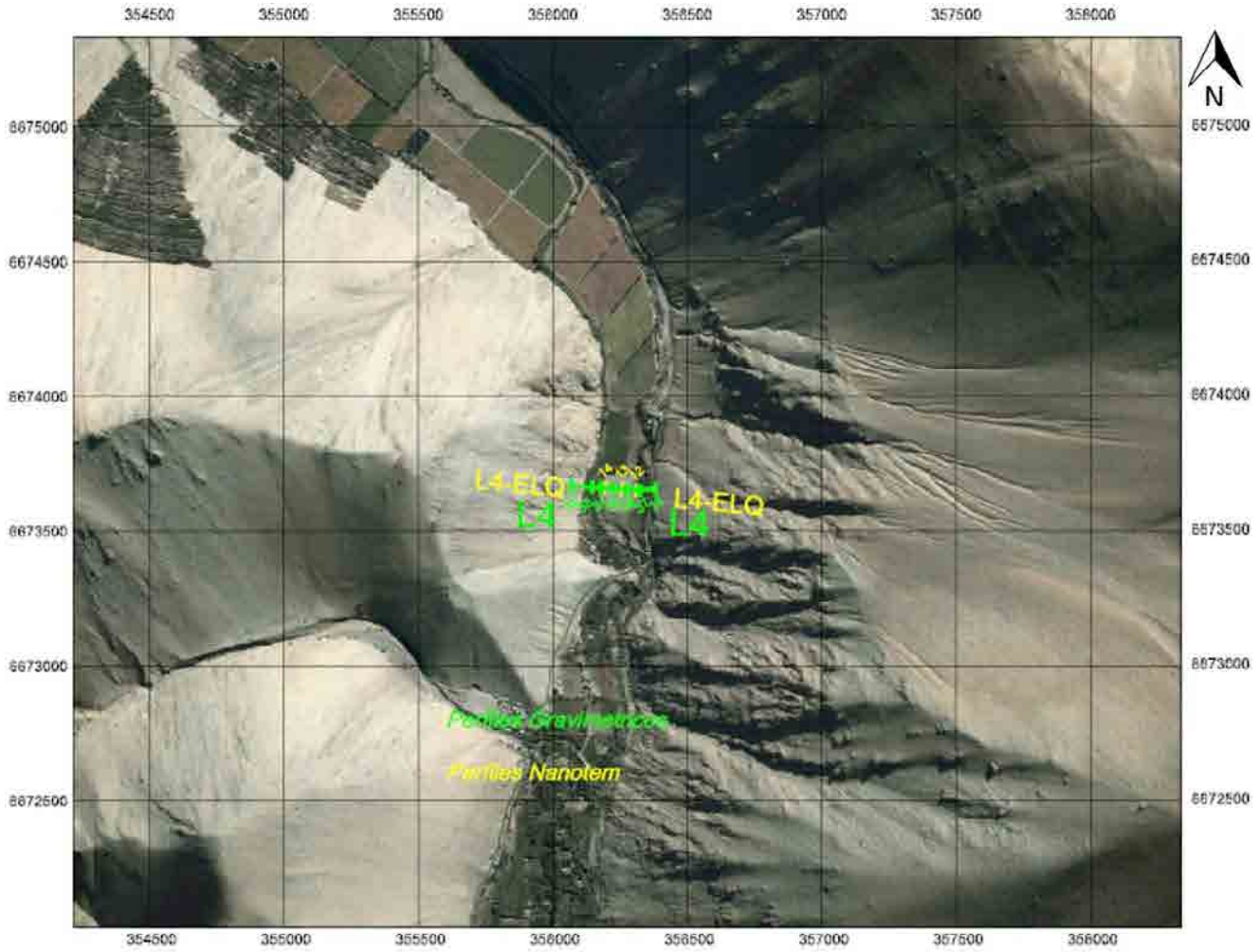


Figura 6-78. Ubicación del perfil L4 en el río Claro. Fuente: Geodatos.

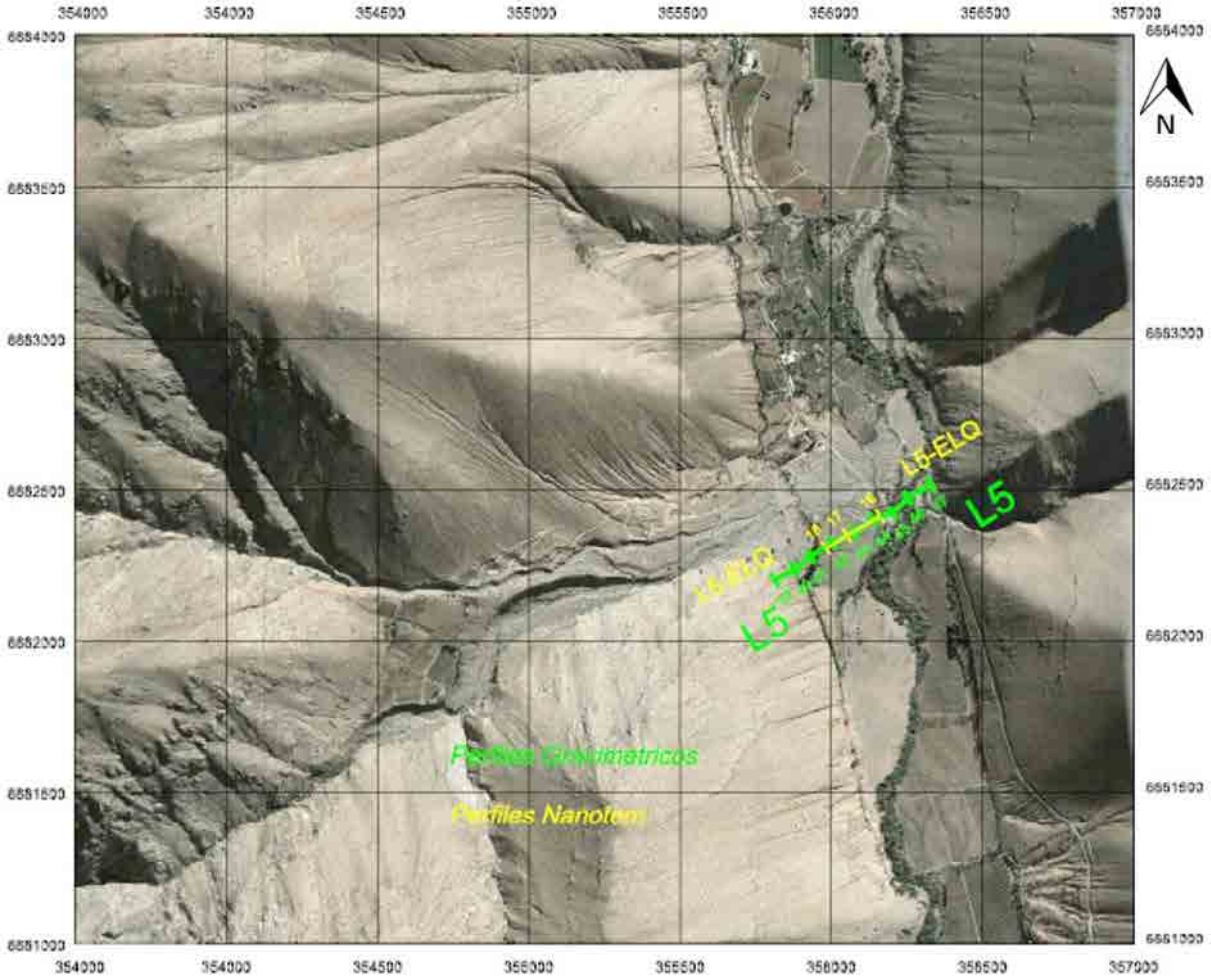


Figura 6-79. Ubicación del perfil L5 en el río Claro. Fuente: Geodatos.

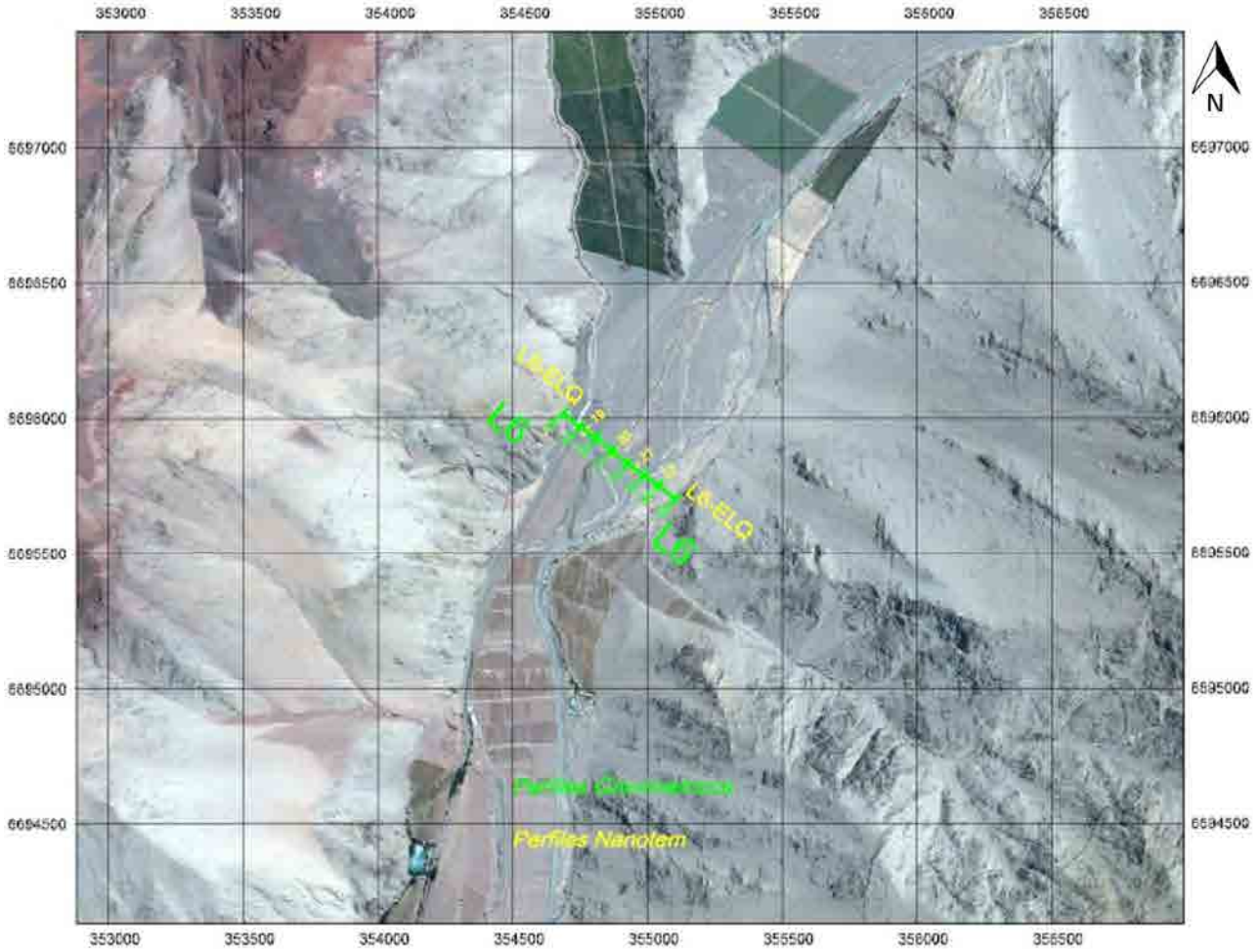


Figura 6-80. Ubicación del perfil L6 en el río Turbio. Fuente: Geodatos.

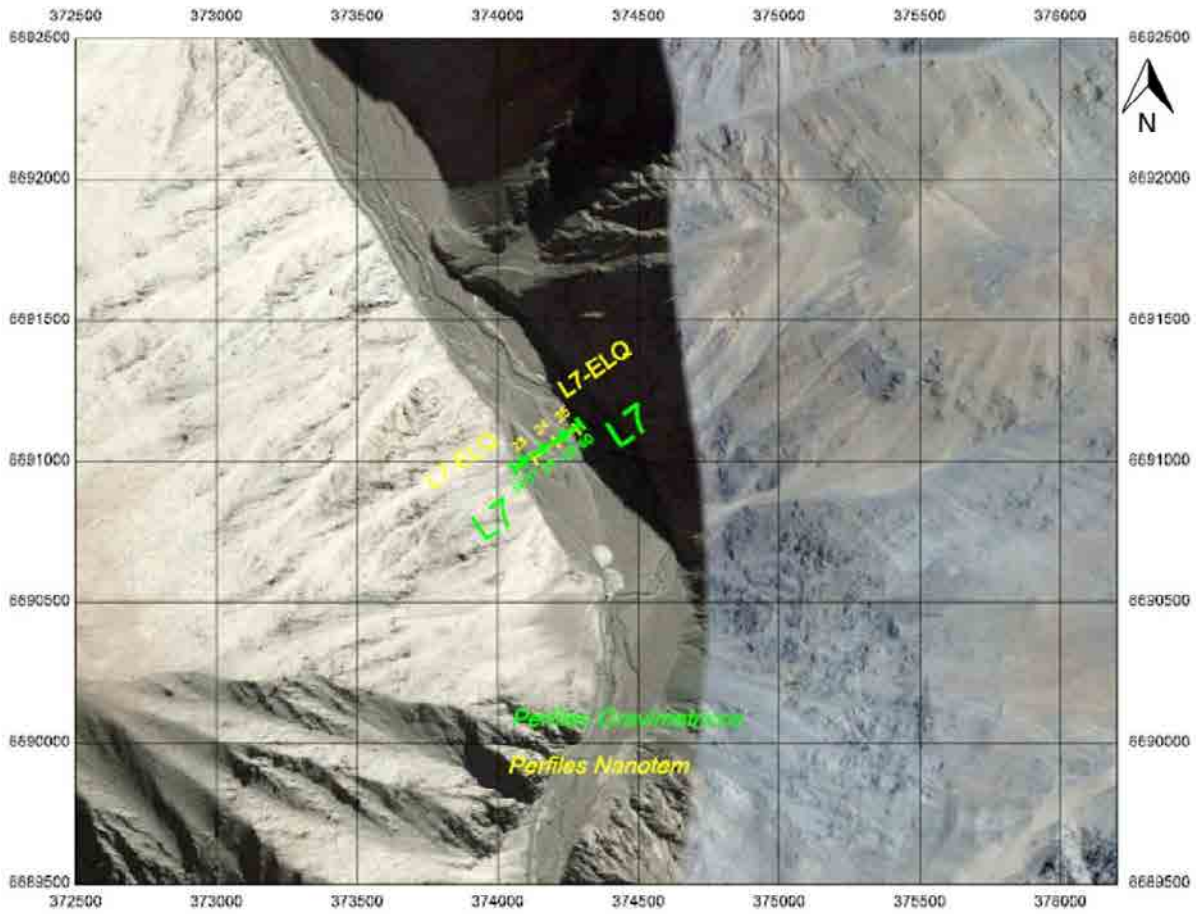


Figura 6-81. Ubicación del perfil L7 en el río Turbio. Fuente: Geodatos.

6.7 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA

6.7.1 DEFINICIÓN DE ACUIFEROS

A partir de los materiales geológicos presentes en la zona de estudio, se ha realizado una agrupación de los mismos en función de sus características hidrogeológicas, quedando clasificada la zona de la siguiente forma:

- **Basamento impermeable**: materiales consolidados, formados por rocas que no conforman acuífero o que raramente puedan hacerlo, salvo localmente en zonas fracturadas y/o fisuradas. Estos materiales son principalmente intrusivos (granitos, granitoides, granodioritas, etc.), así como lavas y piroclastos consolidados, andesitas, dacitas y riolitas.
- **Relleno sedimentario reciente:** rellenos sedimentarios no consolidados, fluviales fundamentalmente. Bolones, gravas, limos y arcillas.

6.7.2 GEOMETRÍA

La definición del relleno sedimentario, clasificado como acuífero, se ha definido tomando como guía la cartografía geológica, aunque realmente el contacto roca-acuífero se ha determinado a partir del análisis de la imagen de satélite de precisión, a escala generalmente 1:4.000 o inferior.

La distribución en planta de los materiales acuíferos se muestra en la **Figura 6-83**. Asimismo, a partir de la campaña geofísica, se ha determinado el espesor de relleno sedimentario en distintas secciones del acuífero estimando un espesor aluvial que en general tiene entre 40 y 70 m y que en algunos casos puede llegar a los 100 metros de potencia.

El espesor de aluvial no sigue la misma tendencia en el río Turbio y en el río Claro, en el primero el espesor incrementa conforme nos acercamos a la confluencia mientras que en el río Claro sucede lo contrario. Algo similar se observa con el espesor saturado de ambos acuíferos.

La geometría de las secciones muestra que la mayor profundidad del acuífero se encuentra en la parte central de éste, donde el basamento en episodios anteriores fue más erosionando debido a la acción fluvial.

Los depósitos que forman el acuífero aluvial, tal y como se mencionó en la caracterización geológica, son gravas, limos y arcillas. No siempre se encuentran distribuidos de forma homogénea, en algunos puntos se observan niveles de gravas y bolones que hacen de estos sectores, puntos estratégicos de extracción de agua por su características hidrogeológicas. En los niveles de gravas y bolones, la permeabilidad del medio acostumbra a ser mayor pudiendo entregar caudales mayores. No sucede lo mismo en los sectores donde el relleno aluvial contiene muchos finos (arcillas y limos, color verde en los perfiles) donde la construcción de un pozo no siempre da buenos resultados.

Por último, es importante mencionar que en todos los perfiles realizados, no se observa una conexión entre río y acuífero. No se descarta que exista un aporte por goteo desde el río al acuífero aunque éste no sería muy abundante dado que no se observan indicios en los perfiles. Posibles aportes del acuífero al río, se han observado únicamente en terreno, en el sector del pueblo del "Pueblo Hundido" y se debe a un hecho particular de esta zona (**Figura 6-87**).

La desconexión se produce en prácticamente todo el aluvial, este hecho fue confirmado en terreno tanto en el momento de medir el nivel freático en pozos como mediante observaciones en terreno. En la **Figura 6-82** se muestra como en el costado derecho del río hay construida una zanja donde la base se encuentra a varios metros de profundidad respecto del río y no se observa el nivel freático. Esta foto fue tomada cerca de Juntas, camino del embalse La Laguna.



Figura 6-82. Imagen representativa de la relación río acuífero. Ubicación: río La Laguna entre Juntas y el embalse La Laguna. Fuente: elaboración propia.

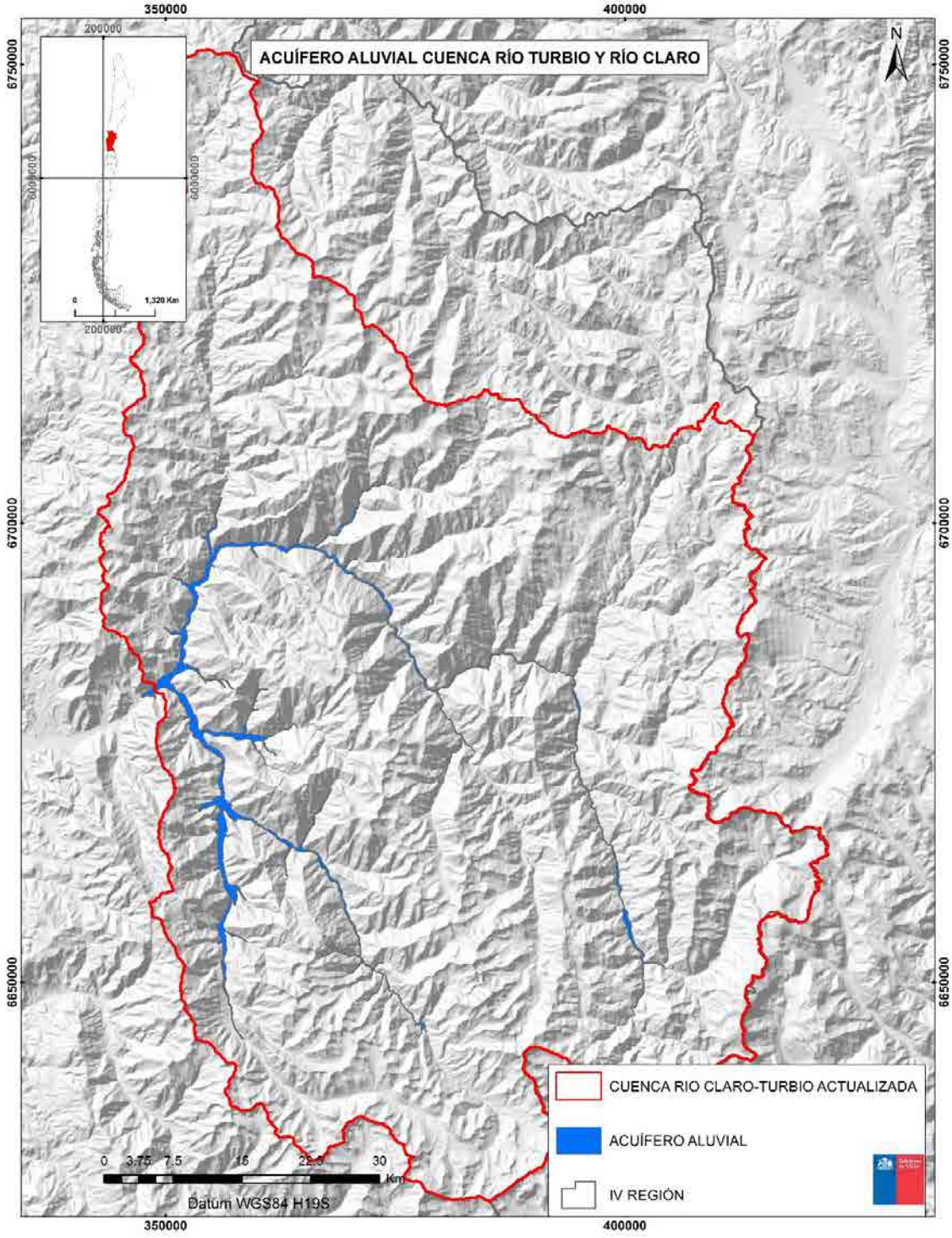


Figura 6-83. Distribución en planta de los materiales aluviales que forman el principal acuífero de la zona de estudio. Fuente: elaboración propia.

INTERPRETACIÓN DE PERFILES GEOFÍSICOS

A continuación se describen los diferentes perfiles TEM realizados en la zona de estudio. Si bien se pudo observar correctamente el contraste de resistividades entre aluvial seco - aluvial saturado – basamento, no se pudo representar la geometría completa de las secciones. La técnica geofísica TEM no se puede ocupar en zonas con estructuras metálicas que puedan interferir en la señal, tales como las alambradas que se coloca en los parrones. Por este motivo como el sector del río Elqui es una zona de alta actividad agrícola, en concreto de cultivo de uva, no se pudo medir en algunos puntos.

Salida Cuenca

Perfil L1 (río Elqui)

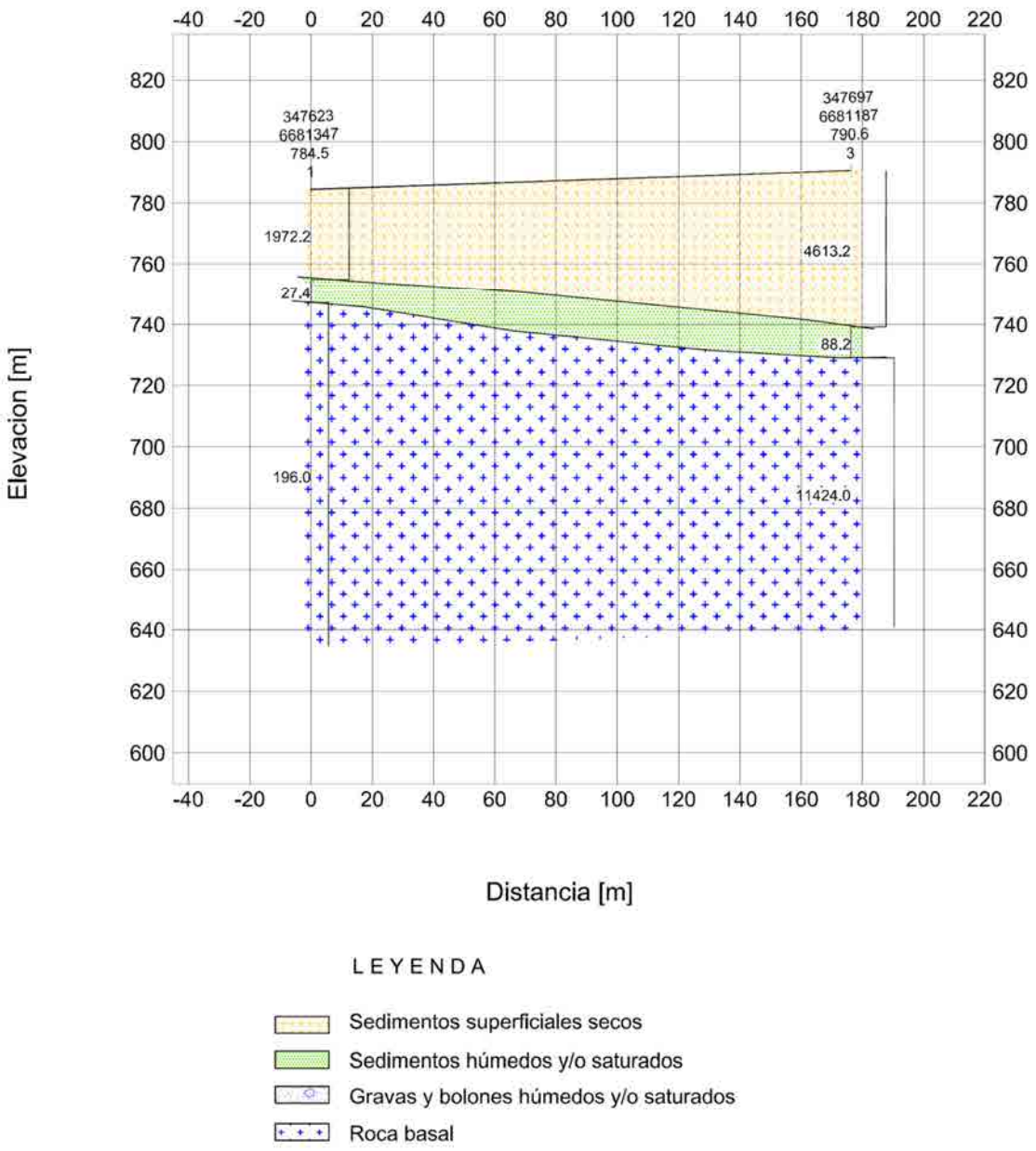


Figura 6-84. Perfil L1, salida del área de estudio. Fuente: Geodatos.

