A21_2018_Inf_03_698_CORFO_Consolidado_MAR_vD_FINAL

Estudio de modelos hidrogeológicos conceptuales integrados, para los salares de Atacama, Maricunga y Pedernales

Informe de ETAPA III. Informe final

Modelo Hidrogeológico Consolidado Cuenca Salar de Maricunga

Comité de Minería No Metálica CORFO

26 de enero 2018

Elaborado:	Revisado	Verificado:	Validado:
Jordi Escorcia Isaac Cabezuelo Adrián Muñoz Doménico Sciolla Martín Lizama Fernanda Cereceda Daniel Páez Diego Pérez	Pilar Enguita Jordi Escorcia	Pilar Enguita	Juan Castaño

Índice

RESUMEN EJECUTIVO **1**

1. INTRODUCCIÓN **4**

1.1 OBJETIVOS 5

1.2 SITUACIÓN GEOGRÁFICA 6

1.3 METODOLOGÍA DE TRABAJO 8

1.3.1 Recopilación y análisis de antecedentes *8*

1.3.2 Catastro de puntos *13*

1.3.3 Caracterización hidrológica y geológica de la cuenca *16*

1.3.4 Análisis hidrogeológico *16*

1.3.5 Análisis hidroquímico e isotópico *18*

1.3.6 Elaboración del modelo hidrogeológico 3D (Leapfrog) *18*

1.3.7 Integración de la información en un proyecto GIS *28*

1.3.8 Balance hídrico *29*

2. ANÁLISIS Y VALORACIÓN DE LOS ANTECEDENTES **30**

2.1 ANÁLISIS Y REVISIÓN DE LA GEOLOGÍA 30

2.2 ANÁLISIS Y REVISIÓN DE LA GEOMORFOLOGÍA 33

2.3 ANÁLISIS Y REVISIÓN DE LA METEOROLOGÍA 35

2.4 ANÁLISIS Y REVISIÓN DE LA HIDROLOGÍA 37

2.5 ANÁLISIS Y REVISIÓN DE LA GEOFÍSICA 40

2.6 ANÁLISIS Y REVISIÓN DE LA HIDROGEOLOGÍA 44

2.7 ANÁLISIS Y REVISIÓN DE LA HIDROGEOQUÍMICA 47

2.8 ANÁLISIS Y REVISIÓN DE LOS ISÓTOPOS 51

2.9 ANÁLISIS Y REVISIÓN DEL BALANCE HÍDRICO 52

2.10 ANÁLISIS Y REVISIÓN DE LOS MODELOS NUMÉRICOS 54

2.11 SÍNTESIS Y RECOMENDACIONES DE LA VALORACIÓN DE LOS ANTECEDENTES 59

3. CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA 62

3.1 CARACTERIZACIÓN HIDROGRÁFICA 62

3.1.1 Cuenca hidrográfica Salar de Maricunga 62

3.1.2 Cuenca hidrográfica de Piedra Pómez 62

3.2 CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA 64

3.3 ANÁLISIS HIDROLÓGICO 66

3.3.1 Análisis de la precipitación 66

3.3.2 Distribución espacial de las precipitaciones 72

3.3.3 Análisis de escorrentía 75

3.3.4 Evaporación 79

4. CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA 82

4.1 MARCO GEOLÓGICO 82

4.2 UNIDADES GEOLÓGICAS 84

4.2.1 Depósitos no Consolidados a Semi-consolidados 85

4.2.2 Rocas Estratificadas 87

4.2.3 Rocas Intrusivas 95

4.3 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL 101

4.3.1 Geología estructural del Salar de Maricunga 101

4.3.2 Geología estructural de la cuenca de Piedra Pómez 102

4.4 COLUMNAS ESTRATIGRÁFICAS REPRESENTATIVAS 104

5. CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA 116

5.1 PARÁMETROS HIDRÁULICOS 116

5.1.1 Introducción 116

5.1.2 Transmisividad y conductividad hidráulica 117

5.1.3 Porosidad Efectiva 128

5.1.4 Síntesis y conclusiones de los parámetros hidráulicos 128

5.2 UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS 130

5.2.1 Unidades hidrogeológicas (UH) 130
5.2.2 Descripción Unidades Hidrogeológicas 132
5.3 GEOMETRÍA DE LOS ACUÍFEROS (3D LEAPFROG) 141
5.3.1 Prospecciones geofísicas 141
5.3.2 Identificación de áreas de cuñas salinas 160
5.3.3 Geometría del sistema acuífero y del basamento 162
5.4 PIEZOMETRÍA 168
5.4.1 Inventario de puntos de agua 168
5.4.2 Evolución de niveles 177
5.4.3 Funcionamiento del flujo en la zona de estudio 188
5.5 VOLUMEN DE ALMACENAMIENTO DEL ACUÍFERO 198
6. HIDROGEOQUÍMICA E ISÓTOPOS 199
6.1 INFORMACIÓN DISPONIBLE 199
6.2 CLASIFICACIÓN DE LOS PUNTOS DE AGUA Y SECTORIZACIÓN 199
6.3 VALIDACIÓN DE LOS DATOS 202
6.4 PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS 205
6.5 COMPONENTES MAYORITARIOS Y FACIES 209
6.5.1 Sector Ciénaga Redonda 210
6.5.2 Sector Cordillera Claudio Gay 212
6.5.3 Sector Piedra Pómez 213
6.5.4 Sector Río Lamas – Llano de Tres Cruces 214
6.5.5 Sector Salar de Maricunga 215
6.6 RELACIONES IÓNICAS 218
6.6.1 rNa/rCl 218
6.6.2 rCa/rSO$_4$ 220
6.6.3 rCa/rHCO3 223
6.7 PARÁMETROS REPRESENTATIVOS DE SALARES 225

6.7.1 Evolución temporal 225

6.7.2 Distribución espacial 233

6.8 ISÓTOPOS 240

6.8.1 Evolución temporal δ^2H y $\delta^{18}O$ 240

6.8.2 Relación δ^2H / $\delta^{18}O$ 240

6.8.3 Relación Altitud / $\delta^{18}O$ 243

6.8.4 Relación B^{3+}/Cl^- / $\delta^{18}O$ 246

6.9 MODELO HIDROGEOQUÍMICO 248

7. SITIOS DE PROTECCIÓN AMBIENTAL Y SECTORES DE EXPLOTACIÓN 250

7.1 SITIOS DE PROTECCIÓN AMBIENTAL 250

7.2 SECTORES DE EXPLOTACIÓN Y DERECHOS DE AGUA 252

8. DETERMINACIÓN DE FLUJOS DE ENTRADA Y SALIDA 254

8.1 PERCOLACIÓN 254

8.2 ESCORRENTÍA SUPERFICIAL 257

8.3 BALANCE HIDROMETEOROLÓGICO 258

8.4 EVAPORACIÓN EN EL SALAR 260

8.5 EVAPOTRANSPIRACIÓN EN HUMEDALES 266

8.6 EXTRACCIONES ANTRÓPICAS 267

9. BALANCE HÍDRICO 268

10. ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE LITIO 271

10.1 EL LITIO COMO RECURSO 271

10.2 TECNOLOGÍAS DE EXTRACCIÓN DEL LITIO Y SUBPRODUCTOS 272

10.3 PUREZA DEL CONCENTRADO Y SUBPRODUCTOS 274

10.4 ANTECEDENTES DE LA ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE LITIO EN EL SALAR DE MARICUNGA 274

10.5 ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE LITIO EN EL SALAR DE MARICUNGA 278

11. SECTORES HIDROGEOLÓGICOS DE APROVECHAMIENTO COMÚN (SHAC) 283

11.1 ZONIFICACIÓN DE LA DGA (2006) 283

11.2 PROPUESTA DE SHAC POR AMPHOS 21 (2018) 284

11.3 COMPARACIÓN ZONIFICACIÓN DE DGA Y SHAC DE AMPHOS 21 285

12. EVALUACIÓN DE LA PLATAFORMA PARA LA MODELIZACIÓN NUMÉRICA DE FLUJO…….. 288

13. INCERTIDUMBRES DEL MODELO CONCEPTUAL Y GEOMETRÍA 3D 290

13.1 INCERTIDUMBRES GENERALES 290

13.2 INCERTIDUMBRES CON RESPECTO AL MODELO EN LEAPFROG 290

13.3 INCERTIDUMBRES CON RESPECTO A LA IDENTIFICACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LOS ACUÍFEROS DEL SALAR DE MARICUNGA Y CONEXIÓN CON OTRAS CUENCAS..... 291

13.4 INCERTIDUMBRES CON RESPECTO AL BASAMENTO 292

13.5 INCERTIDUMBRES CON RESPECTO AL BALANCE HÍDRICO (ENTRADAS Y SALIDAS) 292

13.6 POTENCIAL DE LITIO 293

14. SÍNTESIS Y CONCLUSIONES 294

15. RECOMENDACIONES DE LA ZONA DE ESTUDIO 298

15.1 RECOMENDACIONES DE RECOPILACIÓN DE ANTECEDENTES..... 298

15.2 RECOMENDACIONES DE GEOLOGÍA..... 298

15.3 RECOMENDACIONES DE GEOFÍSICA 300

15.4 RECOMENDACIONES DE HIDROLOGÍA Y METEOROLOGÍA 300

15.5 RECOMENDACIONES DE HIDROGEOLOGÍA 305

15.6 RECOMENDACIONES DE HIDROQUÍMICA 307

15.7 RECOMENDACIONES MODELOS NUMÉRICOS 309

16. BIBLIOGRAFÍA 314

ANEXOS

ANEXO I. ANTECEDENTES Y BASES DE DATOS

ANEXO II. GEOLOGIA Y GEOFÍSICA

ANEXO III. HIDROGEOLOGIA

ANEXO IV. HIDROQUIMICA

ANEXO V. BALANCE HIDRICO

ANEXO VI. LEAPFROG

ANEXO VII. GEODATABASE SIG

Índice de figuras

Figura 1-1: Ubicación de la cuenca Salar de Maricunga. 7
Figura 1-2. Mapa de la zona de estudio con la representación de los puntos que componen el catastro. 15
Figura 1-3. Perfiles geofísicos utilizados para la modelación. Exageración vertical de 6x. 27
Figura 2-1: Mapa geomorfológico de la cuenca hidrográfica Salar de Maricunga. 34
Figura 2-2: Piezometría cuenca Salar de Maricunga. 58
Figura 3-1. Cuencas y red hidrográfica. 63
Figura 3-2. Curvas hipsométricas. 65
Figura 3-3. Ubicación estaciones meteorológicas. 68
Figura 3-4. Serie de tiempo de precipitación anual (periodo 1971-2016). 70
Figura 3-5. Relación de altura contra precipitación media anual. 73
Figura 3-6. Isoyetas de precipitación media anual en el área de estudio. 74
Figura 3-7. Ubicación de estaciones fluviométricas en el área de estudio. 77
Figura 3-8. Curvas de variación estacional de caudales para distintas probabilidades de excedencia (%). 78
Figura 3-9. Gradiente de la evaporación media anual. 79
Figura 3-10. Evaporación media mensual en estaciones DGA. 81
Figura 4-1: Mapa geológico regional del Salar de Maricunga 83
Figura 4-2: Mapa geológico de la cuenca de Maricunga. 97
Figura 4-3: Sección Geológica longitudinal SSW-NNE Río Lamas – Piedra Pómez. 98
Figura 4-4: Leyenda de la sección Geológica longitudinal SSW-NNE Río Lamas – Piedra Pómez 99
Figura 4-5: Sección geológica del extremo noroccidental del Salar de Maricunga. 100
Figura 4-6: Modelo geológico 3D del Salar de Maricunga. 101
Figura 4-7. Esquema estructural del sector norte de la Cuenca del Salar de Maricunga. 103
Figura 4-8. Esquema estructural y paleogeográfico del Plioceno-Cuaternario de la zona norte de Maricunga, sur de Pedernales. 103
Figura 4-9: Sectorización de la cuenca Salar de Maricunga para descripción de columnas estratigráficas. 106
Figura 4-10: Columnas litológicas pozos MDO-15 (SP-2), MDO-12 (SR-3), MDO-14 (SR-6) y CAN-6. Sector 1: Salar de Maricunga Norte. 107
Figura 4-11: Columnas litológicas pozos MDO-8 (SR-1), MDO-10 (SP-1), MDO-9 (SR-2), MDO-23 (SP-3) y MDO-24 (SP-4). Sector 2: Salar de Maricunga Sur. 108
Figura 4-12: Columnas litológicas pozos RPG-27 y RPG-40. Sector 3: Llano Ciénaga Redonda. 109
Figura 4-13: Columnas litológicas pozos ANDINA-1 y CRE-1. Sector 3: Llano Ciénaga Redonda. 110
Figura 4-14: Columnas litológicas pozos CRO-6 y RPG-21c. Sector 4: Sector vega Barros Negros hasta Pampa Pantanillo. 112
Figura 4-15: Columnas litológicas pozos RA-1 y RA-2. Sector 4: Sector vega Barros Negros hasta Pampa Pantanillo. 113
Figura 4-16: Columnas litológicas pozos MWLR-1A y MWLR-2D. Sector 5: Río Lamas. 115