Este perfil representa el acuífero en su salida del área de estudio (**Figura 6-84**). El acuífero en este punto tiene un espesor saturado de entre 10-15 m, con una geometría continua en forma de tabla y está formado por gravas, limos y arcillas.

Río Turbio

En el río Turbio se realizaron tres perfiles a lo largo del acuífero aluvial (**Figura 6-85**). Un perfil (Perfil L2) se realizó en la parte baja, justo antes de la confluencia con el río Claro y otros dos perfiles (L-6 y L7) aguas arriba donde el aluvial cada vez se hace más estrecho. Tal y como se observa en los perfiles, los principales materiales que conforman el aluvial son principalmente gravas con limos y arcillas y en algunos puntos niveles de gravas y bolones (ver leyenda en perfil L1).

Desde aguas arriba hacia abajo, se observa tanto un incremento del espesor de los depósitos fluviales pasando de 70 m en el perfil L7 hasta 100 m en el perfil L2 como un incremento del espesor saturado. En el perfil L7 el espesor saturado es de apenas 10 m, en el perfil L6 incrementa a unos 15 metros y en la parte final (L2) llega a tener cerca de 80 metros. Fuera de lo esperable, la granulometría de los depósitos aumenta conforme nos alejamos de la cabecera. La presencia de bolones y gravas incrementa en la parte baja de la cuenca del río Turbio mientras que en la parte alta predominan materiales más finos.

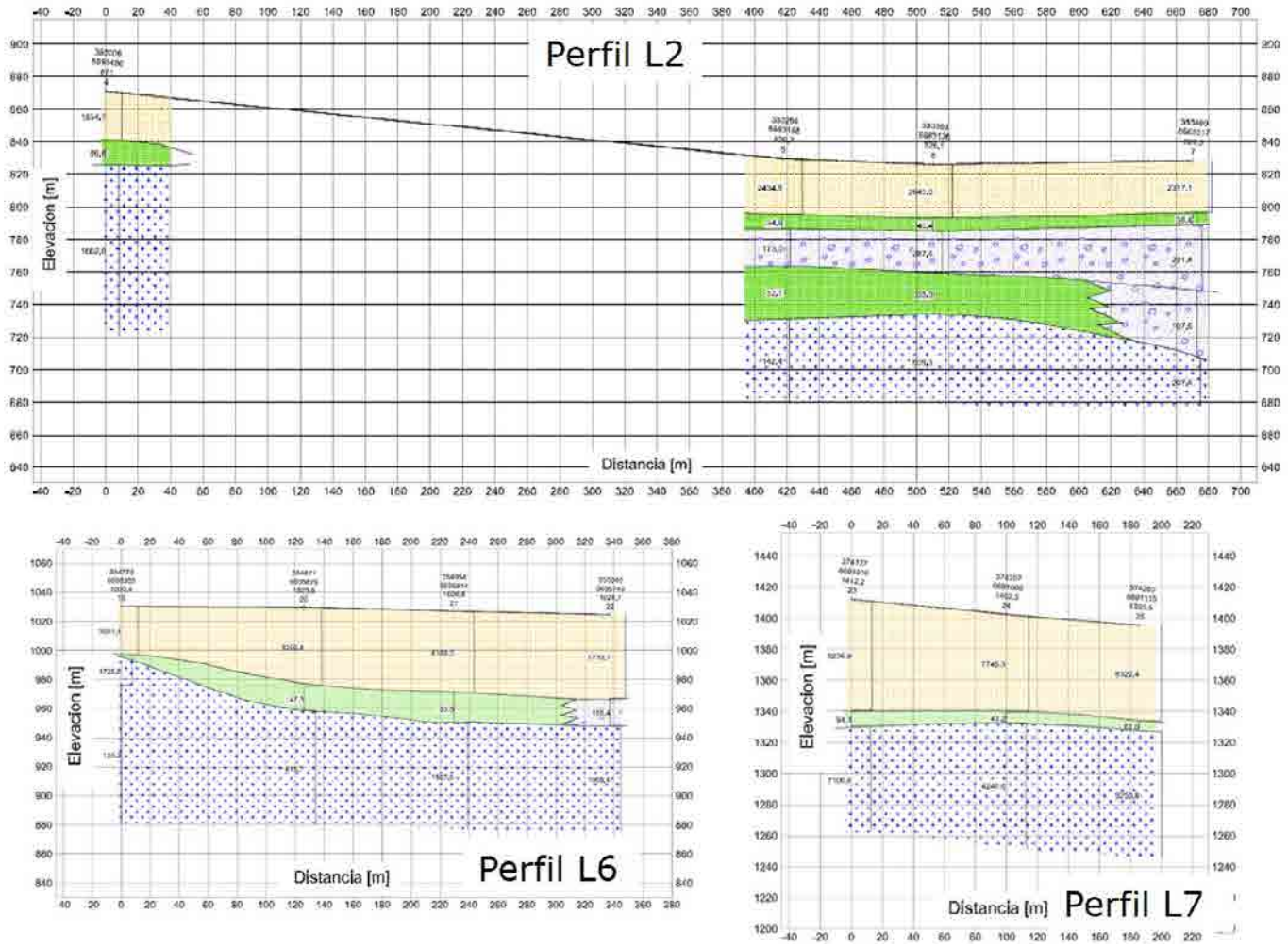


Figura 6-85. Perfiles río Turbio. En orden desde cabecera a desembocadura: L7, L6, L2. Fuente: Geodatos.

Río Claro

En el río Claro se realizaron tres perfiles a lo largo del acuífero aluvial (**Figura 6-86**). Un perfil (Perfil L3) se realizó en la parte baja, justo antes de la confluencia con el río Turbio y otros dos perfiles (L-6 y L7) aguas arriba donde el aluvial cada vez se hace más estrecho. Tal y como se observa en los perfiles, los principales materiales que conforman el aluvial son principalmente gravas con limos y arcillas y en algunos puntos niveles de gravas y bolones (ver leyenda en perfil L1).

A diferencia de lo observado en el río Turbio, los espesores en este acuífero decrecen aguas abajo pasando de espesores de unos 80 m en la parte alta (L5) hasta espesores de entre 50 m y 60 m en la parte media-baja (L3 y L4). De la misma forma, el espesor saturado también decrece desde el perfil L5 hacia los otros dos perfiles pasando de 40 m hasta apenas 15 m en la parte media-baja (L3-L4). Este cambio en el acuífero, según la experiencia del consultor, se debe a un estrechamiento del acuífero fruto de un cambio en la geometría del basamento.

En el sector de "Pueblo Hundido" se produce un estrechamiento del acuífero provocando que la sección de paso del agua subterránea se reduzca considerablemente y ésta aflore en superficie alimentando al río (**Figura 6-87**). En esta zona se observó la presencia de vegetación de zonas inundadas característico de zonas de afloramiento de agua subterránea. La descarga producida ya no retorna al acuífero tal y como se observa en los siguientes perfiles en que el río continúa desconectado del acuífero. Este hecho justificaría la reducción del espesor saturado y posiblemente una reducción del caudal subterráneo circulante.

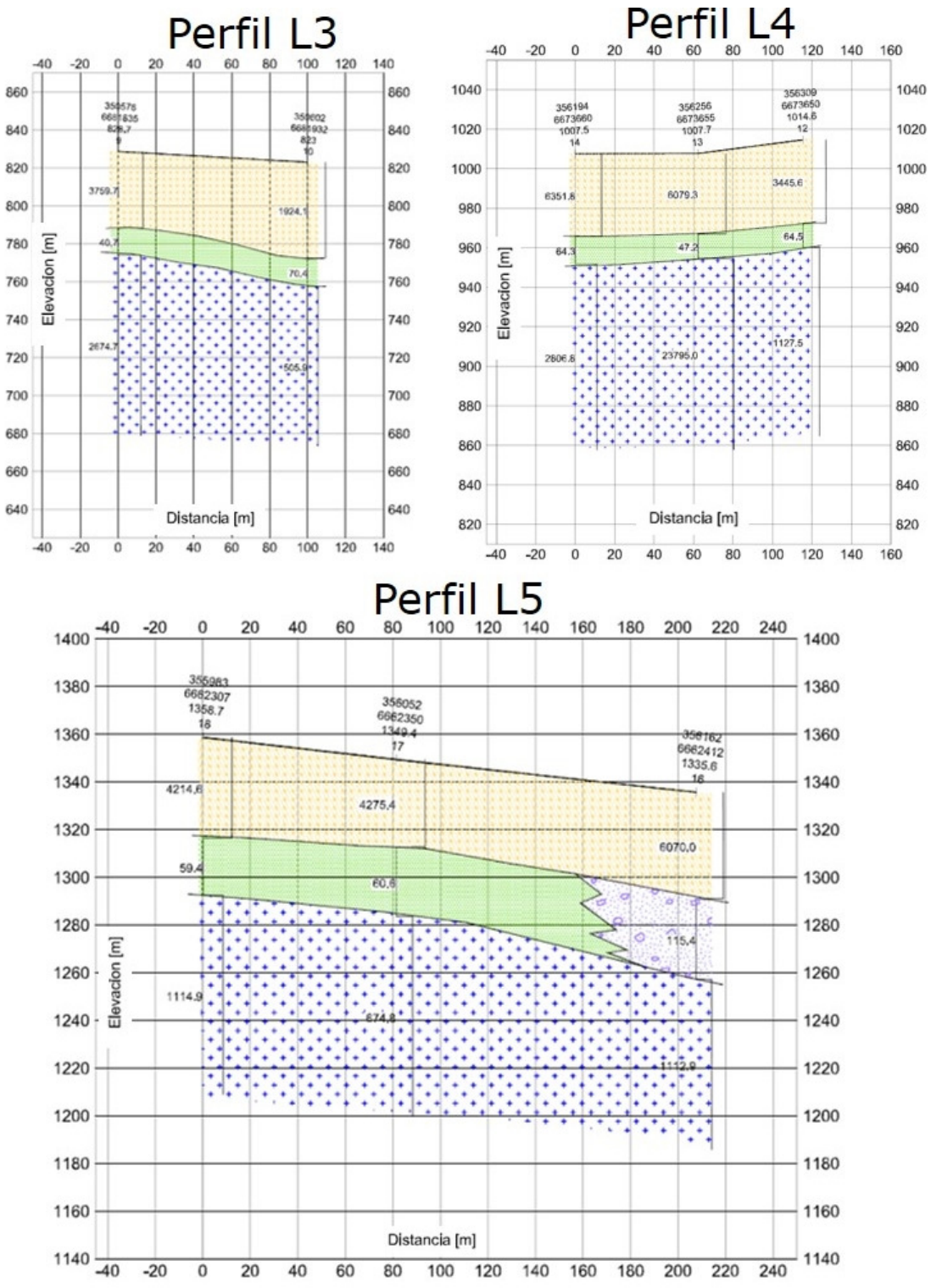


Figura 6-86. Perfiles río Claro. En orden desde cabecera a desembocadura: L5, L4, L3. Fuente: Geodatos.

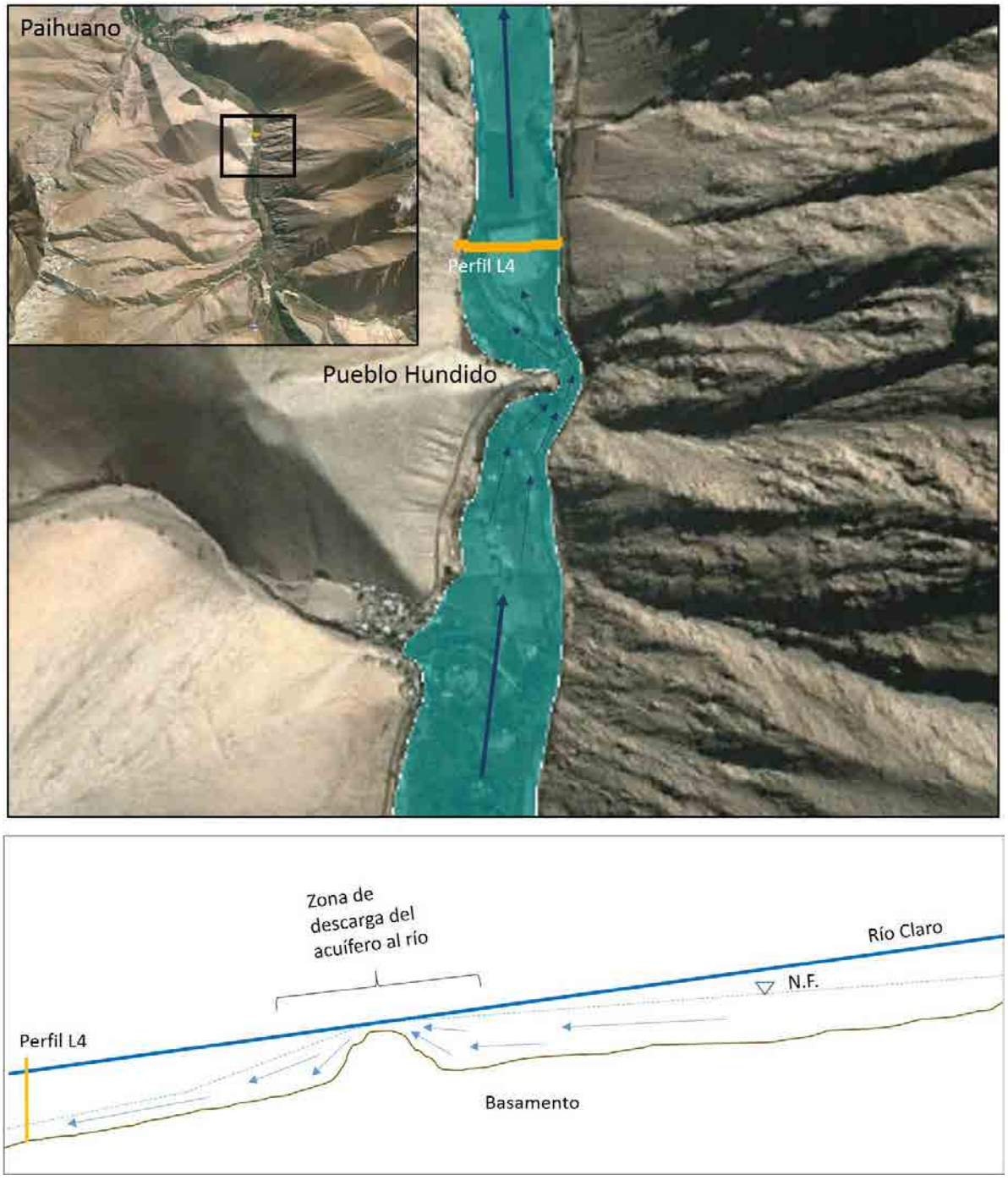


Figura 6-87. Esquema conceptual del afloramiento de agua subterránea que se produce en el sector de pueblo Hundido. Fuente: elaboración propia.

Por otro lado, al igual que en la II Región, para la obtención de la geometría en profundidad, se han analizado en conjunto los datos obtenidos en la campaña geofísica, las columnas litológicas recopiladas, así como la información geológica de superficie, integrándola en el software Hydro Geoanalyst para su mejor procesado e interpretación, elaborando perfiles hidrogeológicos, que con un posterior procesado de interpolación, se ha podido obtener la geometría tridimensional del relleno sedimentario, definido como el acuífero.

Para ello se han trazado un total de 9 perfiles (ver figura siguiente), coincidentes con los perfiles geofísicos.

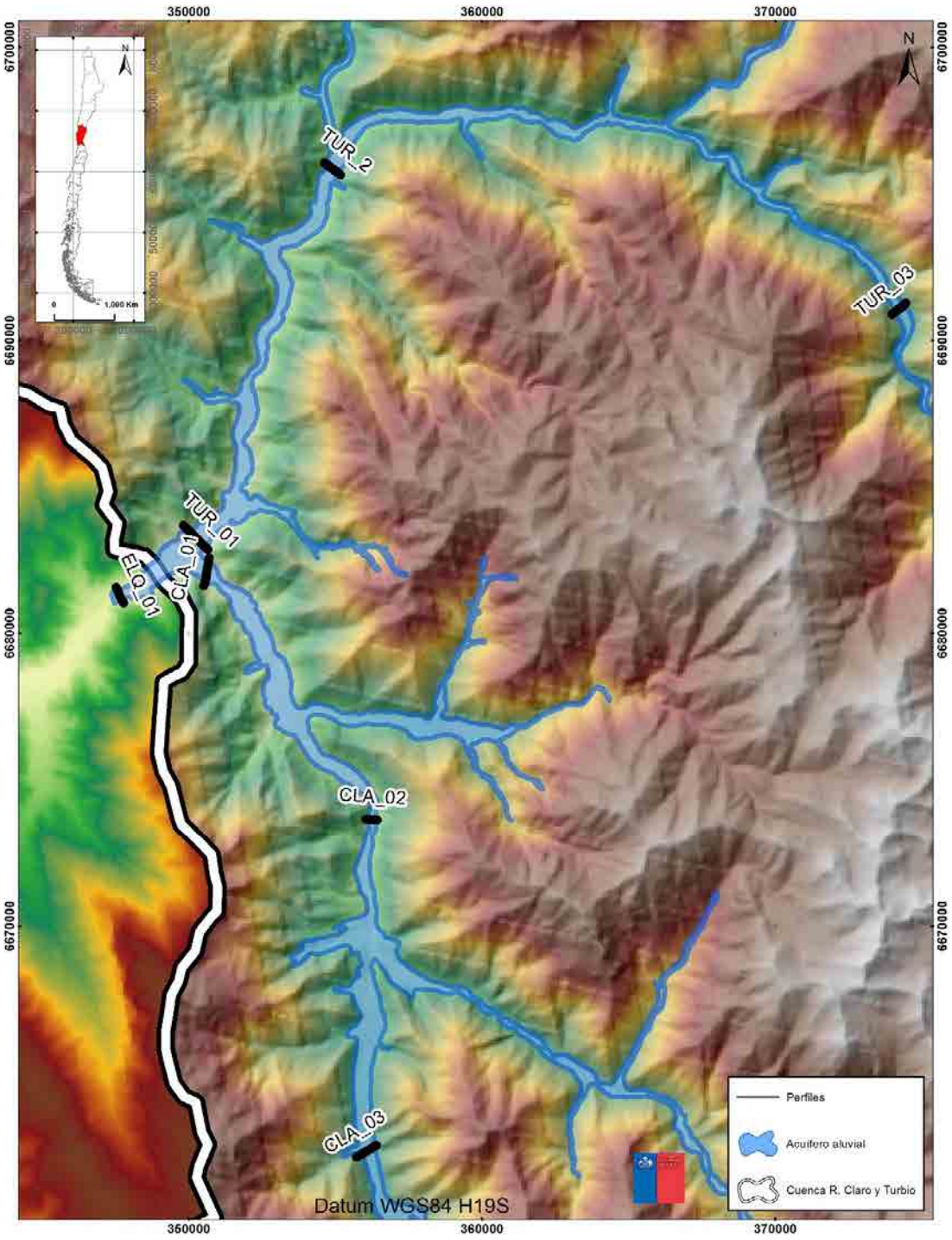


Figura 6-88. Ubicación de los perfiles hidrogeológicos interpretados Fuente: elaboración propia

Se muestran a continuación los perfiles hidrogeológicos más significativos.

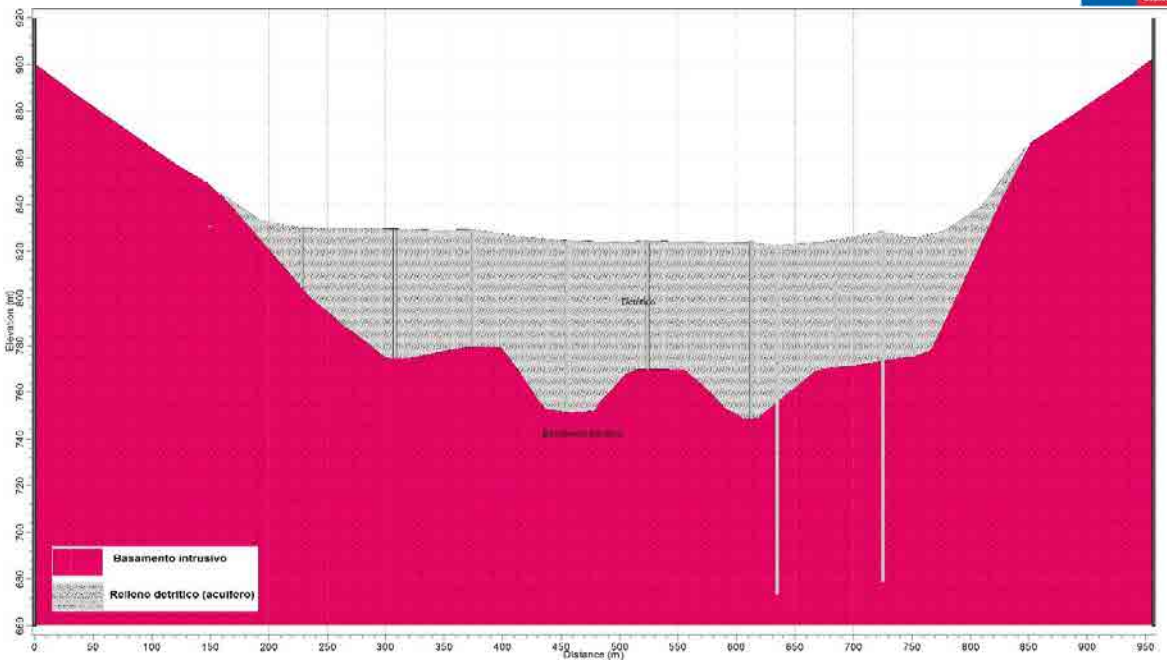


Figura 6-89. Perfil CLA_01. Dirección N-S en el río Claro (escala vertical por 2) Fuente. Elaboración propia

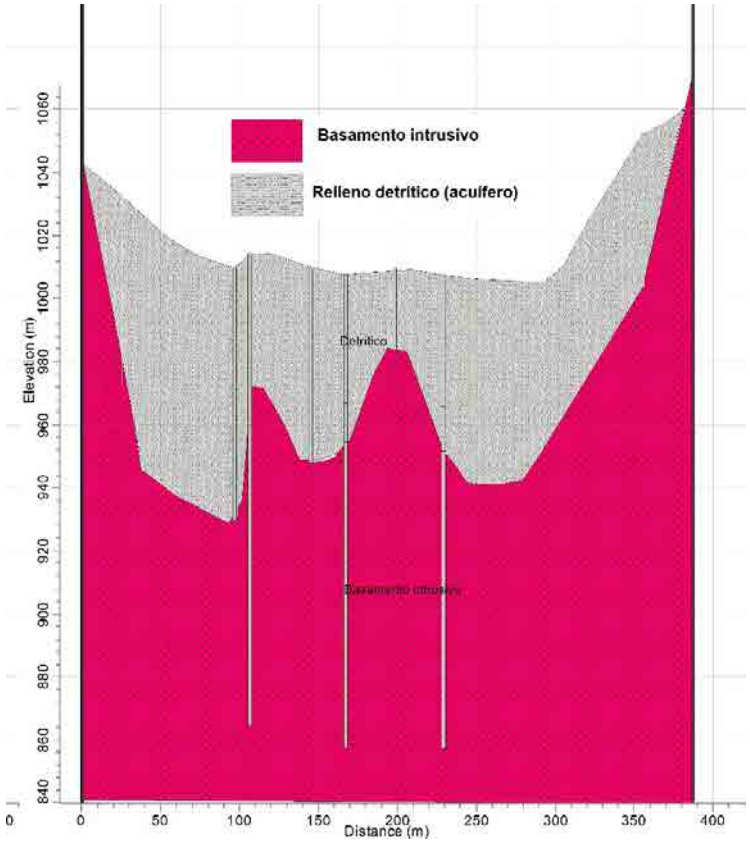


Figura 6-90. Perfil CLA_02. Dirección E-W, visto hacia aguas arriba en el río Claro (escala vertical por 2) Fuente. Elaboración propia

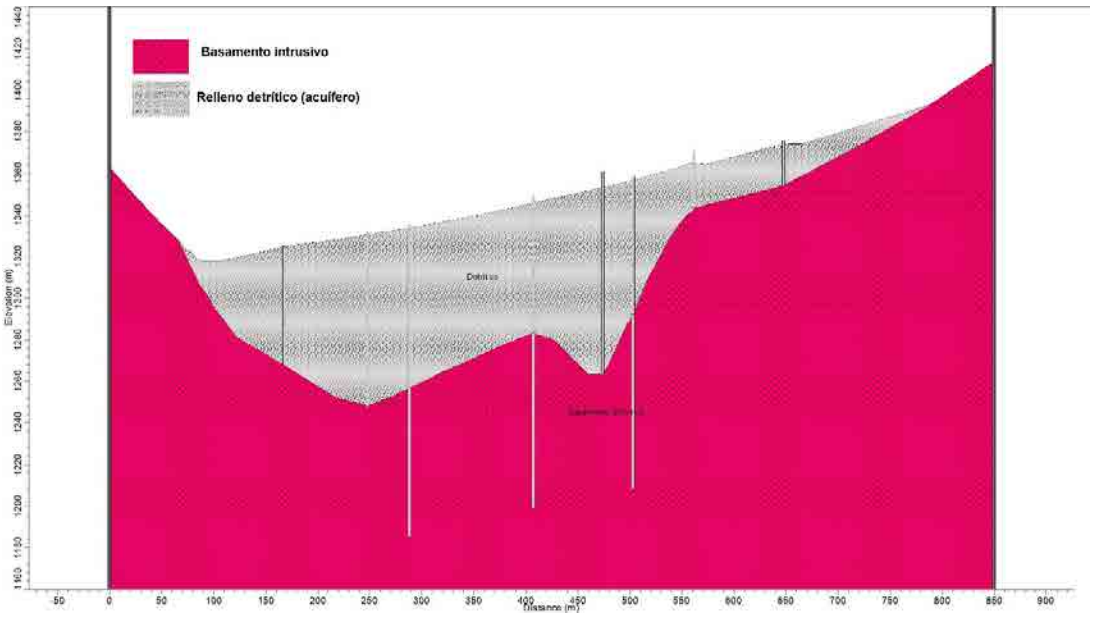


Figura 6-91. Perfil CLA_03. Dirección E-W, visto hacia aguas arriba en el río Claro (escala vertical por 2) Fuente. Elaboración propia