Figura 5-1: Mapa de distribución de transmisividad de la cuenca de Maricunga, a partir de los ensayos realizados. 127
Figura 5-2. Clasificación de las Unidades Hidrogeológicas en la cuenca. 131
Figura 5-3: Mapa hidrogeológico de la cuenca de Maricunga. 140
Figura 5-4. Cobertura de estudios y trazados de medición geofísica en la cuenca del Salar de Maricunga. 142
Figura 5-5: Cobertura de líneas de prospección geofísica de la Cuenca de Salar de Maricunga, sector Salar de Maricunga. Fuente: Elaboración propia. 144
Figura 5-6: Perfil TEM M1 en el extremo Sur del Salar de Maricunga e interpretación (ubicación en Figura 5-5). 145
Figura 5-7: Perfiles gravimétricos L1N (superior) y L2N (inferior) realizados en el sector Piedra Pómez. 150
Figura 5-8. Distribución de trazados de mediciones geofísicas en el sector de sub-cuenca Piedra Pómez y Río Lamas. 151
Figura 5-9: Sección de resistividad del perfil LGRL 3. 154
Figura 5-10. Ubicación de líneas geofísicas en el sector de Ciénaga Redonda. 156
Figura 5-11: Perfil geofísico sector Ciénaga Redonda. 157
Figura 5-12. Ubicación de perfiles TEM y gravimétricos realizados en el sector Pampa Pantanillo. 159
Figura 5-13. Proyección preliminar en profundidad de la cuña salina. 161
Figura 5-14. Vista 3D de los volúmenes de la cuenca incluyendo el basamento 164
Figura 5-15. Vista 3D de los volúmenes acuíferos de la cuenca sin el basamento 165
Figura 5-16. Corte Leapfrog Salar de Maricunga – Piedra Pómez con exageración vertical x3. 166
Figura 5-17. Corte Quebrada de Ciénaga Redonda (ensanche Llano de Ciénaga Redonda) con exageración vertical x3. 167
Figura 5-18: Proyección del catastro de puntos de niveles en la cuenca de Maricunga. 176
Figura 5-19: Puntos seleccionados para estudio de variación de niveles en Piedra Pómez. 178
Figura 5-20: Variación de niveles en los pozos PPB-1 y PPB-5. 179
Figura 5-21: Variación de niveles en los pozos PPB-8, PPB-12 y PPX-16. 179
Figura 5-22: Evolución de niveles en los pozos MDO-12, MDO-13 y MDO-14, entre agosto de 1987 y octubre de 2005. 181
Figura 5-23: Evolución de niveles en los pozos MDO-8 y MDO-10, entre agosto de 1987 y abril de 2012. 182
Figura 5-24: Evolución de niveles en los pozos MDO-8 y MDO-10, entre enero de 2012 hasta enero de 2015. 183
Figura 5-25: Evolución de niveles en los pozos MDO-9, MDO-23 y MDO-24, entre agosto de 1987 y abril de 2012. 184
Figura 5-26: Evolución de niveles en los pozos MDO-9, MDO-23 y MDO-24, entre enero de 2008y enero de 2015. 185
Figura 5-27: Evolución de niveles en los pozos RA-1, RA-2 y RA-3, entre enero de 1999 y enero de 2015. 187
Figura 5-28: Piezometría tentativa de la cuenca de Maricunga 189
Figura 5-29: Piezometría tentativa de la cuenca de Maricunga, isopiezas cada 20 m. Sector Piedra Pómez 190

Figura 5-30. Piezometría tentativa de la cuenca de Maricunga, isopiezas cada 20 m. Sector Ciénaga Redonda. 191
Figura 5-31. Piezometría tentativa de la cuenca de Maricunga, isopiezas cada 20 m. Sector Salar de Maricunga. 192
Figura 5-32. Sección hidrogeológica A-A´-A´´-A´´´. 195
Figura 5-33: Sección hidrogeológica B-B'. 196
Figura 6-1: Ubicación puntos con información hidroquímica/isotópica, clasificados en base al tipo de punto y sector. 201
Figura 6-2: Relación entre la CE y TDS. 207
Figura 6-3: Distribución espacial de la conductividad eléctrica. 208
Figura 6-4: Diagrama de Piper de las aguas emplazadas en la cuenca Salar de Maricunga. 210
Figura 6-5: Diagrama de Piper de las aguas emplazadas en el sector Ciénaga Redonda. 211
Figura 6-6: Diagrama de Piper de las aguas emplazadas en el sector Cordillera Claudio Gay. 212
Figura 6-7: Diagrama de Piper de las aguas emplazadas en el sector Piedra Pómez. 214
Figura 6-8: Diagrama de Piper de las aguas emplazadas en el sector Río Lamas - Llano de Tres Cruces. 215
Figura 6-9: Diagrama de Piper de las aguas emplazadas en el sector Salar de Maricunga. 217
Figura 6-10: Relación iónica Sodio v/s Cloruro. 219
Figura 6-11: Ejemplo de relación rCa/rSO4 con vías evolutivas (sulfatada y cálcica). 221
Figura 6-12: Relación iónica Calcio v/s Sulfato. 222
Figura 6-13: Relación iónica Calcio v/s Bicarbonato. 224
Figura 6-14: Evolución temporal B, K, Li, Mg de las aguas superficiales en el sector Salar de Maricunga. 226
Figura 6-15: Evolución temporal B, K, Li, Mg en el punto de agua superficial LM37B ubicado en el sector Río Lamas y Llano de Tres Cruces. 227
Figura 6-16: Evolución temporal de B en las aguas emplazadas en el sector Ciénaga Redonda. 229
Figura 6-17: Evolución temporal de K en las aguas emplazadas en el sector Ciénaga Redonda. 230
Figura 6-18: Evolución temporal de Li en las aguas emplazadas en el sector Ciénaga Redonda. 231
Figura 6-19: Evolución temporal de Mg en las aguas emplazadas en el sector Ciénaga Redonda. 232
Figura 6-20: Concentración de B, Li, Mg y K según tipología y sector geográfico 235
Figura 6-21: Distribución de B. 236
Figura 6-22: Distribución de Li. 237
Figura 6-23: Distribución de Mg. 238
Figura 6-24: Distribución de K. 239
Figura 6-25: Composición isotópica δ2H v/s δ18O de las aguas analizadas. 242
Figura 6-26: Ejemplo de una relación entre diferentes muestras de aguas y la recta altitudinal local. 243
Figura 6-27: Relación de la cota topográfica de muestreo v/s δ18O de las aguas analizadas. 245
Figura 6-28: Relación B3+/Cl- vs δ18O en las aguas de estudio. 247
Figura 7-1: Cuenca del Salar de Maricunga y la ubicación de los sitios de protección ambiental. 251
Figura 8-1. Sistema hidrometeorológico simplificado de la precipitación al caer al suelo. 259

Figura 8-2. Curvas de evaporación v/s profundidad del Escenario 1. 261
Figura 8-3. Curvas de evaporación v/s profundidad del Escenario 2. 261
Figura 8-4. Curvas de evaporación v/s profundidad del Escenario 3. 262
Figura 8-5. a) Imagen satelital. b) Composición RGB de infrarrojos. c) NDWI. d) Reclasificación. 264
Figura 9-1: Vista esquemática del balance hídrico. 270
Figura 10-1. (1) Usos de compuestos de Litio por aplicación en 2014. (2) Distribución de los recursos de Litio por país. 272
Figura 10-2. Proceso de producción de carbonato de litio a partir de salmuera. 273
Figura 10-3. Distribución de la sectorización del litio en salar. 279
Figura 10-4. Esquema en profundidad de los volúmenes definidos. 281
Figura 11-1: Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común (SHAC) y Zonificación de la DGA (2006) en la cuenca Salar de Maricunga 287
Figura 15-1. Propuesta de instalación de los anillos de infiltración. 304

Índice de tablas

Tabla 1-1: Inventario de columnas litológicas proyectadas en Leapfrog. 24
Tabla 1-2: Perfiles geofísicos usados para definir la geometría 3D 26
Tabla 2-1: Datos de estaciones meteorológicas revisadas. 35
Tabla 2-2. Puntos de medición y período de registro en cauces y cuerpos de agua monitoreados para el estudio EIA Lobo Marte. 38
Tabla 2-3: Tabla resumen de la geofísica. 41
Tabla 2-4: Tabla resumen de la geofísica recopilada estudios SERNAGEOMIN. 42
Tabla 2-5: Alcance estudios EIA del proyecto Cerro Casale. 43
Tabla 2-6: Información relevante. 45
Tabla 2-7. Valoración de los antecedentes. 61
Tabla 3-1. Parámetros morfológicos principales del área de estudio. 64
Tabla 3-2. Estaciones meteorológicas. 67
Tabla 3-3. Disponibilidad de información pluviométrica. 69
Tabla 3-4. Estadígrafos principales de la precipitación anual. 72
Tabla 3-5. Precipitación media anual en el área de estudio. 75
Tabla 3-6. Estaciones fluviométricas. 76
Tabla 3-7. Disponibilidad de información fluviométrica. 76
Tabla 3-8. Estaciones con medición de evaporación de tanque. 80
Tabla 3-9. Disponibilidad de información de evaporación de tanque. Nota: El registro realizado por Johnson (2009) en las cuencas hidrográficas Salar de Maricunga y Pedernales se realizó durante 2 días en cada punto. 80
Tabla 5-1: Valores de conductividad hidráulica representativos en función de la calidad acuífera. 116
Tabla 5-2: Valores de coeficiente de almacenamiento (S) representativos en función del tipo de acuífero. 117