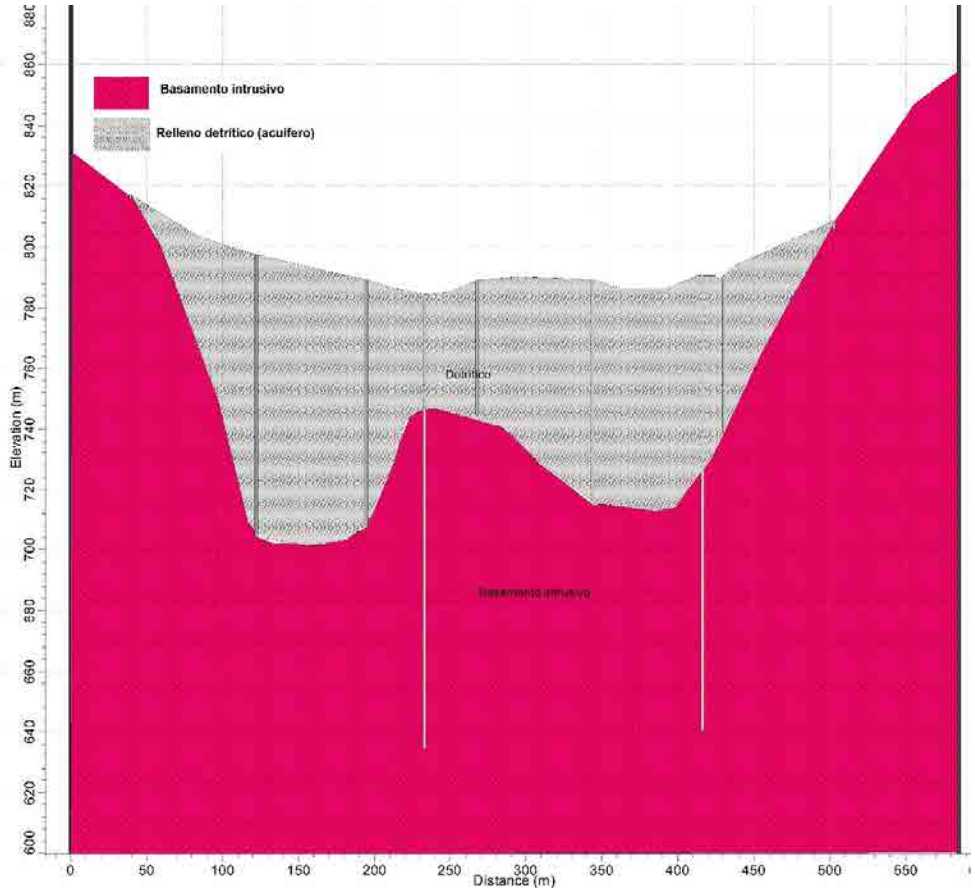


Figura 6-92. Perfil ELQ_01. Dirección NW-SE, visto hacia aguas arriba en el río Elqui (escala vertical por 2) Fuente. Elaboración propia

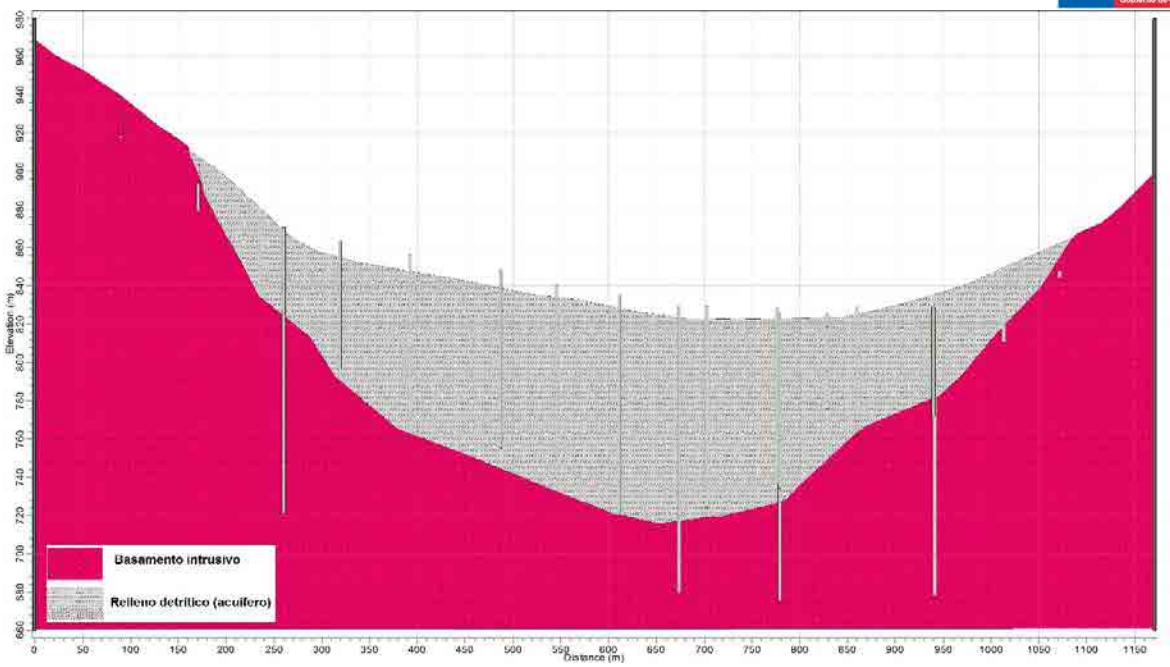


Figura 6-93. Perfil TUR_01. Dirección NW-SE, visto hacia aguas arriba en el río Turbio (escala vertical por 2) Fuente. Elaboración propia

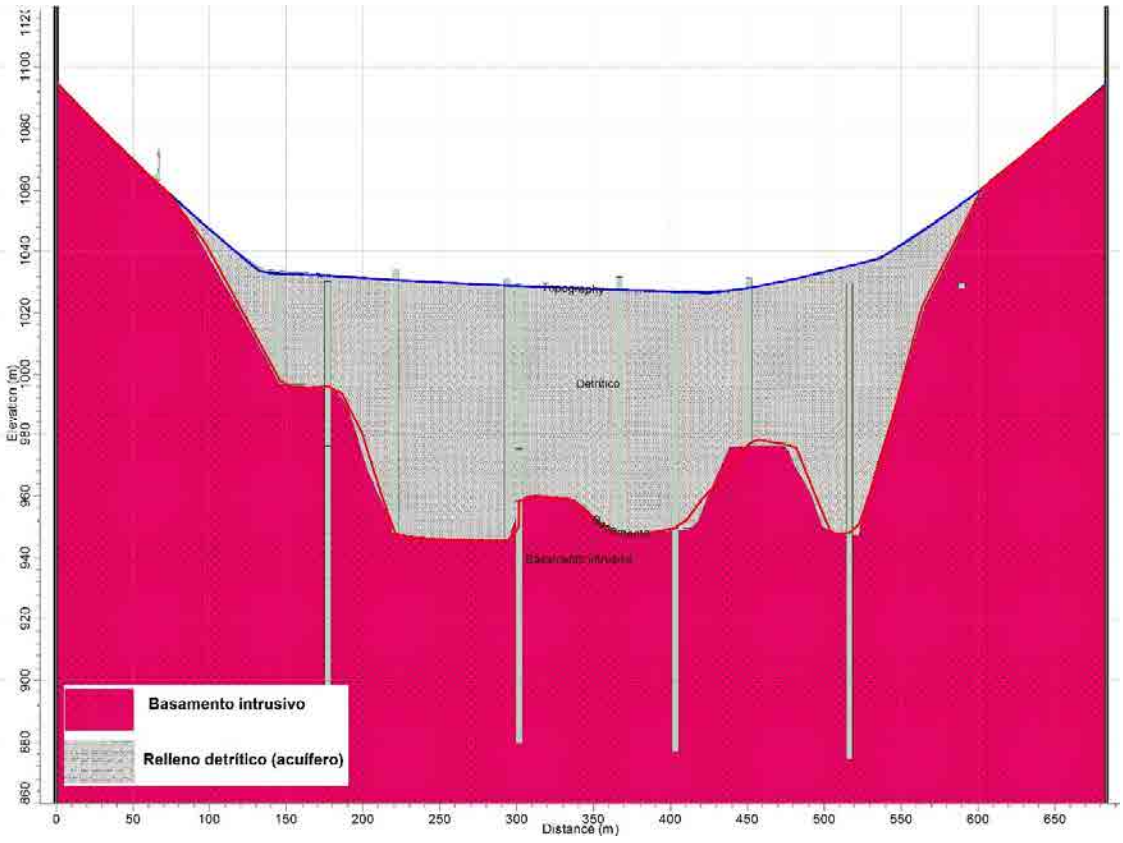


Figura 6-94. Perfil TUR_02. Dirección NW-SE, visto hacia aguas arriba en el río Turbio (escala vertical por 2) Fuente. Elaboración propia

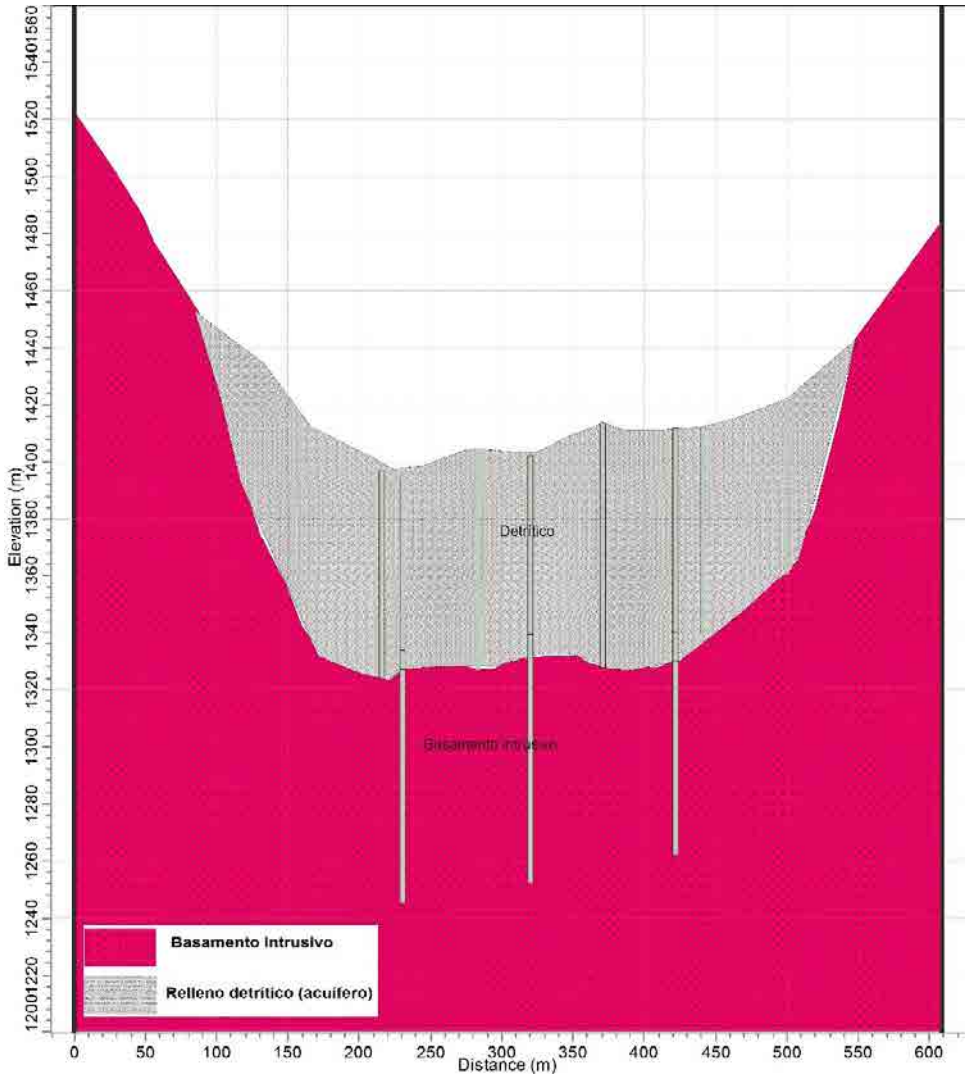


Figura 6-95. Perfil TUR_03. Dirección NE-SW, visto hacia aguas arriba en el río Turbio (escala vertical por 2) Fuente. Elaboración propia

A partir de los perfiles generados, se ha obtenido un mapa de isohipsas del basamento del acuífero de estudio.

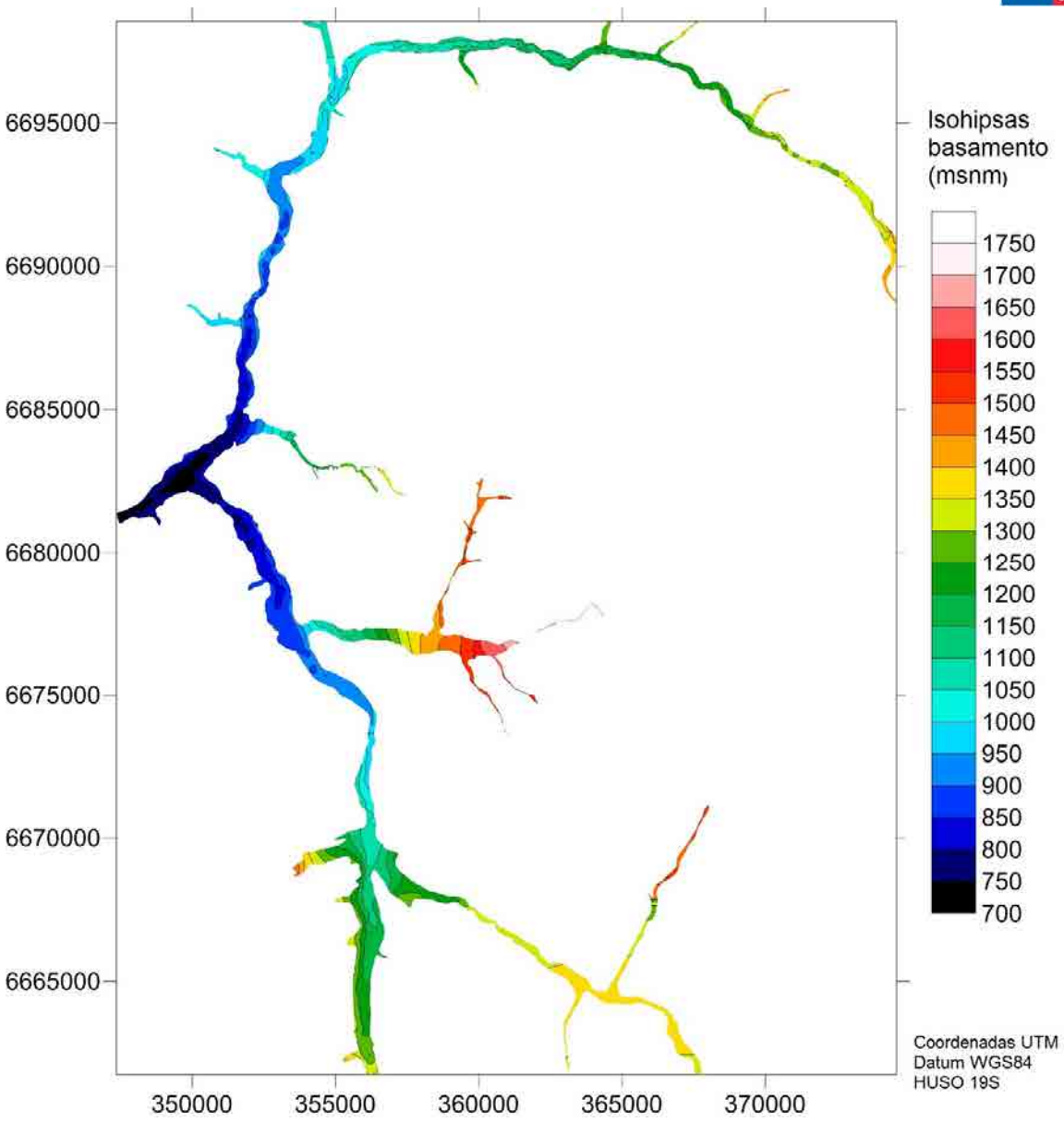


Figura 6-96. Mapa de isohipsas de basamento (valores en msnm) Fuente. Elaboración propia

6.7.3 PIEZOMETRÍA

DIRECCIÓN Y SENTIDO DE FLUJO

Se ha definido la dirección y sentido de flujo de la zona de estudio a partir de la siguiente información:

- Campaña de terreno realizada, durante la cual se tomaron medidas de nivel estático.
- Campaña de prospección geofísica TEM y NanoTEM, en los cuales se identifica de forma clara la posición del nivel freático en el acuífero.
- Clasificación hidrogeológica realizada en secciones anteriores.

El mapa de isopiezas y flujo realizado representa el estado hidráulico del acuífero en diciembre de 2015, fecha de la realización de la campaña de terreno. Si bien, la geofísica se hizo en meses posteriores, se ha contrastado la profundidad del nivel freático en algunos pozos coincidiendo con un perfil geofísico y la correlación entre ambos es buena.

No obstante, debido a la gran extensión de la zona de estudio, no todo el acuífero está definido con gran certidumbre, sino que se ha tenido que aplicar criterio hidrogeológico para el trazado de isopiezas.

Tal y como se observa en la piezometría, las isopiezas muestran como el flujo tiende a concentrarse en la parte central del aluvial. Éste recibe aportes subterráneos de las quebradas aledañas deformando las isopiezas otorgándoles esta forma.

Dada la desconexión río-acuífero que muestran los perfiles geofísicos, no se puede hablar de un río ganador a pesar de la forma que presentan las isopiezas. En este caso, el incremento del caudal que se observa en el transcurso del río (**numeral 6.7.2**), viene dado por la incorporación de afluentes en su recorrido.

A continuación en la **Figura 6-97** se muestra la piezometría del río Turbio y en la **Figura 6-98** la del río Claro.

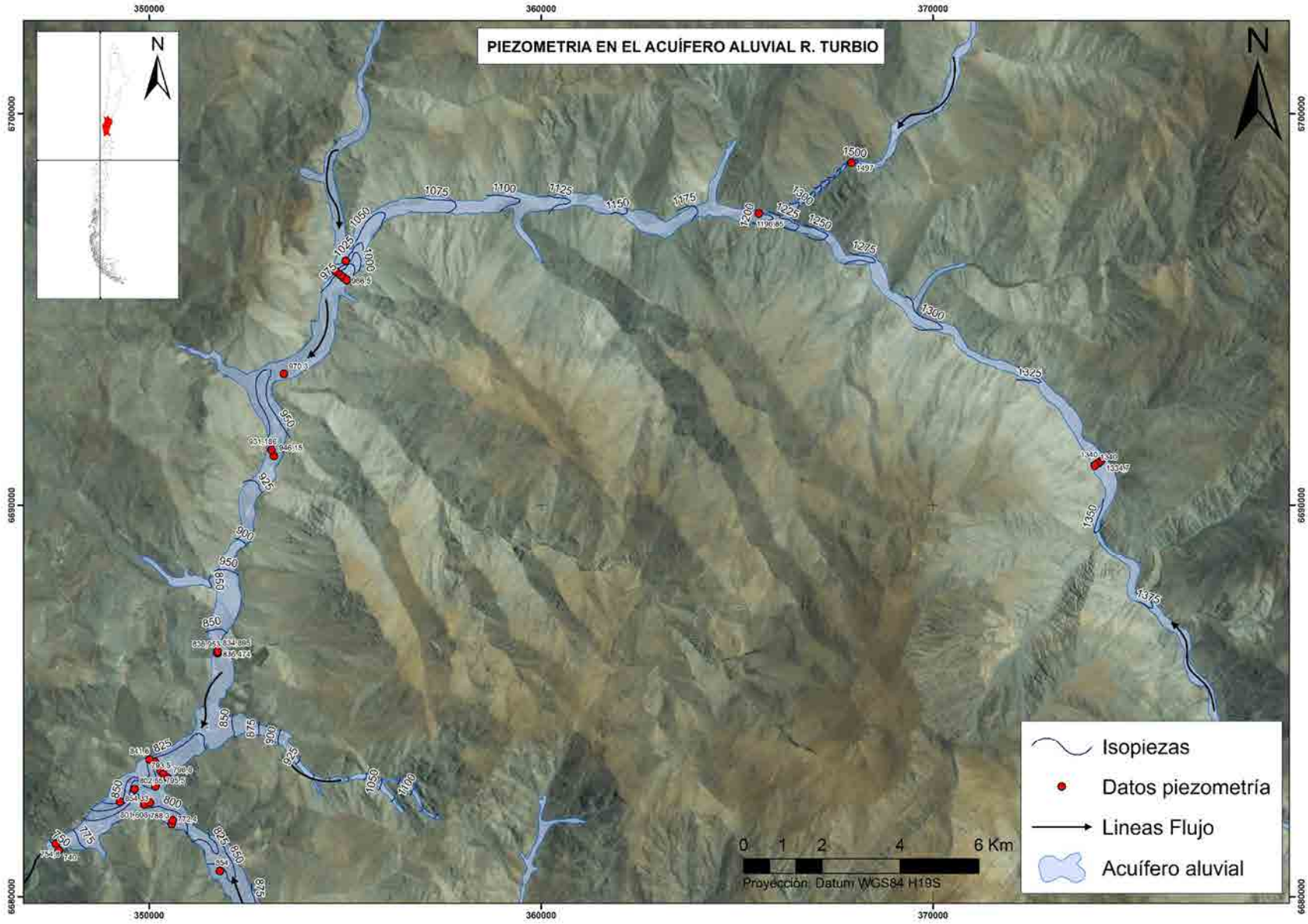

PIEZOMETRIA EN EL ACUÍFERO ALUVIAL R. TURBIO
N
350000
360000
370000
6700000
6690000
6680000
Isopiezas
Datos piezometría
Lineas Flujo
Acuífero aluvial
0 1 2 4 6 Km
Proyección: Datum WGS84 H19S

Figura 6-97. Isopiezas y dirección de flujo en el aluvial del río Turbio en diciembre de 2015 sobre imagen de satélite. Fuente: elaboración propia.

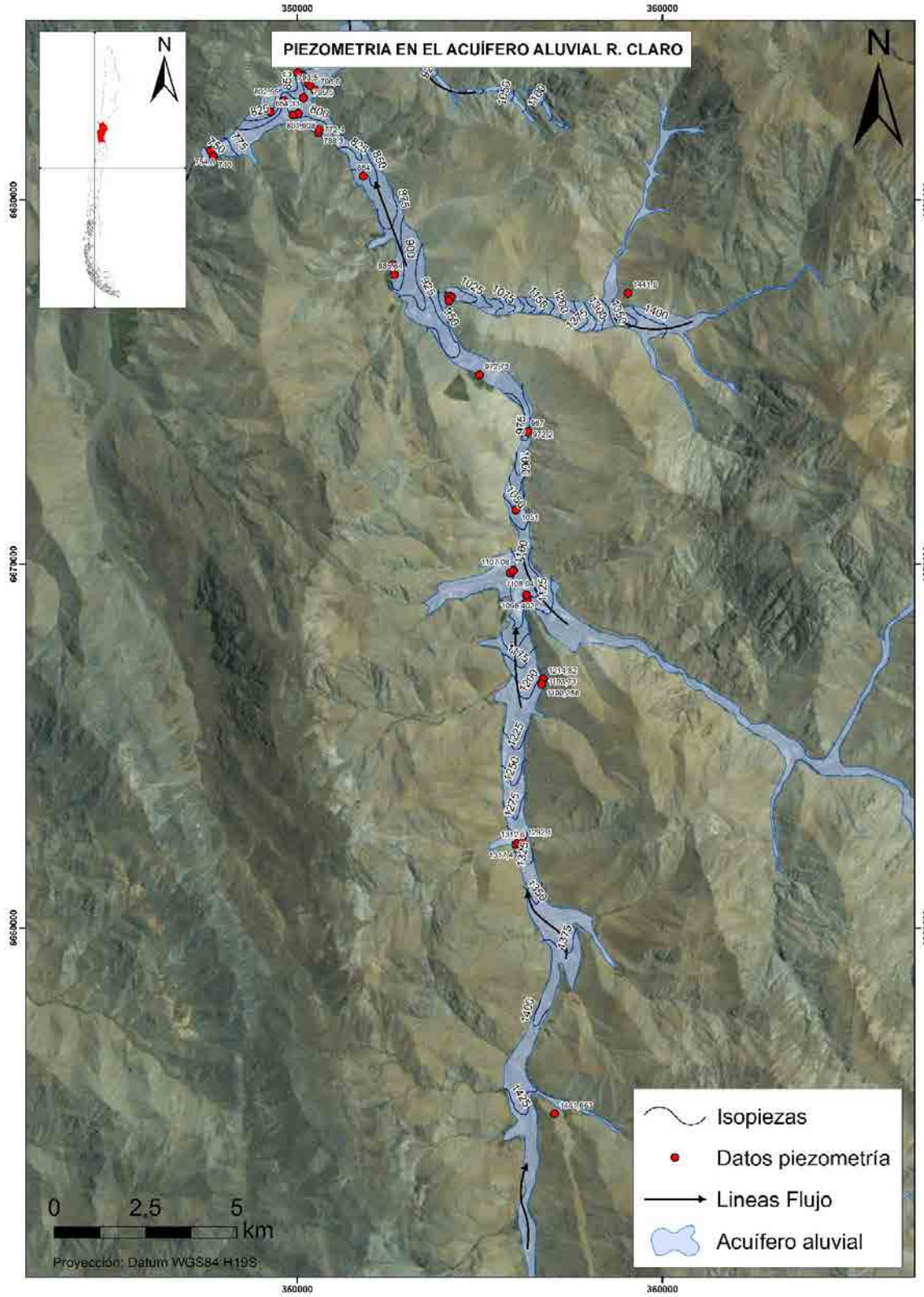


Figura 6-98. Isopiezas y dirección de flujo en el aluvial del río Claro en diciembre de 2015 sobre imagen de satélite. Fuente: elaboración propia.

6.7.4 EVOLUCIÓN PIEZOMÉTRICA

En este numeral se ha analizado la variación del nivel freático de los pozos que monitorea la Dirección General de Aguas en la zona de estudio. Se han encontrado un total de siete pozos dentro de la cuenca y un pozo situado justo en la salida del área de estudio.

A continuación se presenta en la **Tabla 6-38** la descripción de los pozos encontrados y en la **Figura 6-99** su distribución espacial.

Nombre	Coordenadas UTM			Periodo registro	
	X	Y	Z (msnm)	Inicio	Vigencia
Algarrobal*	346.711	6.680.246	773	abr-70	Vigente
Escuela Rivadavia	349.321	6.682.342	812	ene-80	Vigente
Montegrande	356.279	6.669.153	-	ene-75	Vigente
Pueblo Rivadavia	349.645	6.682.728	820	ene-81	Vigente
Varillar	351.752	6.686.257	873	ene-00	Vigente
Bocalume	355.023	6.696.221	-	mar-70	Vigente
Pueblo de Paihuano	354.293	6.677.314	-	ago-72	Vigente
Quebrada Paihuano	358.351	6.677.049	-	feb-70	Vigente

(*) Pozo fuera del área de estudio
(-) Dato no disponible

Tabla 6-38. Pozos de monitoreo de la Dirección General de Aguas ubicados en la zona de estudio.

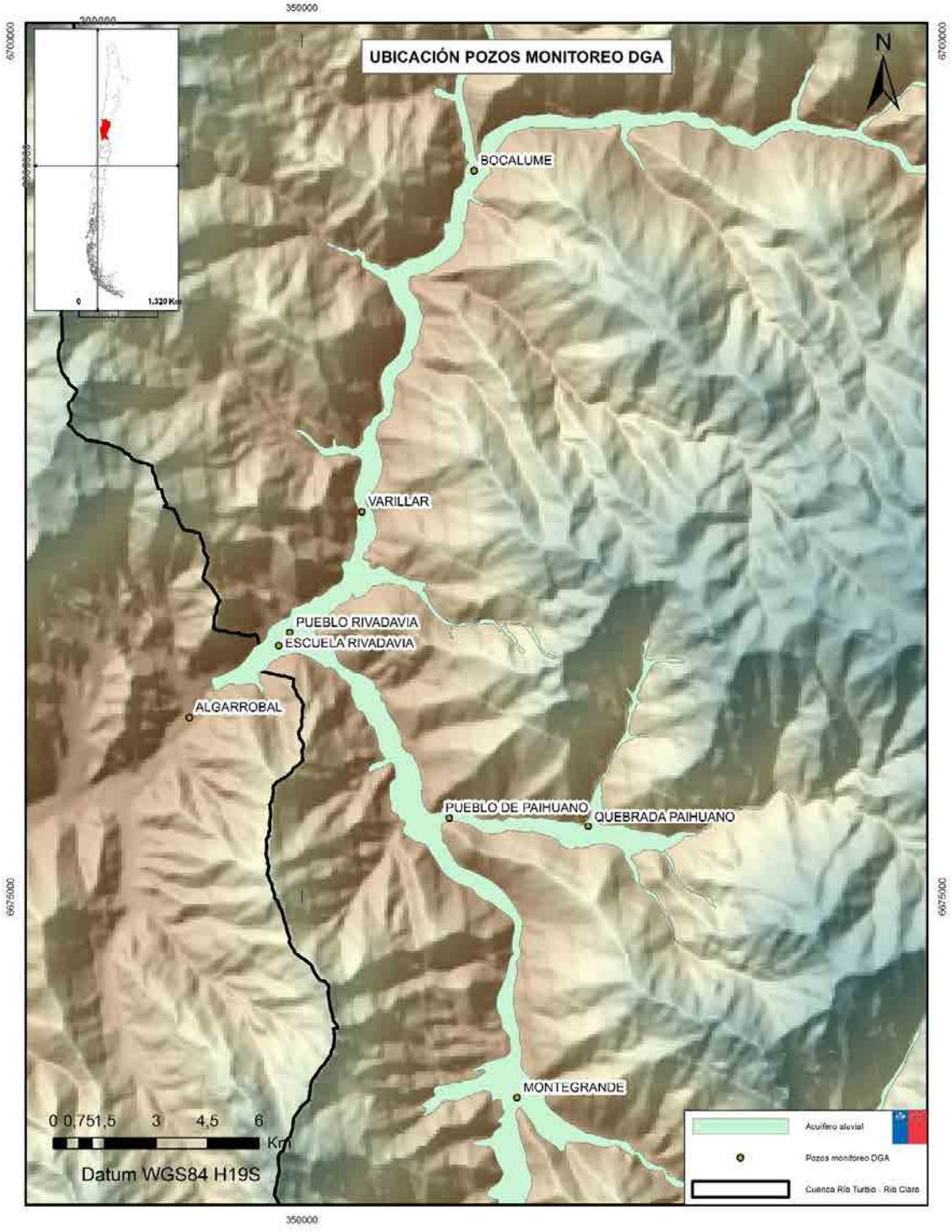


Figura 6-99. Distribución de los pozos monitoreados por la Dirección General de Aguas. Fuente: Dirección General de Aguas.

El análisis de la evolución de los niveles se ha realizado en base a tres sectores, río Claro, río Turbio y la zona de confluencia entre de ambos acuíferos.

Río Claro

En el río Claro se han analizado tres pozos: Montegrande, Pueblo Paihuano y Quebrada Paihuano (**Figura 6-100**). El pozo situado en Montegrande muestra una tendencia negativa con un descenso medio total de 1,5 m en 24 años. El nivel freático en el pozo presenta una oscilación temporal de 2 metros aproximadamente. Este pozo se encuentra en el acuífero principal del río Claro siendo representativo del comportamiento global del acuífero.

Algo diferente se observa en los pozos "Pueblo Paihuano" y "Quebrada Paihuano", éstos se encuentran en el acuífero situado en la quebrada Paihuano. El acuífero de esta quebrada forma parte del mismo aluvial del acuífero principal, con la diferencia que el aporte de agua que recibe proviene de la recarga que se produce en la cabecera de la quebrada. Tal y como se observa en la gráfica ambos pozos muestran oscilaciones más marcadas. Cambios en la pluviometría durante un periodo determinado tiene efectos más destacados que en pozo de Montegrande.

El pozo de "Quebrada Paihuano" muestra una tendencia positiva de los niveles mientras que en el pozo del "Pueblo de Paihuano" se muestra lo contrario. Dado que el agua en el pueblo de Paihuano proviene de la quebrada Paihuano, ambos pozos debieran de mostrar el mismo comportamiento. Es posible que la tendencia al descenso se deba al bombeo de los pozos en el pueblo de Paihuano.

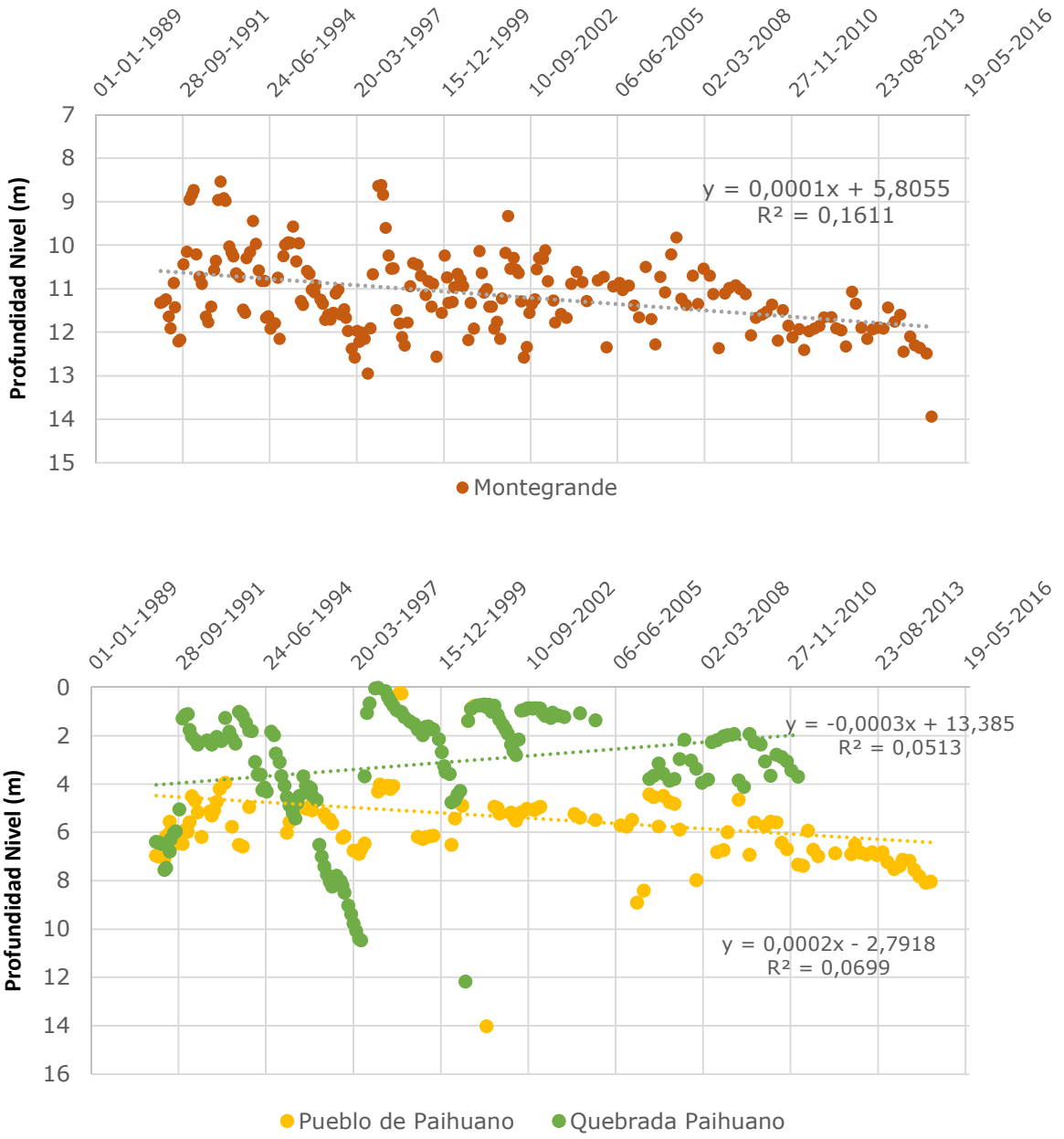


Figura 6-100. Gráfica de la evolución temporal de los niveles en los pozos "Montegrande", "Pueblo Paihuano" y "Quebrada Paihuano" entre el periodo 1991-2015. Fuente: Dirección General de Aguas.

Río Turbio

En el río Turbio se han analizado dos pozos: Bocalume y Varillar (**Figura 6-101**). El pozo situado en Bocalume se destaca por tener unas oscilaciones temporales del nivel freático muy marcadas. Se registran cambios en el nivel de hasta 47 m en siete meses, lo cual es muy inusual. Entre 1990 y 2013 el pozo presenta una tendencia decreciente de los niveles de aproximadamente 1,5 metros. No obstante dada la oscilación tan marcada del nivel freático, este valor puede variar mucho, según el periodo seleccionado.

El pozo ubicado en Varillar, al igual que el pozo muestra oscilaciones del nivel freático muy marcadas aunque en menor medida. La oscilación máxima registrada fue de unos 16 metros y también presenta una tendencia decreciente de los niveles de 2 metros aproximadamente.

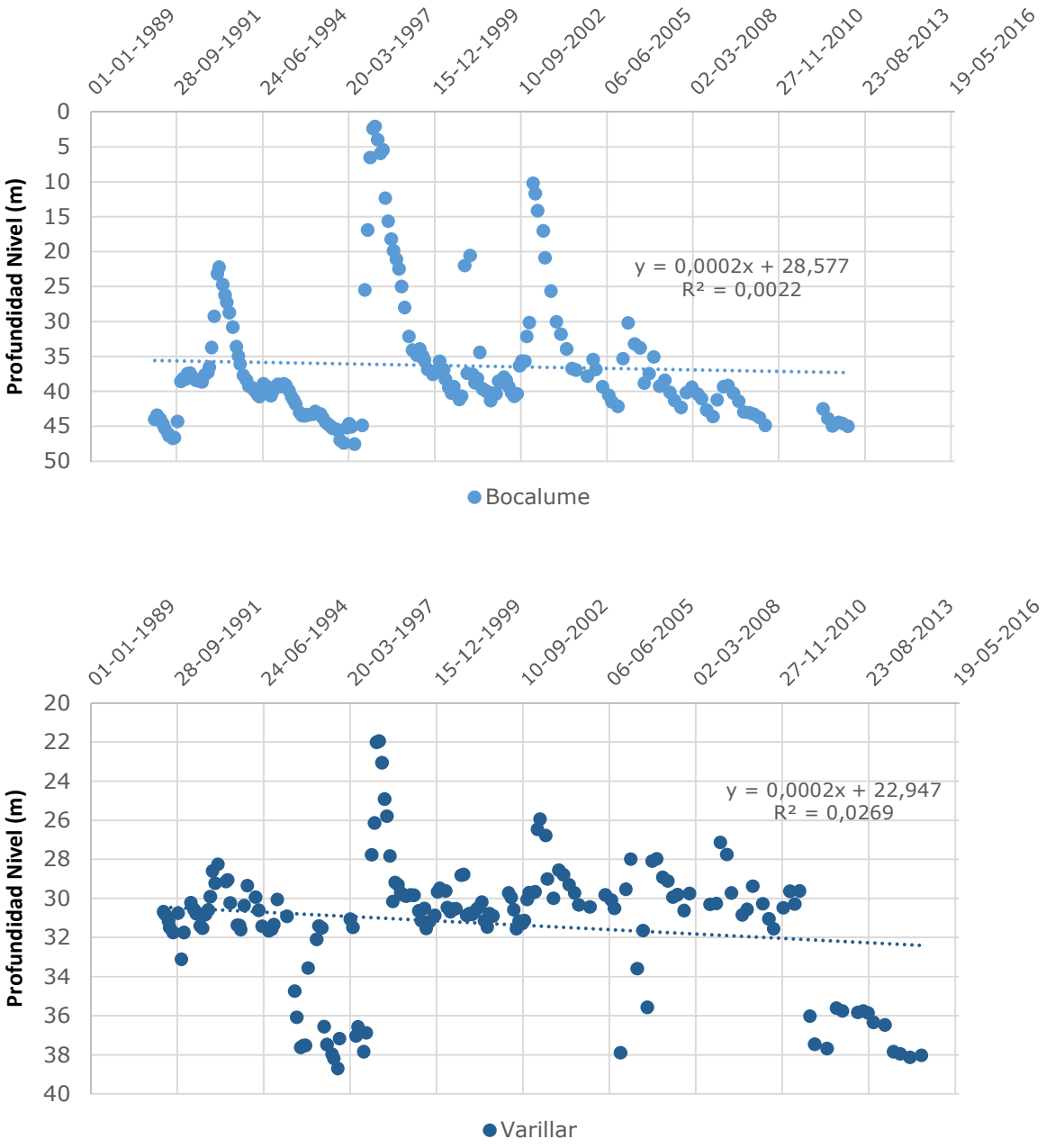


Figura 6-101. Gráfica de la evolución temporal de los niveles en los pozos "Bocalume" y "Varillar" entre el periodo 1991-2015. Fuente: Dirección general de Aguas.

Zona confluencia

En la confluencia de los ríos Turbio y Claro, se han analizado un total de tres pozos: "Escuela Rivadavia", "Pueblo Rivadavia" y "Algarrobal" (**Figura 6-102**).

Los niveles de los dos pozos ubicados en Rivadavia muestran una oscilación menor con máximos de hasta 5 metros aproximadamente, mientras que el pozo ubicado en Algarrobal sí muestra una oscilación más marcada con máximos de hasta 12 metros.

La tendencia en los tres pozos es negativa con un descenso total entre 1991 y 2015 de 1 metro para los pozos "Escuela Rivadavia" y "Algarrobal" y 3 metros para el pozo ""Pueblo Rivadavia".

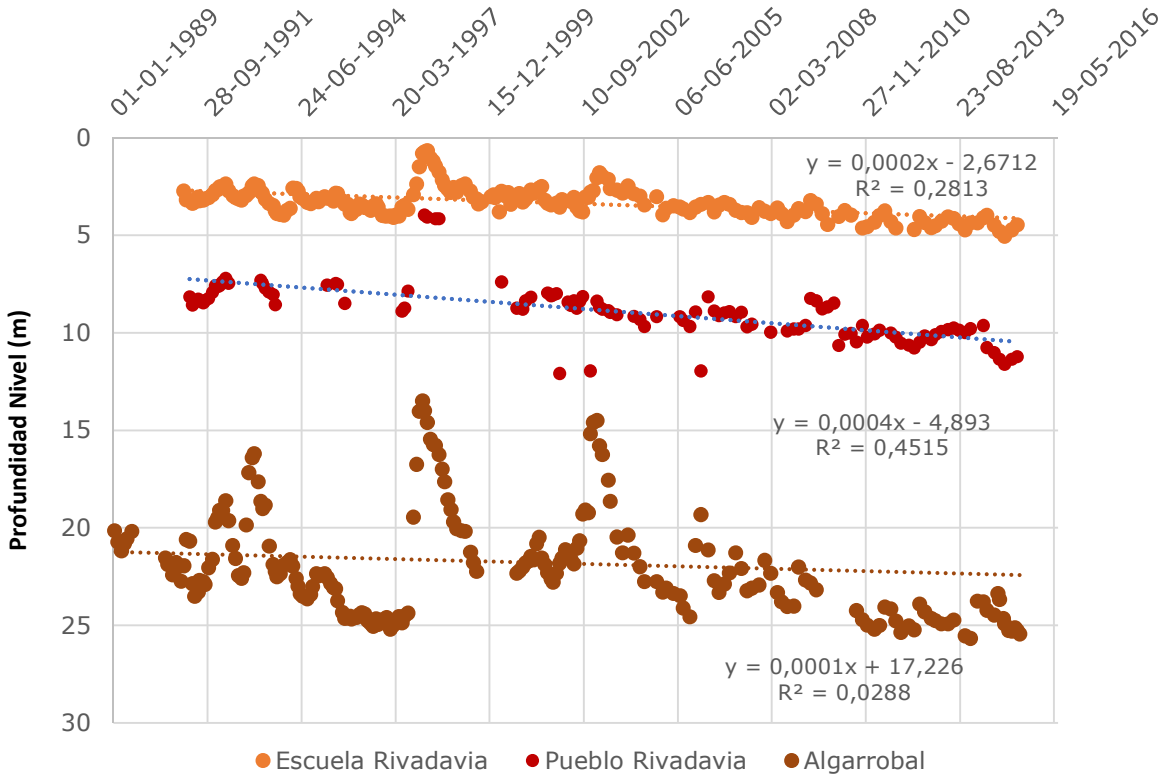


Figura 6-102. Gráfica de la evolución temporal de los niveles en los pozos "Escuela Rivadavia", "Pueblo Rivadavia" y "Algarrobal" entre el periodo 1991-2015. Fuente: Dirección General de Aguas.

Conclusiones

Realizando el análisis del nivel freático en los diferentes pozos se ha observado que todos ellos presentaban aumentos marcado del nivel en algunas fechas concretas. Los periodos de crecida más destacados se dan en los meses de enero-febrero de 1998, 2003, 2006 y 2008. Con el objetivo de ver la relación que existe entre el aumento del nivel freático con la pluviometría y el caudal en el río, se ha graficado conjuntamente la siguiente información: Precipitación en la estación meteorológica del embalse La Laguna, caudal en la estación de aforo de río Elqui en Algarrobal y nivel freático en el pozo de Algarrobal (**Figura 6-103**).

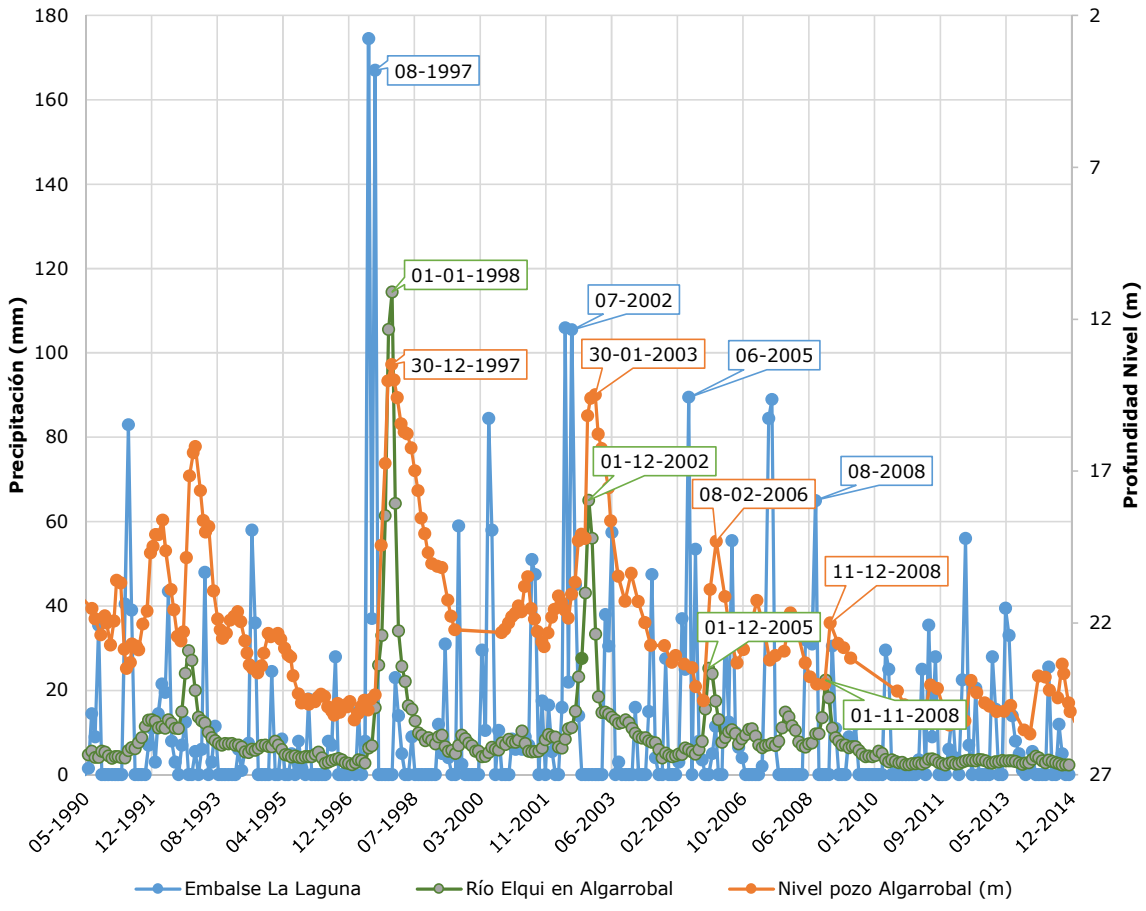


Figura 6-103. Relación entre el aumento del nivel freático con la pluviometría y el caudal en el río. Fuente: modificado de Dirección General de Aguas.

A *priori* se observa que existe una buena correlación entre los eventos de precipitación, caudales máximos y aumento en el nivel. Tal y como se comentó en el numeral de

análisis de caudales, la precipitaciones se dan durante el invierno mientras que el aumento del caudal en el río se da durante los meses de verano mostrando un régimen de tipo nival. Con el incremento del nivel en el pozo sucede algo parecido, mostrando un desfase temporal respecto de la precipitación de unos seis meses. No obstante en la mayoría de los eventos registrados, los caudales máximos se dan entre uno y dos meses antes que el nivel máximo registrado en el pozo. De este hecho se pueden sacar varias conclusiones:

- El acuífero muestra una respuesta evidente y rápida ante los eventos de precipitación.
- El tiempo de tránsito del agua en el acuífero es corto.
- La velocidad de flujo en el acuífero es alta.
- Se estima que el aporte de agua desde las formaciones encajantes al acuífero no es significativo puesto que este hecho amortiguaría los efectos de los eventos de precipitación y no es el caso.

Existe la posibilidad que el incremento del nivel no solo se deba a un aumento en la recarga por precipitación si no que se deba al incremento del caudal en el río. En los momentos de crecidas el río puede desbordar en algunos puntos infiltrando y recargando el acuífero. En este caso, en los momentos de crecida el río recargaría el acuífero y el desfase de entre uno y dos meses entre los caudales máximos y la altura máxima del nivel que se observa en el gráfico, correspondería al tiempo de transito del agua por la zona no saturada. Asumiendo un espesor de zona no saturada de unos 20 metros observado en algunos perfiles de geofísica y una permeabilidad vertical de aproximadamente 0,5 m/d (coherente para un acuífero con permeabilidad horizontal de unos 50 m/d) el tiempo de tránsito por la zona no saturada sería de unos 40 días, es decir entre 1 y 2 meses. No obstante no se puede confirmar puesto que en los perfiles TEM no se observó indicios de la existencia de goteo desde el río al acuífero.