Tabla 5-3: Permeabilidades obtenidas en ensayos de bombeo de pozos, según la litología perforada. 119
Tabla 5-4: Permeabilidades obtenidas en ensayos de calicatas. 119
Tabla 5-5: Parámetros hidráulicos obtenidos en los ensayos de bombeo en pozos. 123
Tabla 5-6: Parámetros hidráulicos obtenidos en los ensayos de bombeo en calicatas. 123
Tabla 5-7: Permeabilidades en los bombeos de las calicatas. 124
Tabla 5-8: Permeabilidades en los bombeos de las calicatas. 124
Tabla 5-9: Parámetros hidráulicos obtenidos en los ensayos de bombeo. 125
Tabla 5-10: Parámetros hidráulicos obtenidos en los ensayos de bombeo (continuación). 125
Tabla 5-11: Valores promedio de porosidad efectiva 128
Tabla 5-12: Cuadro resumen de valores de conductividad hidráulica y transmisividad en diferentes Unidades Geológicas de la zona de estudio. 129
Tabla 5-13: Descripción y características de las unidades hidrogeológicas presentes en la zona de estudio. 139
Tabla 5-14. Resumen de prospecciones geofísicas históricas recopiladas en este trabajo. 143
Tabla 5-15. Tabla de niveles de agua de la zona de estudio. 175
Tabla 5-16. Volumen de acuífero cuenca Salar de Maricunga. 198
Tabla 6-1: Tipos y subtipos de punto para clasificación hidroquímica. 199
Tabla 6-2: Muestras con BI fuera de rango y admitidas como datos confiables. 203
Tabla 6-3: Puntos con balance iónico dentro del rango establecido, pero sin información de todos sus parámetros mayoritarios. 204
Tabla 7-1: Características de los derechos de agua en la cuenca del Salar de Maricunga. 253
Tabla 8-1. Valores del coeficiente de infiltración (CI) en función de la permeabilidad cualitativa. 255
Tabla 8-2. Parámetros para la estimación de CID y CIL en la cuenca hidrográfica Salar de Maricunga 256
Tabla 8-3. Parámetros para la estimación de CID y CIL en la cuenca hidrográfica de Piedra Pómez 256
Tabla 8-4. Estimación de la percolación. 257
Tabla 8-5. Estimación de escorrentía total y comparación con estudios previos. 258
Tabla 8-6. Resultados del balance hidrometeorológico. 260
Tabla 8-7. Clasificación de zonas evaporantes en el Salar de Maricunga. 263
Tabla 8-8. Evaporación estimada para el Salar de Maricunga. 266
Tabla 8-9. Evapotranspiración estimada en el área de estudio. 267
Tabla 9-1. Balance hídrico en el acuífero del área de estudio. 268
Tabla 9-2. Estimaciones de recarga al salar. 269
Tabla 10-1. Leyes en mg/l de los diferentes elementos clave y resumen del potencial de Li y K. 275
Tabla 10-2. Comparaciones relevantes en salares en el mundo. 275
Tabla 10-3. Concentraciones de Li y K en los salares del norte de Chile, sector zona S. 276
Tabla 10-4. Estimación del potencial de litio en función de la porosidad efectiva y el volumen de salmuera. 277
Tabla 10-5. Tabla resumen del potencial de litio recopilado en los antecedentes. 277
Tabla 10-6. Porosidades efectivas adoptadas para las diferentes litologías. 278
Tabla 10-7. Áreas y concentraciones de litio para los diferentes sectores. 279

Tabla 10-8. Desglose de los cálculos realizados para estimar la potencialidad del Li en el Salar de Maricunga 282
Tabla 12-1: Comparativa de software para modelización numérica. 289
Tabla 15-1. Costos y métodos de obtención de una topografía. 306
Tabla 15-2. Listado de parámetros posibles a analizar en laboratorio. 308

Resumen Ejecutivo

El Salar de Atacama (II Región de Antofagasta), Salar de Maricunga y Salar de Pedernales (III Región de Atacama) se caracterizan por presentar un significativo potencial de litio, potasio y boro, metales que son de elevado interés económico. Estos elementos se encuentran disueltos en la salmuera que está contenida en los depósitos salinos de dichos salares.

Teniendo en cuenta lo anterior, es necesario desarrollar una explotación sustentable con el medio ambiente y para ello se debe conocer el funcionamiento hidrogeológico a nivel de cuenca (relaciones agua superficial-agua subterránea, recarga, conexión entre acuíferos y cuencas anexas, etc.). La integración de todas las variables que intervienen en un sistema acuífero permite establecer una gestión eficiente y sustentable de los recursos hídricos.

A partir de los antecedentes anteriores, el Comité de Minería No Metálica (CMNM), dependiente de CORFO, ha solicitado a Amphos 21 Consulting Chile Ltda (en adelante Amphos 21) el estudio del modelo conceptual del funcionamiento hidrogeológico de las cuencas de los salares de Atacama, Maricunga y Pedernales.

El proyecto “Estudio de modelos hidrogeológicos conceptuales integrados para los salares de Atacama, Maricunga y Pedernales”, se divide en tres etapas (Etapa I, II y III). En la Etapa I se ha realizado una revisión de los documentos y un análisis crítico de los mismos, así como una caracterización de la cuenca, una recopilación de los perfiles de geofísica existentes, la construcción de una base de datos de inventario de puntos de agua y de niveles de agua en pozos. En la Etapa II se ha desarrollado el análisis hidrogeológico e hidroquímico de las aguas y salmueras de la cuenca y, finalmente, se estableció el funcionamiento hidrogeológico y el balance hídrico. En la última etapa de trabajo, la Etapa III, se ha construido el modelo conceptual propuesto en una plataforma 3D, mediante el *software Leapfrog* y ha presentado la discusión de los resultados.

Asimismo, en el presente informe de **Etapa III** se ha llevado a cabo la integración en un informe consolidado de la revisión y recopilación de antecedentes realizada durante la Etapa I, del modelo hidrogeológico conceptual hidrogeológico correspondiente a la **cuenca hidrogeológica Salar de Maricunga** de la Etapa II y, finalmente, de la Etapa III se ha incluido además la construcción del modelo Leapfrog 3D y de la integración de la información en un proyecto GIS.

El área de estudio se compone por la cuenca Salar de Maricunga y de Piedra Pómez y presenta una extensión de 3.125 km^2.

- La cuenca del Salar de Maricunga tiene una superficie de 2.209 km^2. Se ubica al sur de la cuenca del Salar de Pedernales y al este de la cuenca del río Copiapó. El salar se encuentra situado en la parte norte de la cuenca, presenta un ancho aproximado de 10 km en su sector

norte, se estrecha abruptamente hacia el sur y su superficie aproximada alcanza los 146 km^2. Las quebradas más relevantes de la cuenca son las siguientes: quebrada La Coipa, Pastillos y Ciénaga Redonda, y el río Lamas. Estos cauces infiltran en el llano de Ciénaga Redonda.