Otro factor que se ha observado es la repercusión temporal de los eventos mencionados sobre el acuífero. El incremento del caudal en el río producto de un evento de precipitación, tiene un efecto durante los meses de verano y tiende a recuperar su estado normal al finalizar este periodo, mientras que un evento de este tipo, tiene un efecto sobre el acuífero que se prolonga por más de un año. Los eventos de grandes

precipitaciones provocan un aumento de los niveles que perduran en el tiempo, siendo de gran importancia para la recuperación del acuífero (**Figura 6-104**).

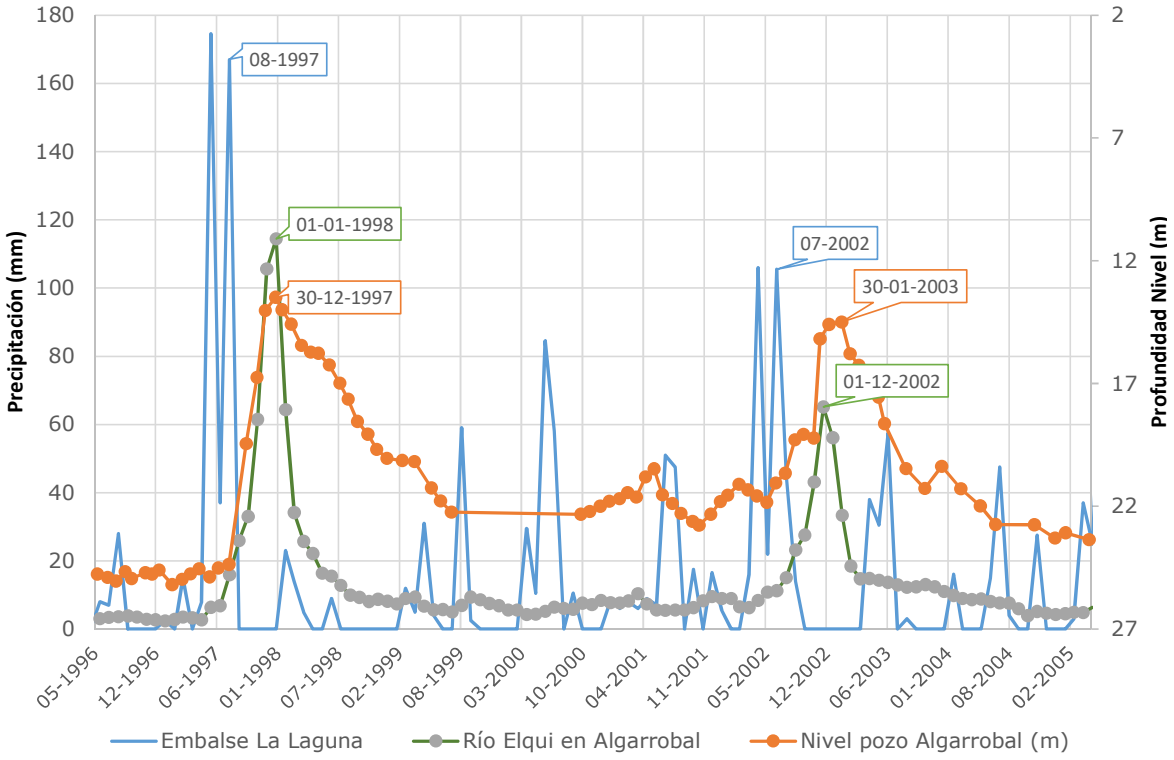


Figura 6-104. Grafico donde observa la repercusión de un evento en la evolución del nivel freático en el tiempo. Fuente: modificado de Dirección General de Aguas.

Para concluir la sección, destacar los siguientes puntos:

- La oscilación del nivel freático es más marcada en aquellos pozos ubicados más cerca de la cabecera de la cuenca y menos marcada conforme nos acercamos a la desembocadura. Este hecho se cumple para todos los pozos excepto para el pozo de Algarrobal.
- La oscilación del nivel freático en el acuífero del río Turbio, es más marcada que en el río Claro mostrando variaciones máximas en el pozo de Bocalume.
- Existe una tendencia decreciente del nivel freático en todos los pozos excepto en Quebrada Paihuano. Para un periodo de tiempo de 24 años el descenso medio en los pozos ha sido de entre 1 y 3 metros.

- Existe una correlación entre las precipitaciones y la oscilación del nivel freático. Este hecho se manifiesta en varios eventos de precipitación.
- Para cada evento se observa una respuesta en el acuífero unos seis meses después del momento de máxima precipitación y entre uno y dos meses después de registrarse los caudales máximos.
- El incremento en el nivel freático, posterior a un evento de precipitación, se debe a un aumento en la recarga por infiltración de las precipitaciones; aunque es posible que el incremento del caudal en los ríos también favorezca la recarga desde el río al acuífero.
- Cada evento provoca un aumento de los niveles en el acuífero que mantiene por varios años el nivel por encima de la media.

6.7.5 PARÁMETROS ELÁSTICOS

Resulta de especial interés establecer de manera precisa los parámetros elásticos del acuífero, ya que son importantes en la determinación del flujo pasante por una sección concreta, a efectos de evaluar el balance hídrico del acuífero.

Los parámetros elásticos, transmisividad y coeficiente de almacenamiento, sólo se obtienen de la interpretación de ensayos de bombeo y cuando no existen, o son escasos, es habitual utilizar aproximaciones basadas en el caudal específico del pozo, como la Thiem o Galofré, donde también intervienen otros factores, como depresiones asociadas a pérdidas de carga en el pozo y zona próxima del acuífero, que pueden desviar notablemente los valores respecto a los reales, por lo siempre deben estar contrastados o utilizarse como referencias, pero no como únicos valores.

En el caso que nos ocupa, dichos parámetros se han obtenido tras la interpretación de las pruebas de bombeo existentes en los pozos situados en el acuífero de estudio.

Sobre los datos de descensos del nivel de agua en función del tiempo y para un régimen de caudal conocido, se ha realizado un ajuste mediante la aplicación PIBE 2.0, a partir de la cual se obtienen datos de transmisividad (T), coeficiente de almacenamiento y/ o porosidad (S), coeficiente de goteo (B), etc., siendo estos dos últimos valores de referencia, con menor fiabilidad que el valor de transmisividad, ya que para su obtención se requiere de ensayos de bombeo con puntos de observación diferentes al propio en el

cual se realiza el bombeo, pero, puesto que el software empleado tiene en cuenta el régimen transitorio del ensayo, éstos pueden ser obtenidos como orden de magnitud.

Asimismo, esta aplicación reproduce una curva de descensos teórica y la ajusta en sucesivas iteraciones a la experimental, mostrando finalmente el resultado, como se muestra en la siguiente figura obtenida del pozo APR Rivadavia, donde los puntos son los datos experimentales y la línea continua el descenso calculado.

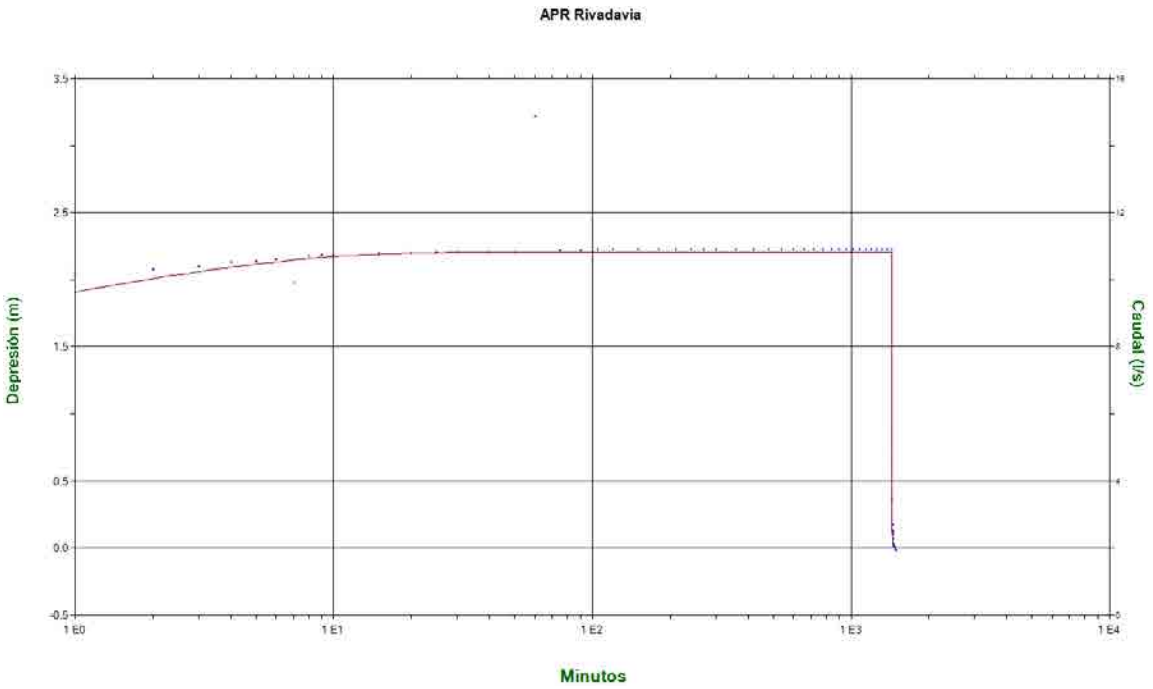


Figura 6-105. Interpretación de una prueba de bombeo en el pozo APR Rivadavia. Fuente: elaboración propia.

El programa considera, igualmente, la posibilidad de aportación de agua desde niveles de reducida permeabilidad (acuitardos) en función del potencial hidráulico.

Se han interpretado 12 ensayos de bombeo en el acuífero de estudio, con valores de transmisividades variables, desde 7 m^2/d hasta los 2.300 m^2/d (**Tabla 6-39**). Los métodos de cálculo han variado en función del tipo de ensayo, tratando de emplear el que mejor se ajustara a cada caso (Theis, Hantush y Newman).

Expediente	Pozo	Ensayo	Transmisividad (m^2/d)
ND-0401-381		Constante	222
ND-0401-381		Escalonado	392
ND-0401-308		Constante	429
ND-0401-2566	Nº2	Escalonado	36
ND-0401-2566	Nº2	Constante	25
ND-0401-2614		Escalonado	33
APR Rivadavia		Constante	618
ND-0401-2566	Nª4	Variable	2.339
ND-0401-328		Constante	7
ND-0401-2696		Escalonado	24
ND-0401-2696		Constante	28
ND-0401-388		Constante	431

Tabla 6-39. Parámetros elásticos obtenidos. Fuente: elaboración propia.

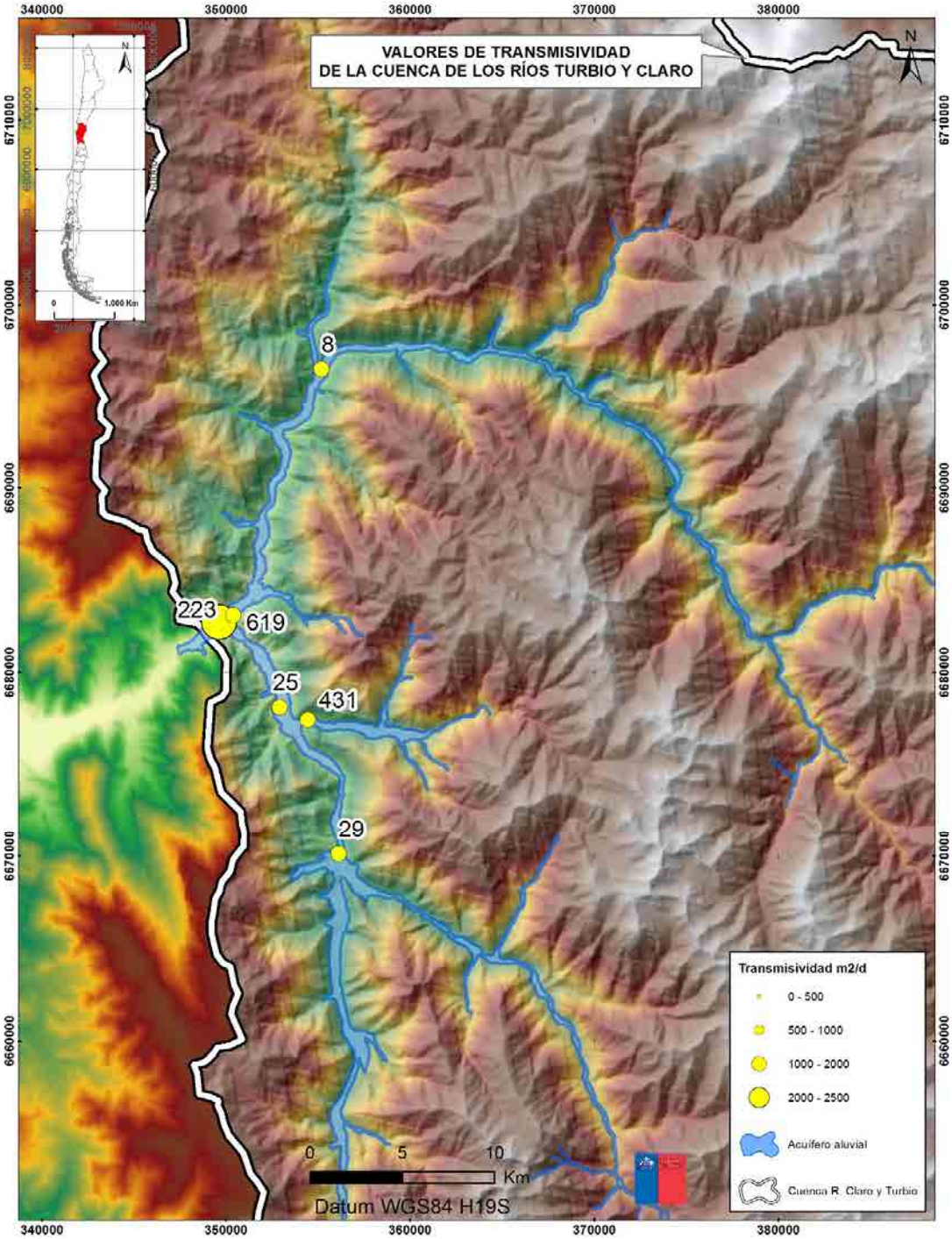


Figura 6-106. Ubicación de ensayos de bombeo interpretados y valores de transmisividad. Fuente: Elaboración propia

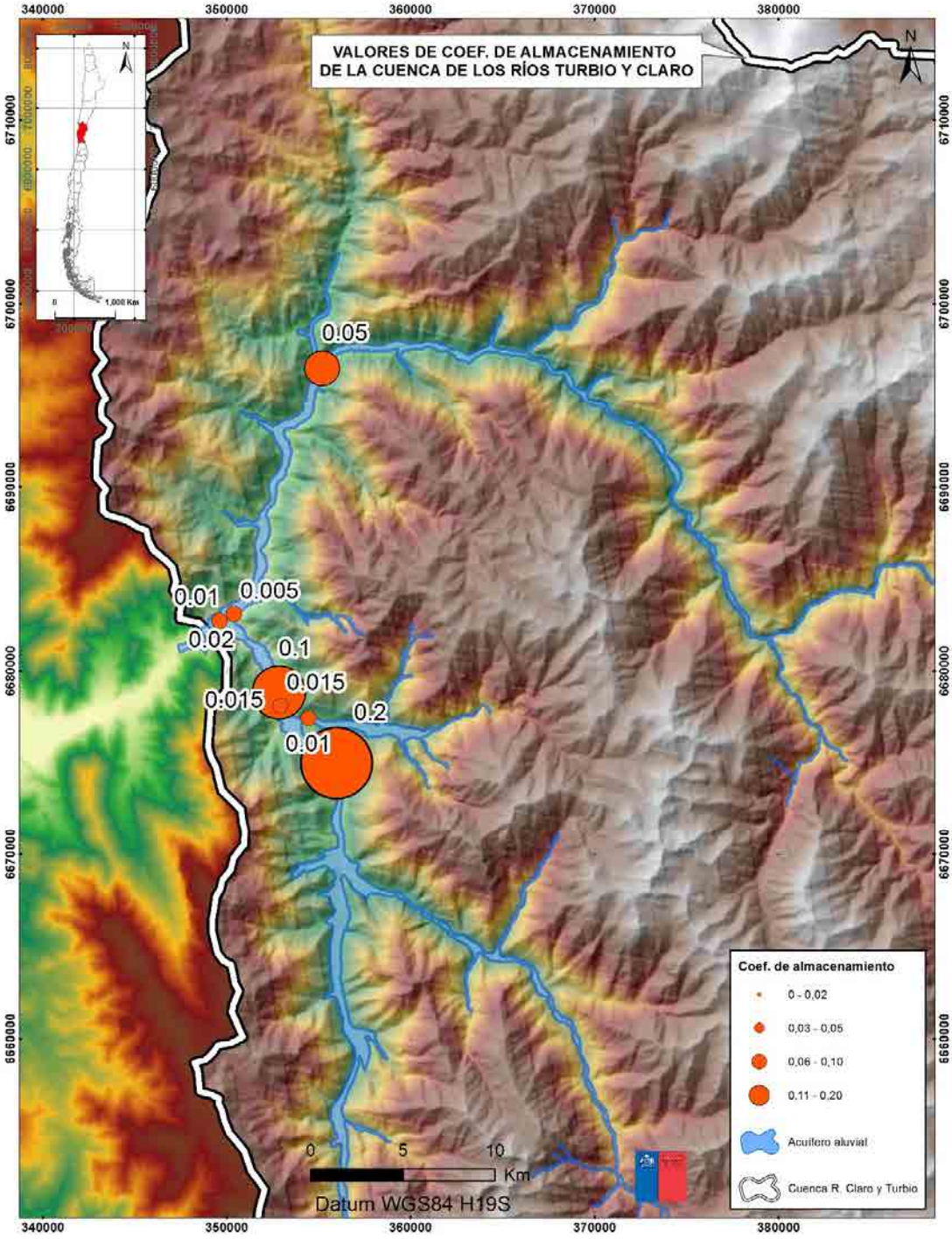


Figura 6-107. Ubicación de ensayos de bombeo interpretados y valores de coeficiente de almacenamiento. Fuente: elaboración propia

6.8 MODELO CONCEPTUAL

La zona de estudio comprende las cuencas del río Claro y río Turbio ubicadas dentro de la IV Región de Chile. La superficie total del área de estudio es de 5.639 km^2, encontrándose en un contexto climático de aridez.

Morfológicamente, las cuencas principales se prolongan en dirección Este a Oeste con una diferencia de cota de unos 5.000 m.

Este **modelo conceptual preliminar** presenta un análisis, del funcionamiento e interacción de las aguas superficiales y subterráneas, inferida a partir de los antecedentes disponibles, y de los cálculos realizados en este estudio.

6.8.1 HIDROLOGÍA

A continuación, se presenta un resumen de los parámetros relacionados con la hidrología, tales como son la precipitación, temperatura, evaporación y análisis de caudales.

El detalle del análisis de cada uno de estos parámetros, a partir de los datos de las estaciones meteorológicas, se puede encontrar en el **numeral 6.4**.

Los datos de precipitaciones en estaciones pluviométricas de la zona de estudio muestran que existe un gradiente altitudinal en el que la precipitación aumenta con la altura, por lo tanto, las mayores precipitaciones se encuentran en las zonas altas de los valles, aumentado regionalmente hacia el Oeste, y alcanzando máximos en las cimas de las montañas de la cordillera de los Andes que hacen de divisoria de aguas.

La variación mensual de precipitación indica que existe una marcada estacionalidad, con máximos en el periodo junio – agosto, y mínimos en el periodo diciembre – febrero.

El cálculo de la distribución de precipitaciones sobre la cuenca, realizado a través de las líneas isoyetas y polígonos de precipitación, obteniendo un valor de precipitación total para el área de estudio de 1.093 hm^3, equivalente a 34.637 L/s. De los cuales 11.689 L/s precipitan anualmente sobre la cuenca del rio Claro y 22.984 L/s sobre la cuenca del rio Turbio.

La temperatura promedio anual, al contrario que la precipitación disminuye con la altura, encontrando máximos en las zonas bajas de los valles (14°C - 19°C) y mínimos en las

cumbres de las montañas circundantes, alcanzado temperaturas mínimas cercanas a -3° C en algunos puntos.

Su patrón de variación mensual también es inverso al de las precipitaciones, con máximos en los meses de verano (diciembre – febrero) y mínimos en invierno (junio - agosto).

Con respecto a los cursos de agua superficiales cabe destacar que el patrón mensual de caudales muestra que los ríos siguen un régimen de alimentación nival con máximos en los meses de primavera-verano (diciembre – enero) y mínimos de forma casi continua en los meses de abril a agosto.

A nivel global, el caudal máximo mensual se promedia en el mes de diciembre en la estación 'Río Elqui en Algarrobal', con 21,23 m^3/s. Esta estación se encuentra unos 4 Km aguas abajo de los ríos Turbio y Claro. El caudal mínimo se promedió en la estación 'Rio Toro antes junta Rio La Laguna', ubicada en la parte alta de la cuenca del río Turbio, con un valor de 0,59 m^3/s en el mes de junio.

6.8.2 GEOLOGÍA

Desde el punto de vista geológico, la zona alta de la cuenca, donde se desarrollan los ríos Claros y Turbio, fue intensamente afectada por las glaciaciones del Pleistoceno. A pesar de que las formas glaciales están poco desarrolladas y se limitan a las partes superiores de los valles, su influencia ha llegado incluso hasta algunos kilómetros aguas abajo de Rivadavia, presentándose a lo largo de este recorrido depósitos morrénicos de hasta más de 100 m de espesor provenientes de arrastre.

En la cuenca de estudio hay una fuerte presencia de materiales graníticos, principalmente de edad Paleozoica, aunque también más recientes.

Debido a la dinámica erosiva fluvial y glacial, se han ido desarrollando pequeños rellenos sedimentarios que son los que conforman los acuíferos.

6.8.3 HIDROGEOLOGÍA

El movimiento del agua subterránea en la cuenca del río Claro y río Turbio es principalmente desde los bloques de la montaña hacia los valles, siguiendo la dirección del cauce superficial. En las montañas, el flujo de las aguas subterráneas y su almacenamiento está controlado primariamente por la presencia de permeabilidad secundaria en forma de juntas y fracturas (Strauch *et al.*, 2006). Es posible que el almacenamiento sea considerable, dada la potencia de las unidades de roca, sin embargo, su permeabilidad aparece como pobre, lo que se discute más adelante. La escorrentía de los acuíferos en roca aporta al relleno sedimentario del río. Este relleno aluvial constituye el principal acuífero del sector.

En base a los antecedentes geológicos se han distinguido dos unidades hidrogeológicas principales:

- **Basamento impermeable:** materiales consolidados, formados por rocas que no conforman acuífero o que raramente puedan hacerlo, salvo localmente en zonas fracturadas y/o fisuradas. Estos materiales son principalmente intrusivos (granitos, granitoides, granodioritas, etc.), así como lavas y piroclastos consolidados, andesitas, dacitas y riolitas.
- **Relleno sedimentario reciente**: rellenos sedimentarios no consolidados, fluviales fundamentalmente. Bolones, gravas, limos y arcillas. Conforman el acuífero aluvial.

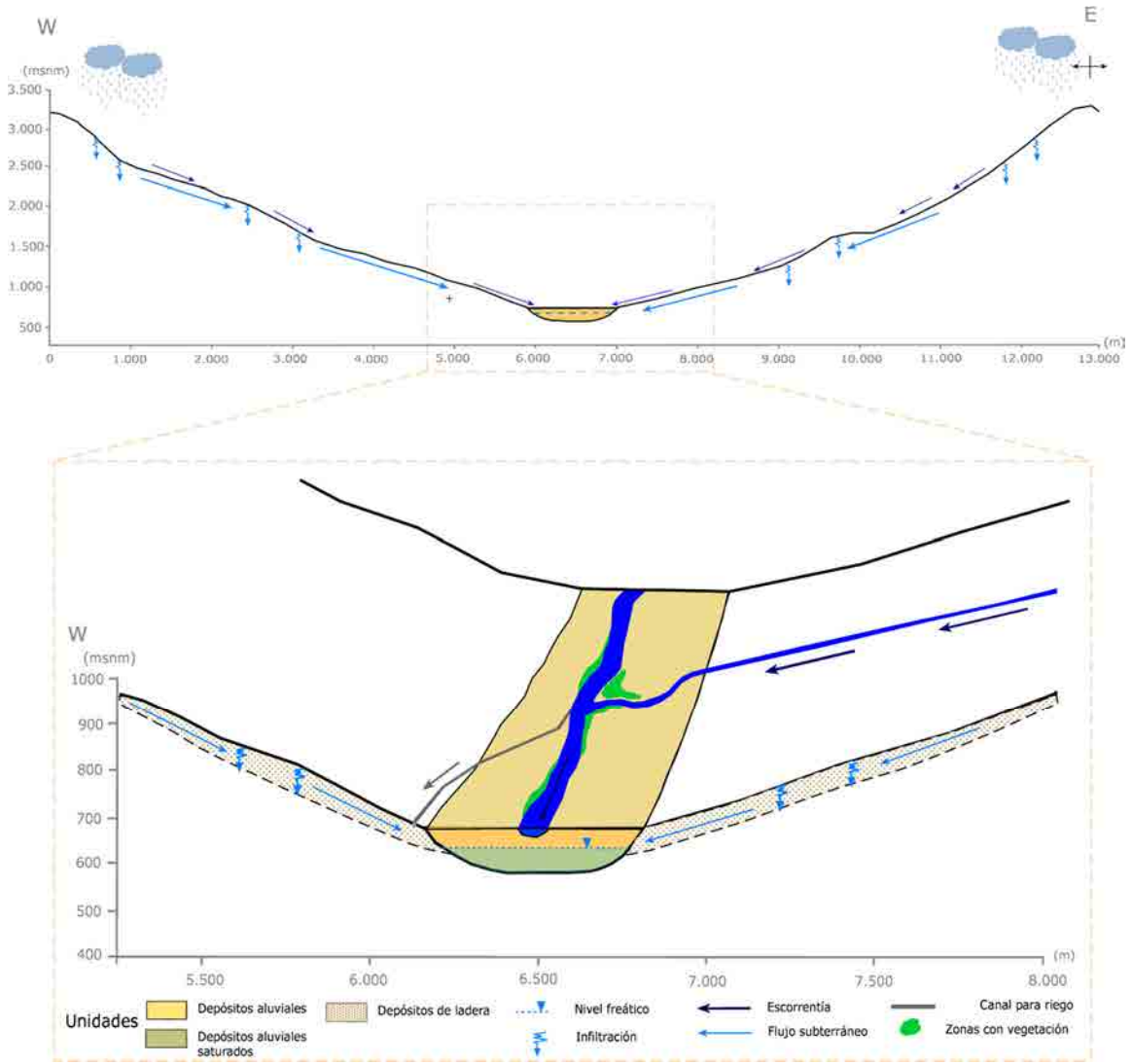


Figura 6-108. Sección 'tipo' inferida del cauce del río Turbio. Fuente: elaboración propia.