- La cuenca de Piedra Pómez se encuentra al este de la cuenca del Salar de Maricunga. No presenta salar ni laguna y sus caudales superficiales se infiltran para luego fluir de forma subterránea hacia sus cuencas vecinas. Las quebradas Nevados del Juncalito y Piedra Pómez son las más importantes de la cuenca.
- El Salar de Maricunga corresponde a un ambiente de deposición salino que se destaca, principalmente, por la presencia de capas de minerales salinos (esencialmente halita) con intercalaciones, a diferente escala, de arcillas. Se encuentra emplazado al norte de la cuenca homónima, formando una depresión de forma elipsoidal de 146 km^2. El salar, que presenta una forma asimétrica característica, determinada por la tectónica de la región, se encuentra rodeado por rocas volcánicas del Mioceno y Cenozoico, emplazadas al oeste y sudoeste, y por depósitos no consolidados del Cuaternario, distribuidos en valles y depresiones colindantes.

El acuífero identificado en la zona de estudio se encuentra constituido, fundamentalmente, por materiales detríticos de las formaciones aluviales cuaternarias y los niveles evaporíticos con porosidad secundaria del centro del salar. Entre los dos tipos de formaciones existe una marcada continuidad hidráulica de los niveles piezométricos.

Las isopiezas reflejan, en gran medida, la superficie topográfica; los puntos con mayor potencial hidráulico se encuentran en las zonas más elevadas de la cuenca, disminuyendo a medida que la superficie alcanza cotas más bajas. De esta manera, se producen dos flujos principales que convergen hacia la cuenca hidrográfica Salar de Maricunga. El primero de ellos, el de la cuenca de Piedra Pómez, alimenta el valle homónimo con un flujo subterráneo de dirección NE-SW, descargando en las fuentes del río Lamas. A su vez, el flujo de Ciénaga Redonda alimenta los materiales aluviales en dirección S-N. Estos dos flujos desembocan en los sedimentos aluviales del Salar de Maricunga, que representa el punto topográfico más deprimido de la zona de estudio.

La recarga de la cuenca se produce, esencialmente, a causa de las aguas de deshielo. Las principales zonas de acumulación de nieve corresponden a los puntos más elevados de la zona, es decir, las elevaciones que delimitan la cuenca. Cabe señalar que también se produce recarga en forma de precipitación liquida en los puntos más deprimidos topográficamente. El ciclo finaliza con la descarga de las aguas en la misma zona del salar.

Del análisis de la hidroquímica e isotopia es posible verificar y corroborar las direcciones de flujo estimadas mediante la piezometría. A partir de la circulacion e interacción del agua con las distintas litologías presentes, es posible advertir un aumento en la concentración de sólidos disueltos del agua desde las partes más altas de la cuenca hasta las zonas más deprimidas.

Las aguas de los sectores Ciénaga Redonda, Río Lamas-Tres Cruces y Cordillera de Claudio Gay, descargan en el sector del Salar de Maricunga. Las evidencias hidroquímicas corresponden a las elevadas conductividades (>250.000 µS/cm) y al alto enriquecimiento de isótopos pesados en las aguas del salar, indicando que los procesos predominantes en esta zona son de evaporación desde una superficie libre, reconcentración mineral y el consecuente enriquecimiento de isótopos pesados en las aguas remanentes. Adicionalmente, no es de extrañar que en el mismo salar se encuentren las mayores concentraciones de Li, B, K y Mg.

Las facies hidroquimicas de las aguas son diversas según su ubicación geográfica. Sin embargo, es posible advertir que, independiente de su facie inicial, todas las aguas evolucionan al tipo cloruradas sódicas a lo largo de su línea de flujo.

Cabe destacar una posible conexión química entre el sector Piedra Pómez con el de Río Lamas – Llano de Tres Cruces, sugiriendo una línea de flujo continua entre estas dos zonas.

En cuanto a la Laguna Santa Rosa, ésta representa un sistema de mayor complejidad que el mismo salar. Se observan conductividades menores y pH's ligeramente más básicos que en el salar, apuntando a un comportamiento diferenciado, el que recibe aportes de variados tipos de agua asociados a distintos orígenes (quebrada La Coipa, Pastillos y zona sur del Llano Ciénaga Redonda).

A lo largo del estudio desarrollado han surgido una serie de recomendaciones que se han concretado y detallado en el capítulo 15 y que tienen como finalidad arrojar información en las zonas con mayor incertidumbre y mejorar el modelo hidrogeológico conceptual.

1. Introducción

El Salar de Atacama (II Región de Antofagasta), Salar de Maricunga y Salar de Pedernales (III Región de Atacama) se caracterizan por presentar un significativo potencial de litio, potasio y boro, metales que son de interés económico. Estos minerales se encuentran disueltos en la salmuera que está contenida en los depósitos salinos de dichos salares.

Actualmente, la explotación a nivel nacional de estos minerales se realiza únicamente en el Salar de Atacama, que dispone de las mayores reservas de litio. Sin embargo, los salares de Maricunga y Pedernales podrían presentar reservas y concentraciones competitivas en el mercado actual. En Chile, la explotación de los metales anteriores se efectúa mediante pozos de extracción de salmuera.

Generalmente, los salares están asociados a ecosistemas protegidos y pueden estar relacionados o en las proximidades de sistemas lagunares, donde existe fauna y flora de interés ecológico.

Teniendo en cuenta lo anterior es necesario desarrollar una explotación sustentable con el medio ambiente y para ello se debe conocer el funcionamiento hidrogeológico a nivel de cuenca (relaciones agua superficial-agua subterránea, recarga, conexión entre acuíferos y cuencas anexas, etc.). La integración de todas las variables que intervienen en un sistema acuífero permite establecer una gestión eficiente y sustentable de los recursos hídricos.

A partir de los antecedentes anteriores, el Comité de Minería No Metálica (CMNM), dependiente de CORFO, ha solicitado a Amphos 21 Consulting Chile Ltda (en adelante Amphos 21) el estudio del modelo conceptual del funcionamiento hidrogeológico de las cuencas de los salares de Atacama, Maricunga y Pedernales.

El proyecto, titulado, “Estudio de modelos hidrogeológicos conceptuales integrados para los salares de Atacama, Maricunga y Pedernales”, se divide en tres etapas (Etapa I, II y III). En la Etapa I se desarrolló una revisión de los documentos y un análisis crítico de los mismos, así como una caracterización de la cuenca, una recopilación de los perfiles de geofísica existentes, la construcción de una base de datos de inventario de puntos de agua y de niveles de agua en pozos. Durante la Etapa II se desarrolló el análisis hidrogeológico e hidroquímico de las aguas y salmueras de la cuenca y, finalmente, se estableció el funcionamiento hidrogeológico y un balance hídrico. En la última etapa de trabajo, la Etapa III, se ha construido el modelo conceptual propuesto en una plataforma 3D, mediante el *software Leapfrog* y la discusión de los resultados.

En el presente informe de **Etapa III** se ha llevado a cabo la integración en un informe consolidado de la revisión y recopilación de antecedentes realizada durante la Etapa I, del modelo hidrogeológico conceptual hidrogeológico correspondiente a la **cuenca hidrogeológica Salar de Maricunga** de la Etapa II y, finalmente, de la Etapa III se ha incluido, además, la construcción del modelo Leapfrog 3D y de la integración de la información en un proyecto SIG.

1.1 Objetivos

El objetivo general del proyecto consiste en la recopilación de todos los antecedentes existentes de las cuencas Salar de Maricunga-Piedra Pómez (las dos cuencas hidrográficas que conforman la zona de estudio denominada cuenca Salar de Maricunga según las bases técnicas del presente proyecto) con el fin de conformar un modelo hidrogeológico integrado para poder determinar y diseñar la manera más sustentable de obtener el recurso hídrico de la zona.

Esta información será principalmente de tipo hidrográfica, geológica, geofísica, hidrogeológico, hidroquímica e isotópica, de manera que se pueda obtener un modelo conceptual a partir del cual se puedan realizar futuros modelos de simulación numérica

Para cumplir con el objetivo general ha sido necesario desarrollar diversos objetivos específicos, que se enumeran a continuación:

- Revisión y el análisis de antecedentes disponibles, relevantes para este estudio.
- Elaboración de un catastro de puntos en la zona de estudio (levantamiento de bases de datos).
- Análisis de los datos hidrometeorológicos existentes en las zonas de trabajo, para alcanzar un mayor grado de precisión en la evaluación hidrológica. A partir de esto, se podrá progresar en la exactitud de la evaluación de los recursos hídricos existentes en la zona.
- Mejora del conocimiento geológico e hidrogeológico de la zona, a partir de la interpretación de perfiles geofísicos, que conllevará la mejora del conocimiento del funcionamiento conceptual de la cuenca, sistematizándola mediante software 3D y archivos SIG.
- Definición de las Unidades Hidrogeológicas presentes en la cuenca, e identificación de los acuíferos existentes, detallando sus límites, geometría, áreas de recarga y descarga y parámetros hidráulicos.
- Elaboración de la superficie piezométrica y del funcionamiento hidrogeológico de las aguas subterráneas en la cuenca.
- Análisis e interpretación de la hidroquímica de los cuerpos de agua superficiales y subterráneos, en base a los antecedentes disponibles y a los nuevos datos obtenidos durante los trabajos de terreno.
- Estimación del balance hídrico de la cuenca.
- Evaluación de posibles plataformas de software de modelación numérica a partir de las cuales se puedan realizar simulaciones en condiciones de variabilidad de densidad en fluidos.
- Diagnostico o estimación del contenido potencial en litio que posee la cuenca.
- Especificar si existen brechas de información en alguna área temática. Dar recomendaciones de estudios y/o investigaciones necesarias para fortalecer el modelo conceptual.

1.2 Situación Geográfica

El área objeto de estudio corresponde a la cuenca Salar de Maricunga. Se encuentra localizado a 160 kilómetros al noreste de Copiapó, camino al paso fronterizo de San Francisco (Figura 1-1).

El área de estudio se encuadra, aproximadamente, entre las siguientes coordenadas en DATUM WGS84:

- Límite Norte 7.040.000
- Límite Sur 6.960.000
- Límite Este 536.000
- Límite Oeste 480.000

La ruta más directa de acceso corresponde al acceso desde la ciudad de Copiapó por la quebrada de Paipote, a través de la Ruta Internacional N31. Este acceso es directo y se puede llegar de manera fácil al norte del salar. Otra segunda opción corresponde a la nueva Carretera Internacional N177, que une Diego de Almagro con el Salar de Maricunga.

La cuenca del Salar de Maricunga corresponde a una cuenca intramontañosa (depresión preandina), en el borde occidental del Altiplano-Puna. La conforman las cuencas hidrográficas Salar de Maricunga al oeste y Piedra Pómez al este.

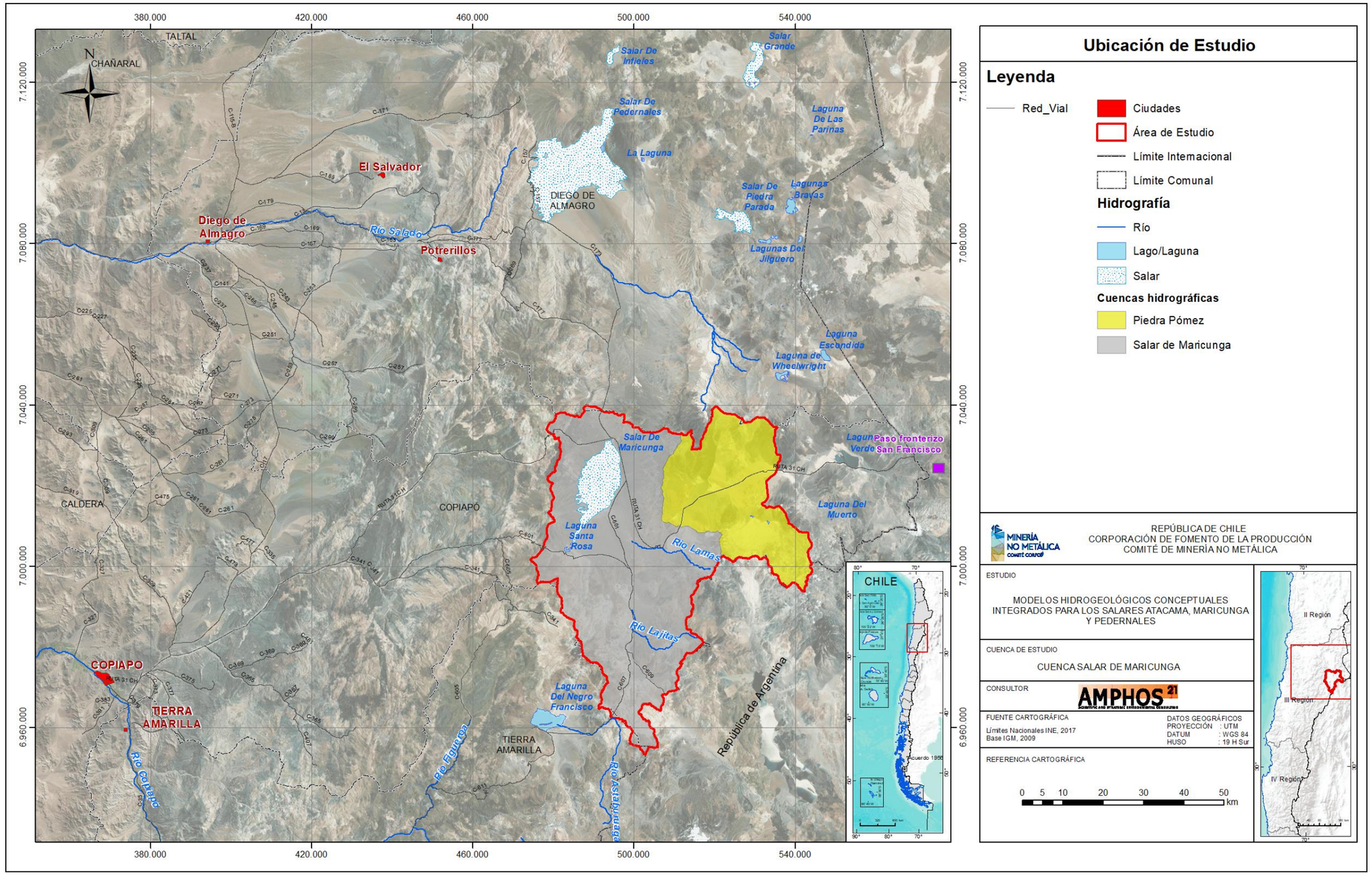


Figura 1-1: Ubicación de la cuenca Salar de Maricunga.

Fuente: elaboración propia.

1.3 Metodología de trabajo

En este capítulo se detalla la metodología utilizada para llevar a cabo la recopilación, revisión y análisis de la información, la construcción de las bases de datos de inventario de puntos de agua y niveles de agua, así como la caracterización de la cuenca y la geometría de los acuíferos.

1.3.1 Recopilación y análisis de antecedentes

Los antecedentes que se han consultado se han inventariado y codificado en una base de datos de antecedentes (Informe de Etapa I).