El espesor del relleno aluvial oscila entre 40 y 80 m y en algunos casos puede llegar a los 100 metros de potencia. El acuífero del río Turbio presenta espesores mayores de entre 70 m y 100 m y espesores saturados de entre 15 m y 80 m en su parte final. El río Claro por su parte presenta espesores entre 50 m y 80 m y espesores saturados de unos 30 m.

En base a los ensayos de bombeo realizados en el acuífero aluvial, los valores de transmisividad estimados son variables, oscilando desde 7 m^2/d hasta los 2.300 m^2/d. El gradiente hidráulico en la parte baja se ha estimado en 13‰.

Según CAZALAC-RODHOS, 2006 el acuífero del río Claro tiene una conductividad y su espesor saturado desde 4 m/d y 40 m, en la parte alta de la cuenca hasta más de 45 m/d y 62 m, en la desembocadura.

Los perfiles geofísicos realizados en el área de estudio muestran que aparentemente no existe una conexión entre el río y el acuífero. No obstante no se descarta que exista un aporte por goteo desde el río al acuífero aunque éste no sería muy abundante dado que no se observan indicios en los perfiles.

En cuanto a la piezometría del acuífero aluvial, al ser un acuífero estrecho, las isopiezas muestran como el flujo tiende a concentrarse en la parte central del aluvial. Éste recibe aportes subterráneos de las quebradas aledañas deformando las isopiezas otorgándoles esta forma. Dada la desconexión río-acuífero que muestran los perfiles geofísicos, no podemos hablar de un río ganador a pesar de la forma que presentan las isopiezas.

6.8.4 DETERMINACIÓN DE SHAC

Las cuencas del río claro y Turbio se encuentran separadas por una elevación que hace de divisoria de aguas y que está conformada por un material impermeable, tal y como se explica en el **numeral 6.7**. Éste hecho, hace que estas dos zonas funcionen hidrogeológicamente de manera independiente, aunque es evidente que en la zona de la confluencia entre ambas cuencas, los acuíferos aluviales interactúan entre sí, el posible efecto de un acuífero sobre el otro se verá limitado a la zona de influencia de los descensos producidos en uno u otro acuífero. Ante este hecho, se ha decidido considerar que cada acuífero aluvial corresponde a un SHAC independiente, la delimitación de estos SHAC corresponde a la delimitación del acuífero aluvial para cada una de las cuencas tal y como se muestra en el **numeral 6.7.1.**

6.9 BALANCE HÍDRICO

6.9.1 DEFINICIÓN DE BALANCE HÍDRICO

El balance hídrico se basa en el principio de conservación de la masa, estableciéndose que para un determinado sistema, la variación en el almacenamiento será igual a las entradas menos las salidas:

Variación de Almacenamiento = Entradas – Salidas

Si las entradas son iguales a las salidas, la variación en el almacenamiento es igual a 0, en esos casos se dice que el sistema está en equilibrio.

Si las entradas son superiores a las salidas, la variación en el almacenamiento será positiva, lo que indica que el almacenamiento de ese sistema está aumentando.

En caso contrario, cuando las salidas son superiores a las entradas, la variación en el almacenamiento será negativa, lo cual indica que el almacenamiento está en proceso de disminución.

Este balance debe quedar definido para un área y un tiempo determinado. El área ya quedó explicitada en la **Figura 6-109**, mientras que el tiempo suele considerarse un ciclo anual o un ciclo de varios años.

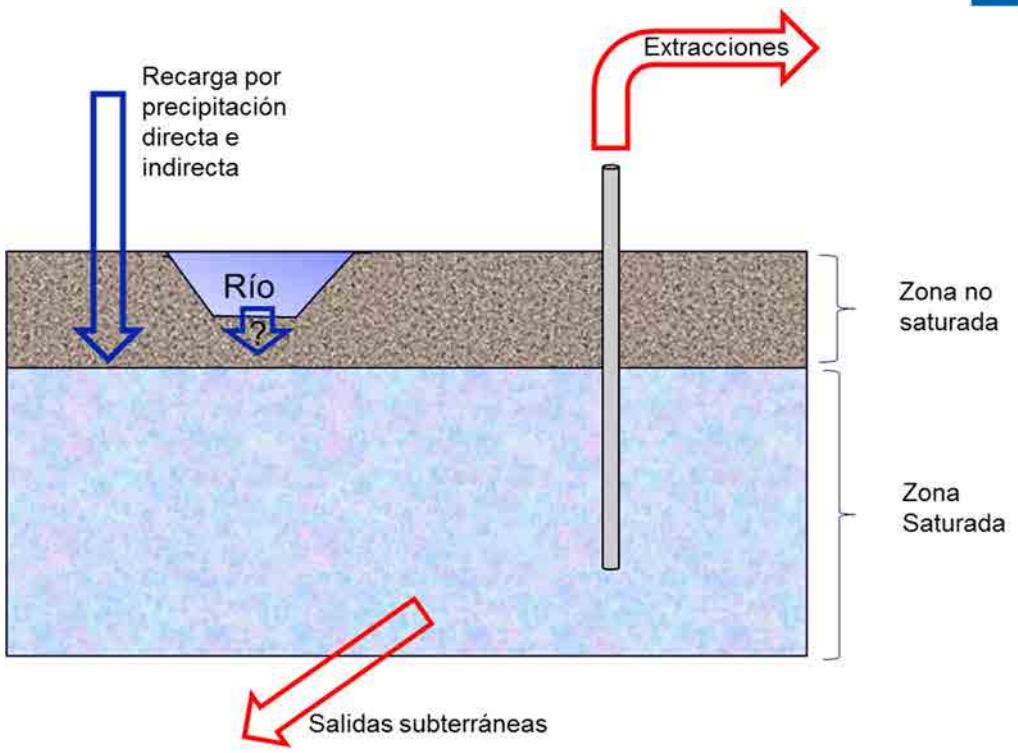


Figura 6-109. Esquema del balance hídrico del acuífero aluvial. Fuente: elaboración propia.

Para poder acotar cuáles serán las entradas y salidas, primero se debe definir el sistema sobre el cual se calcula el balance. Los **balances se pueden realizar a diferentes niveles** en función del interés del proyecto, en este caso se realizará a nivel de los SHAC del río Claro y río Turbio.

De forma general, los distintos tipos de entradas y salidas que puedan encontrarse en un acuífero aluvial con las características de acuífero del área de estudio son los siguientes:

Entradas	Salidas
Recarga directa por precipitación	Caudal subterráneo saliente del área de estudio
Aportes laterales subterráneos	Extracciones
Recarga desde cursos superficiales	Descargas a cursos superficiales
Recarga por retorno de riego	Descargas laterales subterráneas

Tabla 6-40. Entradas y salidas en un sistema acuífero. Fuente: Elaboración propia.

En los siguientes puntos se definen cada uno de estos tipos de entradas y salidas, explicando las consideraciones particulares de cada una de ellas para el caso de la zona de estudio.

6.9.2 BALANCE HÍDRICO DEL ACUÍFERO

6.9.2.1 ENTRADAS

Recarga por precipitación

Se trata de toda la recarga del acuífero producida por la infiltración de agua de lluvia sobre las zonas de recarga de un acuífero. Representa un porcentaje de la precipitación total, el resto del volumen precipitado sufrirá procesos de evaporación, transpiración o escorrentía superficial, antes de infiltrar y pasar a formar parte del agua subterránea. Según los perfiles geofísicos realizados en terreno, en todos ellos coincide que el río esta desconectado del acuífero. De este modo, se asume que el caudal que circula por el río formaría parte de la escorrentía superficial que se descuenta de la precipitación total.

La estimación de la recarga se realizó mediante el método de balance de cloruros. Este método consiste en comparar las concentraciones de cloruro en el agua de lluvia y en el agua del acuífero, suponiendo que una vez el agua de lluvia alcanza el terreno, se produce una evaporación y concentración de este ion.

Este método se aplica bajo el supuesto de que el agua de lluvia es el único componente del ion cloruro, sin tener en cuenta otras posibles fuentes como la disolución de sales cloruradas.

La relación entre la concentración de ion cloruro en la lluvia con respecto a la concentración de ion cloruro del agua en al acuífero, se establece por mediante la siguiente ecuación:

$$R \cdot \ Clac = P \cdot Clp - E \cdot Ce + As - Av + Av'$$

Donde:

R - Recarga por precipitación (mm/año)

P - Precipitación media (mm/año)

E - Escorrentía superficial media (mm/año)

Clp - Concentración de cloruro en las precipitaciones (mg/L)

Clac – Concentración de cloruro en el agua de recarga (mg/L)

As - Otros aportes de cloruro (Por aporte del suelo o aportados artificialmente (g/m2·año)

Av – Tasa de cloruro utilizado por la vegetación (g/m2·año)

Av' – Retorno de cloruro del suelo al morir la vegetación (g/m2·año)

Ce – Concentración de cloruro en la escorrentía.

La aplicación de esta ecuación general al caso particular de las cuencas de los Ríos Claro y Turbio, se ha realizado bajo el supuesto de que la tasa de cloruro tomada por la vegetación es similar a la que la vegetación vuelve a aportar al suelo al morir, por lo que los términos Av y Av' han sido aproximados a 0, por lo tanto la ecuación fue simplificada a:

$$R \cdot Clac = P \cdot Clp - E \cdot Ce$$

No se encontró ningún valor de concentración de cloruro en agua de lluvia en la IV Región, por lo que el valor de referencia que se usó fue el declarado en el informe de (ROCKWOOD LITHIUM, 2015) los cuales utilizan una concentración en 8 mg/L para el agua de lluvia en el salar de Atacama en la II Región, en base a mediciones realizadas en (UAA-ROCKWOOD, 2015). Estos valores, también son acordes con los presentados en el estudio de Rubio et al (2001), donde los valores promedios del cloruro en agua de lluvia de la región metropolitana están comprendidos ente 8 y 24 mg/L.

La concentración de cloruro de las aguas subterráneas y superficiales en la zona ha sido obtenida de Lafuente (LAFUENTE, 2010) en el que se tomaron muestras donde se analizaron las concentraciones de cloruro. Estos análisis muestran que para el caso del río Turbio la mediana para las aguas superficiales es de 21 mg/L, y para las subterráneas de 28 mg/L. En el caso del río Claro, las aguas superficiales tienen una concentración de cloruros de 11 mg/L y las subterráneas de 14 mg/L.

Aplicando la ecuación de balance de cloruros para estos valores límite se obtiene que la recarga efectiva por precipitación es de 2.567 L/s, equivalente a un 7,4 % de la precipitación total sobre la cuenca. De esta recarga efectiva 2.008 L/s corresponden al rio Claro y 559 L/s al río Turbio.

La gran variabilidad de la concentración en las muestras de cloruros de aguas subterráneas y superficiales, así como la incertidumbre en si el valor de agua de lluvia utilizado es representativo de la IV Región, hacen que el valor obtenido mediante este método no se considere válido a la hora de ser aplicado en el balance del acuífero, siendo únicamente utilizado para comparar su magnitud con el valor de recarga obtenido a través de la ecuación de balance, el cual si se considera representativo.

Para poder contrastar el valor de infiltración obtenido para el balance de cloruros, se estimó también el valor de recarga despejándolo de la ecuación de balance de cuenca, tal y como se explica en el **numeral 6.9.2.4.** Obteniéndose un valor de 151,9 L/s para la recarga por infiltración de la precipitación en la cuenca del río Claro y de 186,4 L/s para el río Turbio, equivalente a un 1,30% y un 0,81%, respectivamente, de la precipitación total.

Aportes laterales subterráneos

Los acuíferos se encuentran normalmente en contacto con otras formaciones acuíferas con los cuales pueden intercambiar caudal, en el caso de la zona de estudio se desconoce si las rocas ígneas que forman el basamento del acuífero aluvial pueden aportar agua al acuífero aluvial, pero en base a los perfiles TEM ejecutados para este proyecto, los cuales, muestran una gran disminución de la conductividad eléctrica en el encajante, lo cual es un indicativo de muy baja permeabilidad, se cree que si bien estos aportes pueden existir serán mínimos, y por tanto, se han considerado despreciables los aportes laterales subterráneos.

Recarga desde cursos superficiales

Los perfiles geofísicos ejecutados para este estudio muestran que existe una desconexión entre río y acuífero, además esta desconexión entre río y acuífero ha sido observaba en las visitas a terreno, tal y como se explican en el **numeral 6.7.2**. Por este motivo, aunque puede existir recarga desde el río hacia el acuífero, esta será mínima, por lo cual, se establece que esta entrada es despreciable en condiciones de caudales normales, pero puede ser significativa en los periodos de crecida del río tal y como se argumenta en el **numeral 6.7.4.**

Retorno de agua de riego

Del agua extraída desde los pozos y los canales, una parte es de tipo agrícola pudiendo generar un retorno por excedente de riego, generalmente este retorno se produce cuando se utiliza un sistema de riego por inundación, en el cual se vierte sobre el terreno un cantidad de agua muy superior a la que el terreno es capaz de retener. En la zona de estudio gran parte del cultivo es de uva, y el sistema de riego es por goteo, por lo que se estima que si es que existe retorno de agua de riego, este será muy pequeño, por este motivo, se ha considerado despreciable el retorno de agua por excedentes de riego.

6.9.2.2 SALIDAS

Extracciones

Se denomina 'Extracciones' a todo el volumen de agua que es extraído a través de pozos, canales, galerías u otros medios de extracción antrópicos. En la zona de estudio existen pozos que extraen agua del acuífero y canales que lo extraen del río. El caudal extraído por los canales, al ser únicamente desde el río y el río estar desconectado del acuífero, no intervendría en el balance.

Para calcular el volumen total que se extrae desde el acuífero, se han utilizado los datos que se muestran en el CPA (Catastro Público de Aguas) de la Dirección General de Aguas. Se ha considerado para el balance el caudal total otorgado que se encuentra tanto en el acuífero de la cuenca del río Claro como del río Turbio.

El caudal total otorgado es de **413,3 L/s** de los cuales 186,9 L/s se extraen del río Turbio y 226,4 L/s del río Claro (**Tabla 6-41**).

Cuenca	Caudal otorgado (L/s)
Río Turbio	186,9
Río Claro	226,4
Total	**413,3**

Tabla 6-41. Tabla con el caudal total otorgado en la cuenca del río Claro y cuenca del río Turbio. Fuente: elaboración propia

Descargas a cursos superficiales

Tanto el río Claro como el río Turbio reciben agua de acuíferos que alimentan el río en su parte alta, donde el acuífero aluvial es muy pequeño. No obstante, tal y como se observó en los perfiles geofísicos, en la gran mayoría de la cuenca no existe un aporte aparente del acuífero aluvial al río. Dado que el balance se realiza sobre el acuífero aluvial, no se consideran descargas del acuífero a cursos superficiales.

Salidas laterales subterráneas

Al igual que en las entradas, existe la posibilidad de un intercambio de caudal entre formaciones acuíferas, el volumen de ese caudal depende del área de contacto, de los parámetros hidráulicos de cada uno de los acuíferos y del gradiente existente entre ambas formaciones. Se desconoce si las formaciones que rodean al acuífero aluvial puedan alimentar el acuífero o viceversa, pero tal y como se ha explicado anteriormente, los perfiles TEM realizados en el presente proyecto muestran que la conductividad eléctrica disminuye drásticamente en la roca encajante, por lo que si es que hay trasferencia de agua entre ambos materiales esta será muy escasa, por este motivo se ha considera despreciable el aporte lateral subterráneo.

Caudal subterráneo saliente del área de estudio

Se trata del caudal subterráneo que sale de cada una de las cuencas, el cual se calcula mediante la Ley de Darcy (**Ecuación 6-4)** y permite estimar el caudal a través de una sección de paso en un medio poroso.

La ecuación de Darcy aplicada a la sección de paso, es la siguiente:

$$Q\ saliente = k * A * i \qquad \textbf{Ecuación 6-4}$$

Donde,

$Q\ saliente$: es el caudal subterráneo que circula por una sección de paso definida *[m^3/d]*

k: Conductividad hidráulica *[m/d]*

A: Sección de paso calculada *[m^2]*

i: Gradiente hidráulico *[adimensional]*

La conductividad hidráulica es la capacidad de un medio a que el agua circule a través de él y se mide a partir de realizar un ensayo de bombeo en un pozo. La sección de paso es el área que hay entre el nivel freático y el basamento que delimita el contorno del acuífero en su parte inferior. Por último, el gradiente hidráulico es la diferencia de nivel piezométrico entre dos puntos de un acuífero relacionada con la distancia entre estos dos puntos. Se calcula a partir de la cota piezométrica medida en dos pozos o entre dos perfiles geofísicos.

El cálculo del gradiente hidráulico se realizó en base a los perfiles geofísicos realizados entre las salidas de los ríos Claro y Turbio (**Figura 6-110**). Para el primer caso se obtuvo un gradiente hidráulico del **10 ‰** y para el río Turbio un gradiente del **16 ‰**.

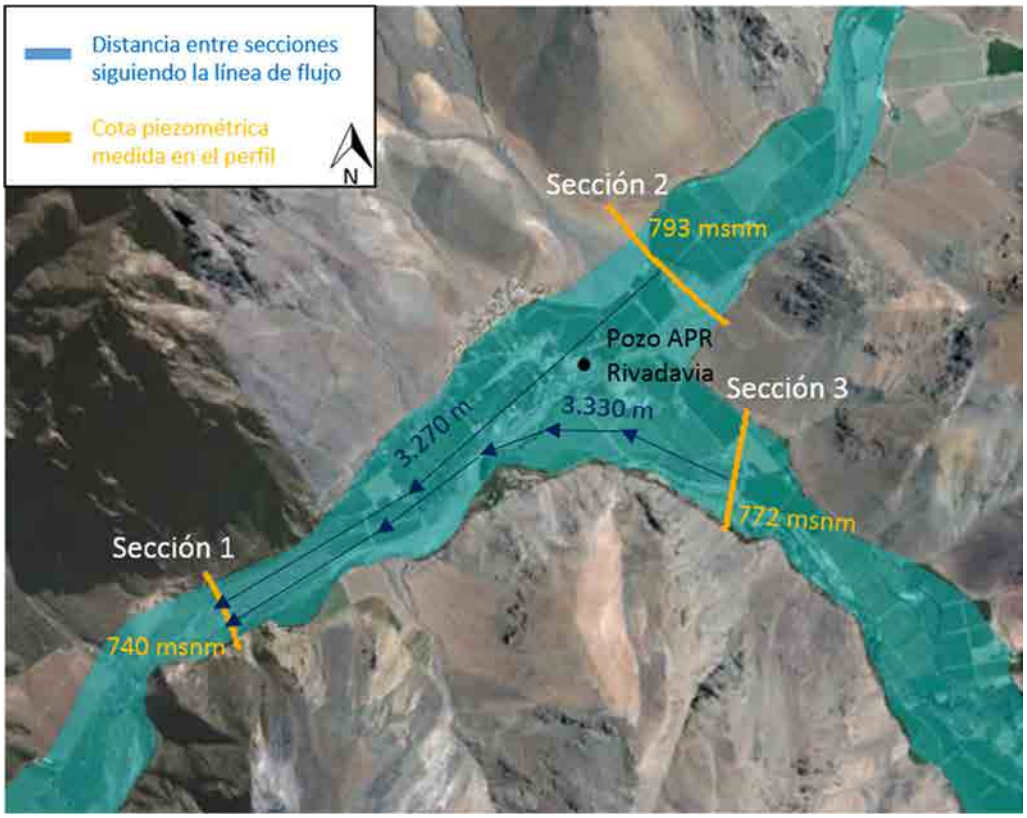


Figura 6-110. Esquema del cálculo realizado para la estimación del gradiente hidráulico. Fuente: elaboración propia.

Se utilizó un valor de conductividad hidráulica igual para ambas cuencas al estar muy cerca de la sección de paso y se calculó a partir de la interpretación de un ensayo de bombeo realizado en el pozo de abastecimiento de agua potable rural de Rivadavia (APR Rivadavia). La interpretación del ensayo entregó un valor de transmisividad de **618 m^2/d**.

A continuación se muestra el cálculo de la sección de paso de salida estimada para ambas cuencas y el resultado final del caudal de salida de cada cuenca.

Río Claro

El perfil muestra una sección del acuífero con un contraste de resistividades bien definido que representa de forma clara la geometría del acuífero. En base a este perfil se calculó la sección de paso del caudal subterráneo. En la **Figura 6-111** se presentan los resultados obtenidos en el perfil.

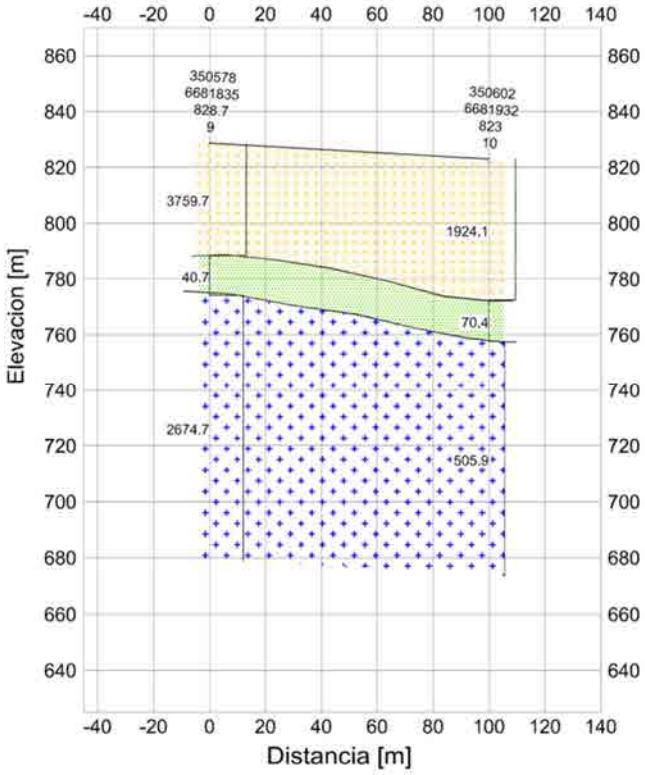


Figura 6-111. Sección utilizada para el cálculo del caudal de salida de la cuenca del río Claro. Fuente. Geodatos.

A partir de este perfil se estimó que el espesor saturado medio del acuífero en este punto es de unos 17 m y en base a criterios geomorfológicos se estimó el ancho de sección en 550 m. La **sección de paso calculada es de 9.300 m²**. La permeabilidad calculada para este punto es de 36 m/d (K=Transmisividad/Espesor Saturado) aproximadamente.

A partir de los parámetros calculados en los puntos anteriores se estima que:

$$Q\ saliente\ (rio\ Claro) = k * A * i$$

$$Q\ saliente = 36\ \frac{m}{d} * 9.300\ m^2 * 0{,}010 = \ 3.350\ m^3/d$$

El caudal subterráneo total que sale de la cuenca del río Claro es de aproximadamente 3.350 m^3/d o **39,0 L/s**.

En estudios previos como Comisión nacional de Riego (1987) se estima un valor de caudal subterráneo saliente 9,6 L/s, o CAZALAZ-RODHOS (2006) en el que se obtiene un valor de caudal saliente de 0,13 m^3/s equivalente a 130 L/s.

Río Turbio

Para el río Turbio se realizó el mismo proceso de cálculo que para el río Claro. En la **Figura 6-111** se muestra la sección de paso sobre la que se ha realizado el cálculo.

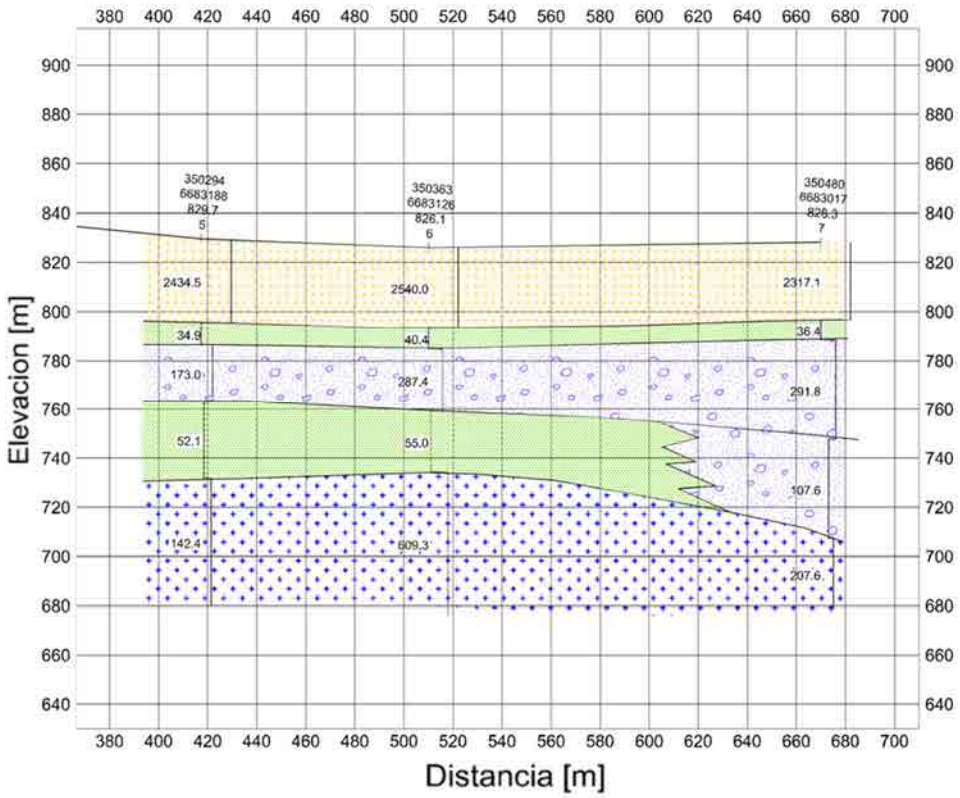


Figura 6-112. Sección utilizada para el cálculo del caudal de salida de la cuenca del río Turbio. Fuente. Geodatos.