Además, se han seleccionado, al menos, los 5 documentos más relevantes de cada área temática, materias necesarias para construir el modelo conceptual hidrogeológico. De cada documento se detalla el número de registros, datos, perfiles geológicos, etc. que contiene, así como si éstos corresponden a datos nuevos o existentes y la calidad de la información.

Toda la información ha sido georreferenciada e integrada en un Sistema de Información Geográfica (SIG), que se ha completado a lo largo del desarrollo del presente proyecto y que será entregado en el presente informe de Etapa III.

1.3.1.1 Base de datos de antecedentes

La base de datos de Antecedentes se ha construido en formato Excel y se han incluido en ella todos los documentos consultados. El objetivo de la base de datos es acceder de forma rápida y eficaz a la información principal que contiene cada documento inventariado.

Para identificar el documento y el registro de éste en la base de datos, se han codificado todos los archivos con una letra inicial “M” de Maricunga, seguida de una numeración correlativa (A_REF.001; A_REF.002, etc.).

La estructura de la base de datos, es decir, los campos que contiene son los siguientes:

- **ID_REF.000:** referencia de identificación de cada uno de los estudios.
- **Tipo de información:** información que contiene el documento referente a geología, hidrogeología, meteorología, etc.
- **Tipo de estudio:** clasificación del documento en función de si se trata de un **expediente**, un mapa, los anexos específicos pertenecientes a un informe, un trabajo de tesis universitaria, si es un archivo correspondiente a una base de datos, un artículo de investigación, un documento presentado para una DIA (Declaración de Impacto Ambiental), una EIA (Evaluación de Impacto Ambiental) o una RCA (Resolución de Calificación de Impacto Ambiental).
- **Título:** título del proyecto.
- **Año:** año de publicación del trabajo.

- **Elaborado por:** indica la entidad (empresa, institución, compañía, consultora) que realizó el estudio.
- **Autor(es):** personas que realizaron el proyecto o empresa mandante.
- **Link de descarga:** ruta de internet para encontrar el archivo vía online, en caso de que exista.
- **Alcance geográfico:** indica el ámbito geográfico que abarca el estudio (nacional, inter-regional, regional o de cuenca).
- **Región:** indica la región en donde se emplaza el proyecto del informe consultado.
- **Provincia:** indica la provincia en donde se ubica la zona de estudio del proyecto.
- **Cuenca:** indica la cuenca en donde se emplaza la zona de estudio del proyecto.
- **Cuenca hidrográfica:** indica la cuenca hidrográfica en donde se emplaza la zona de estudio del proyecto.
- **Otro:** esta casilla se rellena en el caso de que el área del proyecto abarque más de una región o más de una cuenca, etc. De esta forma, se describe tal referencia.
- **Observaciones:** en esta columna se indica cualquier otra información relevante para el proyecto, que no se pueda incluir en ninguno de los puntos anteriores.
- **Tipo de antecedentes:** esta casilla se rellena si el documento trata de alguno de los 5 temas que se especifican a continuación.

    1) Criterios de definición de acuíferos;

    2) sustentabilidad de acuíferos;

    3) potencial de litio,

    4) caracterización hidrogeológica de acuíferos; y finalmente,

    5) uso actual y proyectado del recurso subterráneo.

- **Objetivo de la información:** objetivo del proyecto o del documento.
- **Resultados de interés:** información de interés que se extrae del documento y es útil para el presente trabajo.
- **Nombre del documento:** nombre del archivo digital que se ha consultado.

1.3.1.2 Áreas temáticas

Se han definido 10 áreas temáticas con el objetivo de facilitar el análisis de cada una de las materias que integra el modelo conceptual hidrogeológico. De esta manera, las referencias se han integrado, en función de la información que presenta, en cada una de las áreas temáticas. Es posible que una misma

referencia se encuentre detallada en más de un área temática. Cabe destacar, que en cada área temática y para cada documento se describe y analizan los aspectos más relevantes que contiene, según la metodología del punto 1.3.1.4 del presente informe.

La descripción de las áreas temáticas se explica a continuación:

- **Geología Regional y Local:** información geológica regional y local presentada en las cartas geológicas, artículos de investigación, informes, etc.
- **Geomorfología:** antecedentes relacionados con la descripción del relieve de las diferentes cuencas y/o áreas donde existen humedales, bofedales y/o ecosistemas de interés ambiental.
- **Meteorología:** estudios climatológicos que contienen el análisis de variables meteorológicas como el viento (direcciones predominantes, velocidad, etc.), la precipitación (caracterización espacial y/o temporal de las series de precipitación), temperatura atmosférica, radiación solar, insolación, presión atmosférica, evaporación, sublimación y/o humedad.
- **Hidrología:** estudios que contienen el análisis integrado de las componentes que intervienen en el balance hidrometeorológico; es decir, contempla la interacción de las variables atmosféricas (precipitación, evaporación, evapotranspiración), con los flujos superficiales (aforos en ríos), datos de la altura de la lámina de agua en lagos, embalses y/o lagunas, etc. Por lo tanto, en esta área temática se incluyen estudios que determinan valores de infiltración o recarga.
- **Geofísica:** documentos que incluyen el análisis de datos y perfiles geofísicos obtenidos por diferentes métodos (TEM, NanoTEM, Tomografía eléctrica, gravimetría, símica, etc.).
- **Hidrogeología:** antecedentes que contengan un análisis de parámetros hidráulicos de los acuíferos y/o unidades hidrogeológicas en estudio (transmisividad, coeficiente de almacenamiento, radios de influencia, permeabilidad). Además, se incluyen en esta área temática los documentos relacionados con direcciones de flujo subterráneo, zonas de recarga, zonas de descarga, isopiezas, geometría de los acuíferos y/o unidades hidrogeológicas, etc. Además, se incluyen los documentos que contengan datos de extracciones de agua subterránea mediante pozos, drenajes subterráneos u otros (derechos de agua) y explotación minera de aguas subterráneas (pozos de extracción de salmuera para producción de sales de interés económico).
- **Hidrogeoquímica:** incluye estudios que contengan un análisis de componentes mayoritarios y/o minoritarios del agua subterránea y superficial de las diferentes cuencas y también, estudios de investigación relacionados con el origen de las aguas y mezcla e interacción agua-roca.
- **Isótopos:** documentos que estudien las características isotópicas de las aguas subterráneas y superficiales para establecer la procedencia de las mismas, mezclas e interacción agua-roca.

- **Balance hídrico:** documentos que caracterizan y determinan las entradas y salidas de aguas de los sistemas acuífero.
- **Modelos numéricos:** archivos e informes de modelización numérica realizados en la cuenca o en zonas específicas de ésta.

1.3.1.3 Fichas técnicas de documentos

En la ficha técnica de cada documento se especifica, de forma concisa, los aspectos relevantes de cada una de las referencias estudiadas. Cabe tener en cuenta que en la ficha se incluye la misma información que en la base de datos de antecedentes y que existe una ficha para cada documento consultado. Las fichas técnicas se encuentran en formato digital en los anexos del informe de Etapa III.

1.3.1.4 Análisis y valoración de la información

La valoración de los antecedentes se ha realizado por área temática con el objetivo de determinar si de cada una de ellas se dispone de suficiente información para establecer las bases del modelo conceptual hidrogeológico.