A partir de este perfil se estimó que el espesor saturado medio del acuífero en este punto del río Turbio es de unos 60 m y en base a criterios geomorfológicos se estimó el ancho de sección en 700 m. La **sección de paso calculada es de 42.000 m^2**. La

permeabilidad calculada para este punto es de 10 m/d (K=Transmisividad/Espesor Saturado) aproximadamente.

A partir de los parámetros calculados en los puntos anteriores se estima que:

$$Q\ saliente\ (rio\ Turbio) = k * A * i$$

$$Q\ saliente = 10\ \frac{m}{d} * 42.000\ m^2 * 0{,}016 = \ 6.720\ m^3/d$$

El caudal subterráneo total que sale de la cuenca del río Turbio es de aproximadamente 6.720 m^3/d o **78 L/s**.

Los valores de caudal subterráneo saliente en la cuenca del río Turbio existentes en los antecedentes, son muy similares a los obtenidos en el presente estudio. Según Comisión nacional de riego (1987), el caudal subterráneo de salida del aluvial del río Turbio es de 63,5 L/s, y según CAZALAC-RODHOS (2006) es de 0,088 m^3/d equivalente a 88 L/s.

Analizando en conjunto ambas subcuencas se obtiene un valor de caudal de saliente en la zona de la confluencia de **117 L/s**, frente a los 75 L/s de Comisión nacional de riego, (1987). Por otra parte, el caudal saliente en la zona de la confluencia ha de ser similar al caudal entrante en el aluvial del río Elqui presentado en estudios anteriores. Encontrándose que en CAZALAC-RODHOS (2006) se estima que la zona de modelación AC-07 correspondiente al Elqui Alto, zona en contacto con la confluencia de los ríos Turbio y Claro tiene un caudal entrante de 89 L/s, por otra parte CORFO (1955) estima que el flujo pasante a la altura de 'El Algarrobal', cerca de la confluencia entre río Claro y río Turbio es de 16 L/s.

A la hora de comparar valores de caudal subterráneo, se ha de tener en cuenta que el valor de caudal es dependiente de la conductividad hidráulica, la cual tiene una gran variabilidad, por lo que los valores de caudal subterráneo han de tomarse como referenciales.

6.9.2.3 VARIACIÓN DE ALMACENAMIENTO

La variación de almacenamiento se ha calculado en base a la variación de niveles en los pozos que monitorea la Dirección General de Aguas. Para calcular el descenso promedio anual, se ha medido el descenso producido en los pozos durante los últimos tres años

(mayo-2012 a mayo 2015) y se ha calculado el promedio para un año. No se ha utilizado únicamente el último año, por falta de datos.

Como se observa en la **Tabla 6-42**, el descenso promedio anual de los pozos se ha estimado en 0,31 m/a. Esta variación anual del nivel se ha multiplicado por la superficie del acuífero aluvial calculando así la variación del volumen en el acuífero. Al igual que para la segunda región se ha utilizado una porosidad de 0,25 en base a antecedentes (Konikow *et al,* 1974, Lau *et al*, 1957). De acuerdo con lo comentado anteriormente se ha estimado un valor de variación de almacenamiento de aproximadamente **-192 L/s** (**Tabla 6-43**). Cabe remarcar que este valor puede variar significativamente dado que el registro de mediciones realizado para cada pozo es escaso. Según el periodo de tiempo seleccionado el valor de descenso varía considerablemente y con ello la variación de almacenamiento. No obstante la tendencia general es decreciente por lo que la variación de almacenamiento tiende a ser negativa.

Sector	Pozo	Variación nivel (m) (mayo-2012 /mayo-2015)	Variación media anual (m)
Confluencia	Algarrobal	-0,1	-0,03
	Pueblo Rivadavia	-0,95	-0,32
	Escuela Rivadavia	-0,26	-0,09
Río Claro	Montegrande	-1,05	-0,35
	Pueblo Paihuano	-1,2	-0,4
Río Turbio	Varillar	-2,1	-0,7
		Promedio Río Claro	-0,375
		Promedio Río Turbio	-0,285

Tabla 6-42. Cálculo del promedio de variación del nivel en los pozos monitoreados por la Dirección General de Aguas. Fuente: elaboración propia.

Sector	Río Claro	Río Turbio
Área acuífero (m^2)	38.178.442	34.743.169
Porosidad	0,25	0,25
Variación nivel anual (m)	-0,375	-0,285
Variación almacenamiento anual (m^3/año)	-3579229,0	-2475450,8
Variación almacenamiento anual (L/s)	-113,5	-78,5

Tabla 6-43. Cálculo de la variación de almacenamiento para el acuífero aluvial del río Claro y río Turbio. Fuente: elaboración propia.

El promedio de descenso aplicado a la variación de almacenamiento en el Río Turbio, ha sido calculada teniendo en cuenta la variación del nivel anual en la zona de la confluencia entre ambas cuencas y con el único pozo que dispone de datos en la cuenca del río Turbio.

Según CAZALAC-RODHOS (2006) no existe variación de almacenamiento en la zona de estudio. En dónde se realizó un análisis de la piezometría para el periodo 1998-2003 argumentando que los niveles permanecían constantes en el tiempo a pesar de la explotación (**Figura 6-113**). Lo anterior no concuerda con lo observado en los niveles de los pozos observados en la actualidad, por lo cual se ha decidido tener en cuenta el valor de variación en el almacenamiento calculado en el presente numeral.

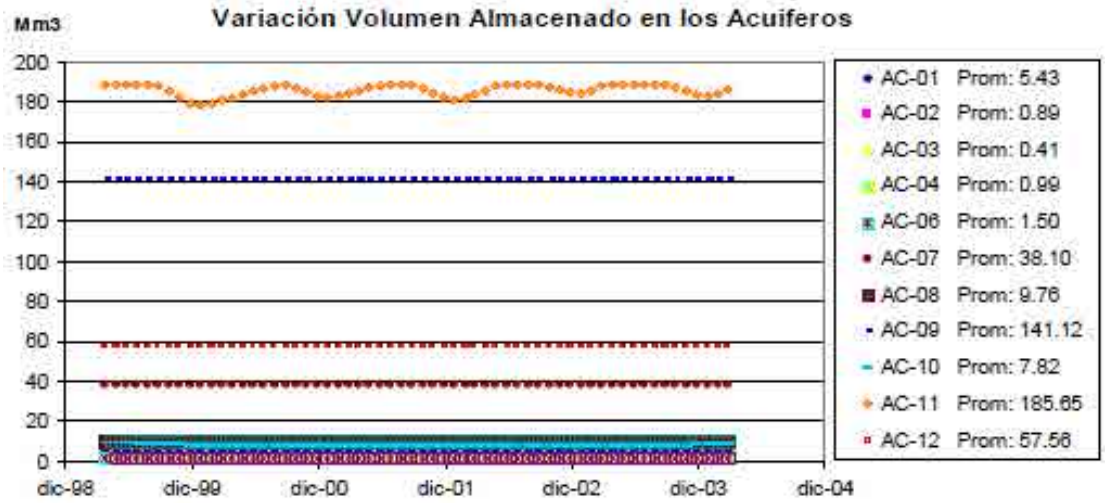


Figura 6-113. Variación del volumen almacenado en la cuenca del río Claro-Turbio. Fuente: CAZALAC-RODHOS, 2006.

6.9.2.4 APLICACIÓN DE LA ECUACIÓN DE BALANCE

En este caso y como se ha ido detallando, el sistema objeto de estudio se basa en una cuenca exorreica, en la que se identifican las siguientes **ENTRADAS**:

- ***Recarga directa por precipitación (PP)***

Así mismo, se considera la existencia de las siguientes **SALIDAS**:

- ***Extracciones (Bombeo)***
- ***Caudal subterráneo saliente del área de estudio***

Por tanto, la ecuación de balance será expresada finalmente de la siguiente manera:

$$\text{Variación de almacenamiento} = \text{Recarga por precipitación} - \text{Caudal subterráneo de salida} - \text{Extracciones}$$

El término del balance que tiene más incertidumbre es la recarga por precipitación, el resto de los parámetros han sido calculados previamente, despejando este término de la ecuación tenemos que:

$$\text{Recarga por precipitación} = \text{Variación de almacenamiento} + \text{Caudal subterráneo de salida} + \text{Extracciones}$$

Al sustituir cada uno de los términos por su valor tenemos lo siguiente para el acuífero del rio Claro:

$$\text{Recarga por precipitación} = -113{,}5\ \text{L/s} + 39{,}0\ \text{L/s} + 226{,}4\ \text{L/s} = 151{,}9\ \text{L/s}$$

Y para el caso del acuífero del rio Turbio tenemos que:

$$\text{Recarga por precipitación} = -78{,}5\ \text{L/s} + 78{,}0\ \text{L/s} + 186{,}9\ \text{L/s} = 186{,}4\ \text{L/s}$$

6.9.3 BALANCE HÍDRICO DE LA CUENCA

En los puntos anteriores se ha descrito el balance de acuífero, sin embargo, este acuífero se encuentra dentro de una cuenca hidrográfica que tiene su propio balance, siendo la ecuación de balance:

$$\text{Precipitaciones} = \text{Recarga del acuífero} + \text{Salidas superficiales} + \text{Evapotranspiración real}$$

El término de la ecuación que tiene mayor incertidumbre es la evapotranspiración real, el resto de los parámetros son conocidos y han sido obtenidos de fuentes de datos contrastadas, por lo que la evapotranspiración real será despejada y calculada a través de la ecuación de balance. En los siguientes puntos se describen el resto de los términos de la ecuación.

6.9.3.1 ENTRADAS

Precipitaciones

El total de precipitaciones anuales para la cuenta objeto de estudio fue estimado en 1.093 hm^3, equivalente a 34.673 L/s, la explicación del método de obtención de la precipitación total anual se puede encontrar en el **numeral 6.4.1.4**.

6.9.3.2 SALIDAS

Salidas superficiales

Una parte del total de la precipitación escurre de forma superficial en lugar de pasar a formar parte del acuífero aluvial. Como el balance se realiza sobre el acuífero aluvial, todo el agua precipitada que se infiltra en la parte alta de la cordillera y que aguas abajo escurre alimentando al río en vez de formar parte del acuífero aluvial, se considera escurrimiento superficial.

Para el río Turbio, el total escurrido se ha calculado en base al caudal medio medido en la estación de aforo "Río Turbio en Varillar" más la suma del caudal extraído en los canales del río Turbio que gestiona la Junta de Vigilancia del río Elqui. Durante el año 2015 la Junta de Vigilancia del río Elqui (caudal otorgado 2.133 L/s) ocupó únicamente un 25 % del caudal total (533 L/s).

A continuación en la **Tabla 6-44** se muestra el total del caudal de salida del río Turbio.

Salidas superficiales río Turbio	
Nombre	**Caudal medio anual 2015 (L/s)**
Río Turbio en Varillar	7.477
Canales Junta Vigilancia río Elqui	533
Total (L/s)	**8.010**

Tabla 6-44. Total caudal superficial de salida de la cuenca del río Turbio. Fuente: Dirección General de Aguas.

Para el río Claro se realizó de igual forma, utilizando los datos de la estación de aforo de "Río Claro en Rivadavia" más la suma del caudal extraído en los canales del río Claro que gestiona la Junta de Vigilancia del río Elqui y la Junta de Vigilancia del Estero Derecho. Ambos durante el año 2015 ocuparon únicamente un 25 % del caudal total.

A continuación en la **Tabla 6-44** se muestra el total del caudal de salida del río Claro.

Salidas superficiales río Claro	
Nombre	**Caudal medio anual 2015 (L/s)**
Río Claro en Rivadavia	4.580
Canales Junta Vigilancia río Elqui	904
Canales Junta Vigilancia Estero derecho	462
Total (L/s)	**5.946**

Tabla 6-45. Total caudal superficial de salida de la cuenca del río Claro. Fuente: Dirección General de Aguas.

Recarga al acuífero

La recarga al acuífero fue estimada en 186,4 L/s para el río Turbio y de 151,9 L/s para el río Claro, tal y como se explica en el **numeral 6.9.2.4.**

6.9.3.3 APLICACIÓN DE LA ECUACIÓN DE BALANCE

Como se ha explicado anteriormente, el parámetro con mayor incertidumbre de la ecuación de balance en la cuenca, es la evapotranspiración real, por lo que, esta será despejada de la ecuación:

$$\text{Evapotranspiración real} = \text{Precipitaciones} - \text{Recarga del acuífero} - \text{Salidas superficiales}$$

Sustituyendo los valores de cada uno de los términos y resolviendo la ecuación para el caso del río Claro obtenemos un valor de evapotranspiración real de:

$$\text{Evapotranspiración real} = 11.689{,}0\ \text{L/s} - 151{,}9\ \text{L/s} - 5.946{,}0\ \text{L/s} = 5.591{,}1\ \text{L/s}$$

Y para el río Turbio:

$$\text{Evapotranspiración real} = 22.984{,}0\ \text{L/s} - 186{,}4\ \text{L/s} - 8.010{,}0\ \text{L/s} = 14.787{,}6\ \text{L/s}$$

El valor de evapotranspiración obtenido es equivalente a un 48 % de la precipitación total para el río Claro y un 64% para el río Turbio, autores anteriores cifraron este valor en un 75% (Hidrología general del río Elqui, Zunino *et al*., 2008) y un 83% para el río Turbio y 81% para río Claro (Balance hídrico de Chile, DGA, 1988).

Las estaciones meteorológicas instaladas para el presente proyecto ayudarán a definir de mejor manera las variables hidrometeorológicas de la zona de estudio y por tanto obtener valores con menor incertidumbre de los términos del balance. La información sobre las estaciones instaladas se puede observar en el **Anexo 7**.

7 LIMITACIONES

Las incertidumbres en la caracterización hidrológica del presente proyecto para ambas regiones se enumeran a continuación:

1. La información disponible en cuanto a las variables meteorológicas en la zona de estudio es escasa. Y su distribución geográfica no permite caracterizar correctamente ambas zonas, este hecho es destacable en la II Región, donde los datos meteorológicos corresponden a una cuenca próxima.
2. La información disponible de niveles piezométricos e información geológica en los pozos de ambas zonas, es insuficiente. Debido a que los datos no son públicos o los pozos donde hay información geológica no tienen suficiente profundidad para una completa caracterización hidrogeológica.

Las estaciones instaladas para el presente proyecto, permitirán obtener datos reales del interior de la cuenca, mejorando así la caracterización hidrológica e hidrogeológica, en futuros proyectos.

8 CONCLUSIONES GENERALES

II REGIÓN

1. Existe una divisoria de aguas superficiales entre las cuencas de Imilac y Punta Negra, sin embargo, tanto la geología en superficie como los perfiles geofísicos muestran que existe continuidad hidrogeológica en el acuífero aluvial entre las cuencas de Imilac y Punta Negra.

2. El espesor del acuífero aluvial en su punto máximo es del orden de 1.000 m en la cuenca del salar de Punta Negra y de aproximadamente 400 m en la cuenca del salar de Imilac.

3. La principal salida del acuífero en la cuenca de Punta Negra corresponde a la explotación de Minera Escondida Ltda, en el caso del salar de Imilac no existen bombeos.

4. La evaporación en ambas cuencas se produce desde cuerpos de agua (Lagunas) y desde napas, siendo esta última más del 90% del total.

5. La falla que atraviesa el salar en dirección N-S divide el acuífero en dos bloques, haciendo por tanto que el efecto del bombeo sea mucho más acusado en el bloque Oeste que en bloque Este, generando un efecto de amortiguamiento del bombeo.

6. Los términos del balance tienen un alto grado de incertidumbre, puesto que han sido calculados en base a datos extrapolados de cuencas aledañas. El balance deberá ser actualizado nuevamente una vez que se disponga de una serie de datos suficientemente grande de las estaciones hidrometeorológicas recientemente instaladas.

7. Todas las metodologías empleadas para calcular la variación de almacenamiento indican que ésta es negativa. Por lo que, la explotación en la cuenca va a provocar un agotamiento paulatino de las reservas de agua en el acuífero, siempre que se mantenga el régimen actual de entradas y salidas.

8. Según los resultados obtenidos en **escenario 3.4** (sustentabilidad hídrica en condiciones generales), del modelo del Salar de Punta Negra e Imilac, se concluye que el caudal de explotación sustentable en condiciones generales (donde se

reduce el caudal de explotación por igual a todas las captaciones que están explotando el acuífero en la actualidad) es de unos **62,6 L/s.**

9. Según los resultados obtenidos en **escenario 5** (sustentabilidad hídrica modificando la variable espacial y volumen de explotación de las captaciones) del modelo del Salar de Punta Negra e Imilac, se concluye que el caudal de explotación sustentable a las condiciones indicadas, es de **190,0 L/s**.

10. En base a los resultados de los escenarios de sustentabilidad hídrica (escenario 3.4 y escenario 5), no es viable mantener el caudal de explotación otorgado (unos 1.565 L/s de media anual), y en ningún caso, autorizar aquellos pendientes en trámite.

IV REGIÓN

1. Geomorfológicamente, la cuenca definida por los ríos Claro y Turbio se emplaza en un sector definido por la cordillera de los Andes de retención nival en la parte alta de las cuencas de ambos ríos, y por los cordones transversales en la salida común de las dos cuencas.

2. Existe un gradiente altitudinal de precipitaciones que hace que la precipitación aumente con la altura, dicho gradiente altitudinal es mayor en la cuenca del río Claro que en la cuenca del río Turbio. Este gradiente provoca que la mayor parte de las precipitaciones se produzcan en las zonas altas, encontrándose los mínimos de precipitación en la zona de la confluencia entre ambas cuencas.

3. El análisis de caudales en el río Claro y río Turbio muestran que ambos ríos presentan un régimen nival con caudales máximos en los meses de verano (diciembre-enero).

4. El acuífero aluvial en la cuenca del río Claro presenta un espesor que varía entre los 20 y los 80 metros, el acuífero de la cuenca del río Turbio presenta mayores espesores que el acuífero del río Claro.

5. Los perfiles geofísicos y las observaciones realizadas en terreno indican que el río se encuentra desconectado del acuífero en la mayor parte de la cuenca, aunque ello no impide que exista un cierto factor de goteo desde el río hacia el acuífero.

6. La piezometría muestra que el flujo se concentra en la parte central del acuífero debido a los aportes laterales desde depósitos de ladera. El gradiente hidráulico oscila entre 8 ‰ y 30 ‰.

7. Los términos del balance tienen en general un alto grado de fiabilidad debido a que se han calculado en base a datos reales de la cuenca, exceptuando el término de la recarga del acuífero, que presenta una gran incertidumbre.

8. La evolución piezométrica de la zona de estudio muestra que existe una tendencia decreciente en los niveles del acuífero aluvial de ambas cuencas, lo cual implica que la variación en el almacenamiento de los acuíferos sea negativa. Esto va en contra de estudios anteriores que aseguraban que la variación en el almacenamiento era nula en la zona de estudio, debido a que el régimen pluviométrico era mayor.

9. Cabe remarcar, que los acuíferos que forman estos dos SHAC están altamente influenciados por la pluviometría de la zona; por lo tanto, ésta es una de las variables que ha de estar mejor caracterizada para una buena gestión.

10. La variación de almacenamiento es negativa. Por lo que, la explotación en la cuenca va a provocar un agotamiento paulatino de las reservas de agua en el acuífero (de -78,5 L/s para el río Turbio y de -113,5 L/s para el río Claro), siempre que se mantenga el régimen actual de entradas y salidas. Por lo que habría que reducir los derechos otorgados en la cuenca del río Turbio a 108,4 L/s (un 58% del caudal otorgado, siendo este de 186,9 L/s); y en el río Claro a 112,9 L/s (un 50% del caudal otorgado, siendo este de 226,4 L/s). Esta variación de almacenamiento ha sido calculada durante los tres últimos años, en los cuales ha habido una disminución de las pluviometrías de ambos SHAC. Por lo tanto, esta reducción de derechos otorgados solo sería necesaria en periodos de sequias prolongadas.

9 PROPUESTAS ADMINISTRATIVAS

En base a los balances hídricos obtenidos resultado del modelo conceptual de los SHAC de la IV Región, y del modelo numérico de la II Región, se realiza la presente propuesta de medidas administrativas para cada caso estudiado, a los efectos de que se pueda llevar a cabo una gestión eficiente y sustentable de las aguas subterráneas; con el fin de evitar las externalidades negativas que se puedan presentar por el uso inadecuado del agua y satisfacer la demanda, asegurando el acceso al recurso hídrico por parte de todos los usuarios.

II REGIÓN

Tal y como se expone en las conclusiones, en el SHAC del Salar de Imilac y Salar de Punta Negra la demanda del periodo simulado de 50 años, se supera el volumen de extracción sustentable (190 l/s) en los escenarios 1 (lo supera en 1375,8 L/s), 2 (1.488,8 l/), 3.1 (782,82 L/s) y 4 (125 L/s), estando sometido actualmente el acuífero a sobreexplotación, lo que conlleva un detrimento continuo en el volumen de reservas estimado en 385,60 L/s para escenario 3.1 y en 117,69 L/s para el escenario 4 y, existiendo por tanto un perjuicio de los derechos de terceros ya establecidos en ellos. Este hecho, se observa en una tendencia al descenso de los niveles sostenida, además de en la afección de las surgencias naturales (vertientes naturales que alimentan las lagunas). Por todo esto se proponen las siguientes medidas administrativas para este SHAC:

1. Declaración de área de restricción para nuevas extracciones de agua subterránea, según lo establecido en el artículo 65 del Código de Aguas y 30 del DS 203 de 2013. Concretamente se han evaluado los siguientes puntos del artículo 30 del DS 203 de 2013 con los resultados obtenidos en el escenario 4 del modelo numérico:

    a. Cuando antecedentes técnicos den cuenta de la existencia de un riesgo de grave descenso de los niveles en una zona del Sector Hidrogeológico de Aprovechamiento Común que pueda afectar la extracción de aguas subterráneas de derechos de aprovechamiento existentes en ella. Según los resultados del escenario 4, el descenso promedio de los niveles en el SHAC es de 1 m/año, por lo que en el tiempo modelado el descenso total promedio sería de unos 50 m.

b. La demanda comprometida sea superior a la recarga de éste, ocasionando riesgo de grave disminución de los niveles del Sector Hidrogeológico de Aprovechamiento Común, con el consiguiente perjuicio de derechos de terceros ya establecidos en él. Según los resultados presentados en el escenario 4 la recarga natural promedio de este SHAC es de 190,55 L/s, añadiendo la inyección realizada por MEL sería una recarga total promedio de 197,75 L/s, mientras que la demanda actual es de 315,44 L/s. Por lo que la demanda existente por las explotaciones actuales supera la recarga existente, con un déficit de 117,69 L/s, poniendo en grave riesgo de disminución de los niveles en el SHAC.

c. Los estudios técnicos demuestran que la demanda comprometida provocará una reducción superior al cinco por ciento del volumen almacenado, en un plazo de cincuenta años. Según el escenario 4 la demanda existente con la explotación actual provocará una disminución del 0,29% del volumen almacenado.

   Cabe destacar, que la poca reducción del volumen almacenado es debida principalmente a la gran extensión y profundidad de estos acuíferos, por lo que son capaces de almacenar un gran volumen de agua.

d. Los estudios técnicos indican que la demanda comprometida producirá una afección a los caudales de los cursos de aguas superficiales en más de un diez por ciento del caudal medio mensual asociado al ochenta y cinco por ciento de probabilidad de excedencia, durante seis meses consecutivos. Si bien en el SHAC no existen cursos de aguas superficiales permanentes, si existen surgencias naturales que alimentan los sistemas de vegas y lagunas; según los resultados del escenario 4, la explotación actual provocará una afección a estos sistemas, causando que estos sistemas se sequen en dentro del plazo modelado (50 años).

2. Diseño de un Plan de Ordenación de las extracciones en el cual se establezcan los volúmenes máximos de explotación por captación y su ubicación, habida cuenta que los caudales y ubicación de las captaciones con derechos otorgados a fecha actual son inasumibles en el marco de una gestión sustentable del

acuífero desde el punto de vista medioambiental (sin facultad por parte de la DGA)

3. Fomentar la recarga artificial de los acuíferos, ya sea con aguas residuales tratadas y/o con aguas procedentes de otras cuencas donde no se presente escasez de este recurso. Teniendo en consideración que las aguas de recarga sean de igual o mejor calidad que la del contenido del acuífero, según artículo 9 del Decreto Supremo 46 del 2002.

4. Realizar un control de extracción de todos los puntos de captación de los recursos hídricos, mediante la instalación de totalizadores en cada uno de ellos y requerimientos de la información obtenida.

5. Construcción de piezómetros de control de nivel y de calidad de aguas con el fin de tener mayor información de los sistemas de acuíferos de la zona, y así mejorar su gestión. Principalmente, en la zona del salar de Imilac y al este de la falla del salar de Punta Negra.

6. Control de los caudales en los canales que alimentan las lagunas existentes, concretamente los sistemas VCL-2, VCL-3 y los existentes en el Salar de Imilac.

7. Creación de una comunidad de usuarios para la gestión integrada de las cuencas tanto de las aguas subterráneas como superficiales. Aunque, actualmente, en el SHAC del salar de Imilac y Punta Negra solo existe un usuario, por lo que carecería de importancia actual, pero sí considerarse en un futuro donde pudiera existir otros usuarios (sin facultad por parte de la Dirección General de Aguas).

8. Concienciación de los usuarios en cuanto a la escasez del recurso y el uso responsable del agua.

IV REGIÓN

Tal y como se expone en las conclusiones los SHAC de Río Turbio y Río Claro, en ambos SHAC la demanda actual al 31 de Diciembre de 2015, supera el volumen de extracción sustentable, estimándose que existe riesgo de grave disminución del volumen almacenado en los acuíferos (la variación de almacenamiento de los acuíferos equivale a una sobre explotación de -113,5 L/s para el SHAC de río Claro y de -78,5 L/s para el río Turbio) con el consiguiente perjuicio de los derechos de terceros ya establecidos en ellos. Este hecho, se observa en una tendencia al descenso de los niveles sostenida, lo cual implica una disminución del almacenamiento de los acuíferos. Por todo esto se proponen las siguientes medidas administrativas para cada uno de los SHAC:

1. Declaración de área de restricción para nuevas extracciones de agua subterránea, según lo establecido en el artículo 65 del Código de Aguas y 30 letra b) del DS 203 de 2013.
2. Fomentar la recarga artificial de los acuíferos, ya sea con aguas residuales tratadas y/o con aguas procedentes de otras cuencas donde no se presente escasez de este recurso. Teniendo en consideración que las aguas de recarga sean de igual o mejor calidad que la del contenido del acuífero, según artículo 9 del Decreto Supremo 46 del 2002.
3. Realizar un control de extracción de todos los puntos de captación de los recursos hídricos, mediante la instalación de totalizadores en cada uno de ellos y requerimientos de la información obtenida. Con el fin, de discriminar entre caudales otorgados con los extraídos en la realidad.
4. Densificar las redes de seguimiento de control piezométrico y de calidad de aguas con el fin de tener mayor información de los sistemas de acuíferos de la zona, y así mejorar su gestión.
5. Creación de una comunidad de usuarios para la gestión integrada de las cuencas tanto de las aguas subterráneas como superficiales (sin facultad por parte de la DGA).
6. Concienciación de la población en cuanto a la escasez del recurso y el uso responsable del agua.
7. Fomentar el incremento en la tecnificación del riego.

8. Mejorar la impermeabilidad de los canales de riego existentes (sin facultad por parte de la DGA).

9. Mejorar las redes de distribución de los centros poblados, reduciendo así las pérdidas de agua que se producen en los ductos de éstas (sin facultad por parte de la DGA).

10 PROPUESTAS DE ACCIONES FUTURAS PARA EL MEJORAMIENTO Y ACTUALIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN

En este numeral se enumeran las propuestas de acciones futuras para mejorar y actualizar la información existente los SHAC de la II y IV Región, con el fin de reducir la incertidumbre en las variables de entrada, geología, modelo conceptual, balances hídricos, etc..

II REGIÓN

Para reducir la incertidumbre existente en el presente estudio, SUEZ MEDIOAMBIENTE CHILE SA, propone las siguientes acciones:

1. Construcción de al menos 2 lisímetros de carga variable, adicionales a los existentes, en el Salar de Punta Negra, para una mejor caracterización de la evaporación desde el acuífero.

Zona	UTM ESTE	UTM NORTE
Núcleo Salar de Punta Negra	501.400	7.280.400
Zona Margina Salar de Punta Negra	507.200	7.280.500

Tabla 10-1 Lisímetros propuestos en SHAC de Salar de Punta Negra e Imilac

La ubicación de estos lisímetros viene determinada por la geología de la zona, ya que ésta es una variable muy importante que afecta directamente a la evaporación existente desde el acuífero. En base a este concepto, por tanto, se propone la instalación de estos dos lisímetros en ubicaciones donde la geología es diferente entre ellos y entre el lisímetro que se ha instalado para este proyecto.

El objetivo de esta recomendación, es tener una mayor exactitud en el cálculo de la salida natural de aguas subterráneas que tiene este acuífero, y por tanto tener un balance hídrico, modelo conceptual y modelo numérico mucho más exacto a la realidad. Esto proporcionará una mejor herramienta a la DGA como gestor de las aguas subterráneas en Chile.

2. Construcción de piezómetros y sus respectivos ensayos de bombeo en los sectores donde no existe ningún tipo de información (Salar de Imilac, zona oeste del salar de Punta Negra, zona este de la falla del salar de Punta Negra).

Zona	UTM ESTE	UTM NORTE	Profundidad estimada (m)
Aluvial Guanaqueros	528.200	7.316.200	100-200
Salar Imilac	524.800	7.324.700	<20
Aluvial Imilac	526.500	7.324.200	<20
Este Falla Salar Punta Negra	523.000	7.271.350	100-200
Aluvial Oeste Salar Punta Negra	492.700	7.275.800	30-100

Tabla 10-2 Piezómetros propuestos en SHAC de Salar de Punta Negra e Imilac

La ubicación de estos piezómetros se ha basado en las zonas dónde hay nula información y que por tanto crean una incertidumbre real en modelo conceptual y numérico de la zona de estudio.

Estos piezómetros, otorgarán información geológica, información hidrogeológica como parámetros hidráulicos (los cuales se insertan directamente en cualquier modelo numérico), y por tanto entregaran información para un mejor modelo conceptual y una mayor exactitud en las simulaciones del modelo numérico.

3. Solicitud de datos recopilados por las estaciones meteorológicas propiedad de MEL. En el caso de que esto no pueda realizarse, se propone la instalación de al menos dos estaciones meteorológicas de las mismas características que las instaladas en el presente proyecto.

Zona	UTM ESTE	UTM NORTE
Oeste Salar de Punta Negra	483.280	7.276.950
Sur-Este Salar de Punta Negra	521.000	7.257.700

Tabla 10-3 Estaciones meteorológicas propuestas en SHAC de Salar de Punta Negra e Imilac

La zona de estudio es muy extensa, por lo que la variabilidad climática en la zona obliga a tener mayores puntos de monitoreo, para asegurar un mejor monitoreo y estimar las variables de entrada con mayores puntos de muestreo y reducir la incertidumbre actual.

Toda nueva información y reducción de incertidumbre permitirá a la DGA un mejoramiento en la gestión de los recursos hídricos de la zona.

4. Monitoreo de niveles de las punteras existentes que miden el nivel somero del acuífero en las cercanías de las vegas del salar de Punta Negra.
5. Monitoreo del caudal de las canaletas tipo Parshall existentes en los sistemas VCL2 y VCL3 en el salar de Punta Negra.
6. Fiscalización de los niveles informados por MEL.
7. Instalación de reglas limnimétricas en los cuerpos de agua del Salar de Imilac, y los sistemas VCL-2 y VCL-3.

El objetivo de las propuestas 4, 5, 6 y 7, vienen determinadas como propuestas basadas en alerta temprana a problemas de sobreexplotación masiva del acuífero y evitar así daños irreversibles en el ecosistema y riqueza natural que alberga el SHAC del estudio.

El monitoreo sistemático de las variables indicadas en las propuestas 4, 5, 6 y 7, se podrán ver evoluciones en tiempo real, lo que servirá a la DGA para actuar tempranamente y gestionar de mejor forma los recursos hídricos y naturales del SHAC.

Todas las coordenadas de los puntos propuestos son referenciales. Para la construcción de los lisímetros se tendrá que construir un barreno previo, para la confirmación del nivel freático.

En la Tabla 10-4 se resume la estimación de cada una de las propuestas.

Item	Descripción	Unidades	Precio orientativo (sin IVA)
1	**CONSTRUCCIÓN DE LISÍMETROS**	2	**4.000.000 CLP**
	Materiales		2.000.000 CLP
	HH		1.000.000 CLP
	Logística		1.000.000 CLP
2	**CONSTRUCCIÓN DE PIEZÓMETROS**	5	**188.000.000 CLP**
	mts perforado con habilitación, desarrollo y prueba de bombeo	450	180.000.000 CLP
	Instalación de faena	5	8.000.000 CLP
3	**ESTACIONES METEOROLÓGICAS (con envío satelital)**	2	**28.000.000 CLP**
	Equipos		22.500.000 CLP
	HH		2.500.000 CLP
	Logística		3.000.000 CLP
4, 5, 6	**MONITOREO NIVELES, CAUDALES Y FISCALIZACIÓN**	1 año	**18.000.000 CLP ***
	HH monitor 1		9.000.000 CLP
	HH monitor 2		9.000.000 CLP
7	**INSTALACIÓN DE REGLAS LIMNIMÉTRICAS**	3	**2.000.000 CLP**
	Materiales		600.000 CLP
	HH		600.000 CLP
	Logística		800.000 CLP

* No incluida la movilización

Tabla 10-4 Estimación del coste de las propuestas de mejora.

Para la mejora en la gestión del SHAC definido en el salar de Punta Negra e Imilac, SUEZ MEDIOAMBIENTE CHILE S.A, propone el uso del software Hydromodelhost. Las características técnicas y la propuesta económica se adjuntan en ANEXO 9.

IV REGIÓN

Para reducir la incertidumbre existente en el presente estudio, SUEZ MEDIOAMBIENTE CHILE S.A, propone las siguientes acciones:

1. Construcción de seis piezómetros en los aluviales existentes en las zonas altas de los ríos Turbio y Claro.

Zona	UTM ESTE	UTM NORTE	Profundidad estimada (m)
Río Turbio	377.700	6.684.400	20-30
Río Turbio	391.500	6.684.200	20-30
Río Turbio	398.500	6.664.000	20-30
Río Claro	365.300	6.637.350	20-30
Río Claro	366.700	6.663.600	20-30
Río Claro	371.100	6.652.900	20-30

Tabla 10-5 Piezómetros propuestos en los SHAC de río Turbio y río Claro

La ubicación de estos piezómetros se ha basado en las zonas dónde hay nula información y que por tanto crear una incertidumbre real en modelo conceptual y numérico de la zona de estudio.

Estos piezómetros, otorgarán información geológica, información hidrogeológica como parámetros hidráulicos (los cuales se insertan directamente en cualquier modelo numérico), y por tanto entregaran información para un mejor modelo conceptual y una mayor exactitud en las simulaciones del modelo numérico.

2. Se propone la actualización de las estaciones meteorológicas existentes y la instalación de un sistema de envío de datos satelital de las mismas características que las instaladas en el presente proyecto.

El objetivo y finalidad de esta propuesta es otorgar una mejor fiabilidad en los datos recopilados de las estaciones meteorológicas, ya que en la actualidad muchos puntos son muestreados por personas, por lo que siempre existe el fallo humano en esta recopilación de datos. Esto es de gran importancia, ya que todos estos datos son necesarios para las estimaciones y cálculos en las variables de entrada del modelo conceptual y numérico, por lo que provocan incertidumbre, afectando directamente en la correcta gestión de los recursos hídricos.

Por otro lado, la recomendación relacionada con el envío de datos vía satélite, es para tener datos en tiempo real, y para reducir costos operacionales a la DGA, ya que de no contar con envío satelital, sería necesario ir a rescatar los datos almacenados en los dataloggers de las estaciones.

3. Establecer una red de monitoreo mensual y medición de parámetros físico-químicos (pH, Temperatura y conductividad eléctrica) de puntos de aguas subterráneas, que englobe los nuevos propuestos y los existentes en la actualidad.

El objetivo de esta propuesta, viene determinada como propuesta basadas en alerta temprana a problemas de sobreexplotación masiva del acuífero y evitar así daños irreversibles en el ecosistema y riqueza natural que albergan los SHAC de la IV Región.

El monitoreo sistemático de las variables indicadas en esta misma tiene el objetivo de ver evoluciones en tiempo real, lo que servirá a la DGA para actuar tempranamente y gestionar de mejor forma los recursos hídricos y naturales del SHAC.

4. Fiscalización y monitoreo de los caudales extraídos en cada uno de los canales de riego existentes en ambos SHAC.

El objetivo de esta propuesta es mantener un mejor control de las extracciones de los regantes, y por tanto fiscalizar que efectivamente esta salida de agua del acuífero no sea mayor a la informada, lo que puedo provocar una mayor explotación a la explotación sustentable que se espera que tengan los recursos hídricos. Esta, en todo caso, es una de las variables más importantes en este SHAC.

5. Actualización del modelo numérico de flujo de los SHAC del río Turbio y río Claro (Cazalac-Rodhos, 2006) o realizar un nuevo modelo numérico, basado en el modelo conceptual de este estudio.

Tiene como objetivo la simulación de escenarios futuros de los SHAC y así poder tomar decisiones preventivas y no reactivas a destiempo.

En la Tabla 10-6 se resume la estimación de cada una de las propuestas.

Item	Descripción	Unidades	Precio orientativo (sin IVA)
1	**CONSTRUCCIÓN DE PIEZÓMETROS**	6	**117.600.000 CLP**
	mts perforado con habilitación, desarrollo y prueba de bombeo	180	108.000.000 CLP
	Instalación de faena	6	9.600.000 CLP
2	**Actualización de estaciones meteorológicas**	1	14.000.000 CLP
	Equipos		9.500.000 CLP
	HH		2.500.000 CLP
	Logística		2.000.000 CLP
3, 4	**Monitoreo Mensual de Niveles, caudales**	1 año	**18.000.000 CLP ***
	HH monitor 1		9.000.000 CLP
	HH monitor 2		9.000.000 CLP
5	**REALIZACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO**	1	**15.000.000 CLP**
	HH especialista modelación conceptual		7.500.000 CLP
	HH especialista modelación numérica		7.500.000 CLP

Tabla 10-6 Estimación del coste de las propuestas de mejora.

Para la mejora en la gestión de los SHAC definidos en el río Claro y Río Turbio, SUEZ MEDIOAMBIENTE CHILE SA, propone el uso del software Hydromodelhost. Las características técnicas se adjuntan en ANEXO 9.

Para la utilización de este software, se necesitará un modelo numérico actualizado para ello. SUEZ MEDIOAMBIENTE CHILE SA, está realizando este modelo numérico y se terminará definitivamente en Julio de 2017, ya que por Bases Técnicas no se exige dicho trabajo.

Para ello, en la **Tabla 10-6** se indican los costos asociados a la elaboración de dicho modelo numérico.

10.1 CARACTERÍSTICAS DE EQUIPOS Y POZOS DE PROPUESTAS DE ACCIONES FUTURAS

En las propuestas de acciones futuras, para mejorar la gestión de los acuíferos que se analizan en este estudio, se indica la construcción de varios piezómetros/pozos, lisímetros y equipos como estaciones meteorológicas y reglas limnimétricas.

A continuación se detallan las características de cada una de estas propuestas.

Para los pozos/piezómetros se detalla a continuación:

- Pozos perforados con sistema de rotación inverso a lodo inundado, para una buena descripción litológica de los materiales perforados. El diámetro de perforación debe ser de 12".
- Habilitación del pozo con cribas tipo "Johnson" de acero inoxidable para una mejor duración y calidad del pozo.
- Engravillado con "tremie pipe" del anular para un buen control del volumen de gravilla inyectado.
- Tanto el tamaño de la grava, como el tamaño del "slot" (obertura) de la criba, se deberá definir, en base a la descripción de los materiales perforados.
- Limpieza y desarrollo del pozos hasta que se detecte que no están saliendo finos durante el airlift.
- Video inspección del pozo una vez terminado como control de calidad.
- Prueba de bombeo con bomba sumergible de 4" de diámetro.

Para las reglas limnimétricas se recomienda las reglas de la marca alemana OTT con precisión de 2 cm, y los datos se deberán tomar de forma visual.

Estas reglas se deberán instalar en las lagunas mediante un sistema de puntera metálica que permita la fijación dentro de la laguna.

Para la estaciones meteorológicas de la II Región y para la actualización de las estaciones de la IV región se recomienda la instalación de los siguientes equipos y sensores de medición.

SENSORES	MARCA	MODELO	DESCRIPCIÓN
Sensor compacto de temperatura, humedad, velocidad y dirección del viento, presión barométrica y radiación solar	LUFFT	WS501	Estación Meteo con canales para T°/Hum/Vel/Direcc/Presion/RadiSolar (sensor compacto)
Datalogger + Transmisor	STEVENS	SATCOMM + LOGGER	Plataforma Satelital Stevens con Transmisor **Satcomm** con datalogger
Pluviómetro	T.E.	TR-525 USW	Sensor de Precipitación con montaje a mástil
Panel Solar	KÔNIG-SONNE	-	Panel Solar de 40 Watts con regulador de voltaje y brazo
Batería	UC RANGE	ULTRACELL	Batería 12V, 24-26 AH, libre mantención, recargable

Tabla 10-7. Estaciones meteorológicas propuestas de mejora.

Estos equipos aportaran información importante para la gestión de los recursos hídricos de los SHAC de este estudio. Sobre la factibilidad técnica no existiría ningún problema ya que son estaciones totalmente autónomas, así como se ha comprobado en las estaciones instaladas para este proyecto.

Para los lisímetros que se recomienda instalar en el SHAC de la II Región, éstos serán de las mismas características que los instalados en Punta Negra y Salar de Imilac. Lo que se deberá tener en cuenta y analizar previo a la construcción es el nivel de agua en ese punto.

11 REFERENCIAS

ARRAU INGENIERÍA. Diagnóstico plan estratégico para la gestión de los recursos hídricos, Región de Antofagasta. Informe final, 2012.

BARRICK CHILE. Anexos, Estudio de Impacto Ambiental Integral Tranque de Relaves Pastos Largos. 2002.

BARRICK CHILE. Plan de Cierre Laguna de Sedimentación y Tranque de Relaves Pastos Largos. Capítulo 4. 2004.

CABEZAS R.; CEPEDA J.; BODINI A. Descripción Cartográfica de la Hoya Hidrográfica del río Elqui (Región de Coquimbo, Chile). Universidad de La Serena, La Serena, Chile. ISBN 956 7393 249. 2007.

CADE-IDEPE CONSULTORES EN INGENIERÍA, DGA. Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Cuenca del río Elqui. 2004.

CASTILLO, P. Geoquímica de sedimentos y relaves en la cuenca del río Elqui, Región de Coquimbo, Chile. Memoria para optar a título de Ingeniero Civil Ambiental. Universidad de La Serena. 2009.

CAZALAC-RODHOS. Aplicación de Metodologías para determinar la eficiencia de uso del agua, estudio de caso en la región de Coquimbo. 2006.

CEDREM. Anexo C: Caracterización del Medio Ambiente. Declaración de impacto Ambiental para el Proyecto de Prospección Minera OGA, II Región de Antofagasta, 2003.

CENTRO DE AGRICULTURA Y MEDIO AMBIENTE y FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS. Análisis de Vulnerabilidad del sector silvoagropecuario, recursos hídricos y edáficos de Chile frente a escenarios de Cambio Climático. Anexos. Caracterización de las cuencas seleccionadas. Universidad de Chile. 2008.

CENTRO DE ESTUDIOS DE HUMEDALES. Análisis multitemporal de Cuencas de los Humedales Alto Andinos Prioritarios de Chile. Informe Final, 2010.

CEPEDA P., J.; CABEZAS C., R.; ROBLES I., M.; ZAVALA Z., H. Antecedentes generales de la cuenca del río Elqui, Región de Coquimbo, Chile. J. 2008.

CIREN-INNOVA, proyecto de CORFO. Caracterización Base de Vegas y Bofedales Alto Andinos para una gestión sostenible de los recursos hídricos. Primera Parte: Región de Antofagasta. Código: 08CM01-23, 2010.

COMISIÓN NACIONAL DE RIEGO. Estudio Integral de Riego del Valle de Elqui. Volumen 1. INA, Ingenieros Consultores. Volumen 3 Capítulo I. 1987.

CONIC-BF INGENIEROS CIVILES CONSULTORES. Diagnóstico Plan Maestro para la Gestión de Recursos Hídricos, Región de Coquimbo. Informe Final. Tomo I –Informe Parte 1. Gobierno de Regional de Coquimbo. 2013.

Convenio Cooperación DGA-UCN-IRD. Geoquímica de aguas en cuencas cerradas: I, II y III Regiones-Chile, 1999.

CORFO-ONU-DGA-CCC. Investigación de Recursos Hidráulicos en el Norte Grande (CHI-69/535). Hidrogeología de la segunda región con referencia especial a las Zonas Investigadas. Volumen I, 1977.

CORTES, A.E.; OYARZÚN, R.; KRETSCHMER, N.; CHAVES, H.; SOTO, G.; SOTO, M.; AMÉZAGA, J.; OYARZÚN, J.; RÖTTING, T.; SEÑORET, M. and MATURANA, H. Application of the Watershed Sustainability Index to the Elqui river basin, North-Central Chile. Obras y Proyectos 12. 2012.

DGA. Análisis crítico de la red de medición de niveles de agua subterránea. II Región. Álamos y Peralta Ingenieros, 1987.

DGA. Balance Hídrico Nacional, 1988.

DGA. Evaluación de los recursos hídricos subterráneos de la cuenca del rio Elqui iv región. S.D.T. Nº 161. 2003.

DGA. Actualización delimitación de acuíferos alimentadores de vegas y bofedales, II Región. Chile, 2004.

DGA-DICTUC. Evaluación de la explotación máxima sustentable del acuífero del valle del Elqui. S.D.T. Nº 228. 2006.

DICTUC. Levantamiento hidrogeológico para el desarrollo de nuevas fuentes de agua en áreas prioritarias de la zona norte del Chile, Regiones XV, I, II y III. Etapa 1. Informe final parte II. Hidrología Regional del Altiplano de Chile, 2008.

DICTUC. Levantamiento hidrogeológico para el desarrollo de nuevas fuentes de agua en áreas prioritarias de la zona norte del Chile, Regiones XV, I, II y III. Etapa 2. Informe final parte VII. Medición de la evaporación mediante el método del "Domo". 2009.

FAVIER V.; FALVEY M.; RABATEL A.; PRADERIO E. and LOPEZ D. Interpreting discrepancies between discharge and precipitation in high-altitude area of Chile's Norte Chico region (26–32°S). 2009.

GOBIERNO REGIONAL DE COQUIMBO. Diagnóstico Plan Maestro para la Gestión de Recursos Hídrico, Región de Coquimbo, CONIC Ingenieros Civiles Consultores. 2013.

GRILLI y VIDAL. Evaporación desde salares: Metodología para evaluar los recursos hídricos renovables. Aplicación en las regiones I y II. 1986.

HABITERRA. Plan Regulador Intercomunal Provincia del Elqui. Región de Coquimbo. Estudio Fundado de Riesgos. Anexo. 2012.

HUBLART, P.; RUELLAND, D.; DEZETTER, A. y JOURDE, H. Reducing structural uncertainty in conceptual hydrological modelling in the semi-arid Andes. Hidrology and earth system sciences. 2015.

KONIKOW, L.F. and BREDEHOEFT, J.D. Modeling flow and chemical quality changes in an irrigated stream-aquifer system, Water Resour. Res., 10(3), 546-562, 1974.

LAFUENTE, C. A. Geoquímica de aguas y sedimentos de la cuenca del río Elqui. Tercera campaña de monitoreo, Proyecto CAMINAR, Y VISIÓN DE SÍNTESIS. Memoria para optar a título de Ingeniero Civil Ambiental. Universidad de la Serena. 2011.

LAU, L.K.; KAUFMAN, W.J. and TODD, D.K., Studies of dispersion in a radial flow system, Canal Seepage Research: Dispersion Phenomena in Flow Through Porous Media, Progress Rep. 3, I.E.R. Ser. 93, issue 3, Sanit. Eng. Res. Lab., Dep. of Eng. and School of P, 1957.

MARDONES, L. Flux et évolution des solutions salines dans les systemèmes hydrologiques des salars d'Ascotal et d'Atacama. 1998.

MELITTA F.; PÉREZ C. & LAZO E. B. Aspectos Climáticos del valle de Elqui. 2008.

MIRALLES G. Evaluación de los factores que controlan la geoquímica de sedimentos fluviales de la cuenca del río Elqui, IV Región de Coquimbo. Memoria para optar al Título de Geología. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile. 2013.

NOVOA J. Cambio climático del ecosistema semiárido transicional en Chile (IV Región de Coquimbo), mediante análisis de tendencia de caudales naturales. Tesis de Doctorado en Geografía. Universidad Nacional de Cuyo. 2008.

ORELLANA, J.; RAMÍREZ, G. E. Hidrología General, Salar de Punta Negra. Dirección General de Aguas, 1972.

OYARZÚN, R.; LILLO, J.; HIGUERAS, P.; OYARZÚN, J. Maturana, H. Sedimentos ricos en arsénico en la cuenca del río Elqui (norte de Chile): ¿Contaminación industrial o natural?. 2002.

OYARZÚN, R.; OYARZÚN, J.; SEÑORET, M.; MATURANA, H.; ORTH, K.; SOTO, G. and KRETSCHMER, N. Technical Report on river basin characteristics, pressures and issues (Elqui). Chile. 2008.

RUBIO, M. ANGELICA; LISSI, EDUARDO; RIVEROS, VIVIANA y PAEZ, MARITZA A.. Remoción de contaminantes por lluvias y rocíos en la región metropolitana. Bol. Soc. Chil. Quím. [online]. 2001, vol.46, n.3.

ROMERO F., C. Análisis de Embalse Subterráneo: Aplicación en Acuífero Subyacente al Río Elqui, IV Región de Coquimbo. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Ingeniería Civil. 2009.

SGA. Estudio hidrogeológico y modelo numérico sector sur del salar de Atacama. Anexo 1 del Estudio de Impacto Ambiental presentado por la empresa Rockwood Lithium. 2015.

SOUVIGNET, M.; GAESE, H.; RIBBE, L.; KRETSCHMER, N. and OYARZÚN, R. Climate Change Impacts on Water Availability in the Arid Elqui Valley, North Central Chile: A preliminary Assessment. 2008.

UNIVERSIDAD DE CHILE. Análisis del impacto económico en sector silvoagropecuario del Anteproyecto de Norma de Calidad de Aguas del río Elqui. 2005.

VILLA O., E. Impacto del cambio climático sobre la disponibilidad del agua y sus efectos sobre los usos de agua en la cuenca del río Elqui. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Chile. 2013.

ZABALA Z., H; TRIGOS A., H; MUNIZAGA A., I; MALL R., E. Hidrología Cuenca Río Elqui, MCRI Project: Institutional Adaptations to Climate Change. 2008.