El análisis crítico y la valoración de los documentos se estructuran de la siguiente forma:

1. Se enumeran los antecedentes más relevantes de cada área temática y se especifica la información que contiene cada documento según los apartados siguientes:
   - Número de registros de puntos de agua, pozos o sondajes con columnas estratigráficas que contiene el documento, cantidad de perfiles geofísicos y método utilizado en éstos. En referencia a la hidrogeología, se determinará la cantidad de pozos con ensayos de bombeo y si de éstos se describen los parámetros hidráulicos. Además, en el análisis de los documentos hidrológicos se establecerá el número de estaciones meteorológicas, lisímetros, domos, etc.
   - Calidad de la información: si el mapeo de las columnas estratigráficas es de detalle y útil para una caracterización hidrogeológica; si los puntos de agua presentan coordenadas de ubicación, información de nivel y/o si los registros de hidroquímica contienen un análisis, al menos, de los componentes mayoritarios para poder realizar un balance iónico y posteriormente diagramas hidriquímicos. En referencia a la meteorología y la hidrología, se especificará si la cantidad de estaciones meteorológicas, lisímetros, domos y estaciones fluviométricas, etc. son suficientes como para realizar un análisis espacial de las variables. El balance hídrico contemplado en los antecedentes se ha revisado, de forma preliminar, teniendo en cuenta el valor de las entradas y salidas. Respecto a la calidad de los modelos numéricos se revisará si estos son coherentes con el modelo conceptual y si las simulaciones y los escenarios que presentan pueden ser útiles para el presente proyecto. La evaluación de la calidad de la información se ha clasificado en “Buena”, o “Regular” teniendo en cuenta los criterios anteriores.

- Datos existentes o nuevos: en el caso de que la información de los puntos de agua o registros se hayan monitoreado por primera vez en el estudio, es decir, que no existen registros con anterioridad o se trata de nuevas estaciones de medición (lisímetros, estaciones meteorológicas, etc.), se especifica que los datos son “Nuevos”. En caso contrario, si la información corresponde a pozos que ya han sido monitoreados en trabajos anteriores o utilizan antecedentes de otros trabajos para hacer el estudio y también, si las estaciones meteorológicas con registros históricos se, los datos son “Existentes”.

2. Se ha realizado una valoración general por cada área temática y se concluye si la información es suficiente y se indica el grado de relevancia para el estudio, que puede ser Alta, Moderada o Baja. Los documentos de baja importancia no se incluyen en dicho documento, sino que están enumerados en la base de datos de antecedentes.

Finalmente, en las conclusiones del presente informe se determina si los estudios de antecedentes son suficientes para construir el modelo conceptual hidrogeológico del sistema, si la calidad de los mismos es aceptable y si existen o no brechas de información. Además, en las recomendaciones se especificarán potenciales estudios de carácter multidisciplinar que sirvan para complementar los trabajos existentes, con el objetivo de robustecer el modelo.

1.3.1.5 Sistema de Información Geográfica (SIG)

Amphos 21 ha elaborado un proyecto (SIG) a partir de información georreferenciada de antecedentes. El proyecto SIG, entregado en la presente Etapa III, contiene la siguiente estructura:

- **Base Cartográfica:** poblados, ciudades, límites administrativos, redes viales y cuerpos de agua. Perfiles de elevación del terreno y bases topográficas.
- **Puntos de agua:** catastro de puntos de agua en la zona, pozos y piezómetros.
- **Derechos de agua:** ubicación de las concesiones de derechos de aguas subterráneas y aguas superficiales constituidos y en trámite.
- **Hidrología:** red hidrográfica de las cuencas, estaciones meteorológicas, fluviométricas, pluviométricas, evaporimétricas y de temperatura.
- **Geofísica:** trazas de perfiles geofísicos con el año, el método y la empresa que realizó el perfil.
- **Geología Regional y Local:** mapas con información geológica y estructural.
- **Hidrogeología:** mapas hidrogeológicos, distribución espacial de los parámetros hidráulicos de los acuíferos y polígonos de delimitación de acuíferos.

- **Hidroquímica:** ubicación de puntos de muestreo de calidad de las aguas tanto superficiales como subterráneas, mapas con diagramas de Piper y mapas de distribución espacial de los parámetros químicos.
- **Modelos numéricos:** polígonos de delimitación de áreas de modelación numérica.
- **Sitios de protección ambiental:** polígonos que delimitan las reservas naturales, sitios RAMSAR, etc.
- **Sectores de explotación de acuíferos:** polígonos de las propiedades mineras que explotan los acuíferos salinos de los salares.

1.3.2 Catastro de puntos

A partir de la revisión y análisis de antecedentes se ha extraído la información necesaria para completar el catastro de puntos existentes en la zona de estudio (Figura 1-2), los cuales suman un total de 392. El inventario corresponde principalmente a punto de a agua tanto superficiales como subterráneas. En el caso de las aguas subterráneas se han tenido en cuenta pozos-piezómetros de observación/exploración, pozos de producción, drenes y calicatas mientras que las aguas superficiales corresponden a puntos ubicados en ríos, lagunas u otros.

El inventario de puntos de agua de la cuenca se ha integrado en una base de datos que contiene los siguientes campos de información:

- **Nombre del punto:** nombre del punto, registro común en todas las bases de datos.
- **Otro nombre:** cualquier otra toponimia referente a estudios anteriores.
- **Coordenadas UTM (X, Y)** y *datum* original
- **Elevación (m s.n.m.):** Elevación del punto indicada en el estudio de antecedentes origen.
- **Elevación (m s.n.m.)_DEM:** Elevación del punto calculada a partir de un *"Digital Elevation Model (DEM)".*
- **Cuenca hidrográfica:** área de estudio que engloba Salar de Maricunga o Piedra Pómez.
- **Tipo de punto y Subtipo de punto:** si corresponde a agua superficial o subterránea y a qué subtipo de punto hace referencia (Pozo, calicata, etc).
- **Descripción original:** Hace referencia a la descripción que se hace del punto en el estudio origen.
- **Propietario:** se indica a quién pertenece el pozo.
- **Año de construcción:** fecha en la que se construye el pozo, piezómetro, calicata o dren.
- **Derecho de agua:** si es un pozo y tiene derecho de agua otorgado se especifica su código.

- **Caudal anual:** Se especifica el caudal anual promedio que se explota en un punto de agua en concreto.
- **Profundidad:** Profundidad del pozo.
- **Inclinación:** Inclinación del pozo.
- **Documento de referencia (P_REF.000)**: nombra con una nomenclatura específica el estudio referenciado en los antecedentes del cual se ha adquirido la información del punto. Es posible que para un mismo punto exista más de una referencia.

A demás, se han incorporado unas columnas en las que se especifica con un “SI” o “NO” si ese punto contiene información relacionada con: columnas litológicas, habilitación, medición del nivel de agua, ensayos hidroquímicos e isotópicos, constantes elásticas (K, T y S) y perfilaje del pozo.

Asimismo, si el pozo presenta **perfilaje de pozo** se indican qué tipo (*caliper, gamma natural*, neutrón, *gamma density*, conductividad eléctrica, temperatura, conductividad mediante inducción electromagnética). De la misma forma, si el existen registros de ensayos hidráulicos en el pozo, se indica qué **tipo de ensayo hidráulico** es, teniendo en cuenta el de mayor relevancia. En orden de mayor a menor relevancia se consideran los siguientes ensayos hidráulicos: pruebas de bombeo con pozos de observación, ensayos de bombeo, pruebas *lugeon, lefranc* o similar y finalmente pruebas de *Air lift.* Además, se incluye la **fecha de realización** del ensayo.

Esta base de datos puede encontrarse en formato digital en el Anexo I.

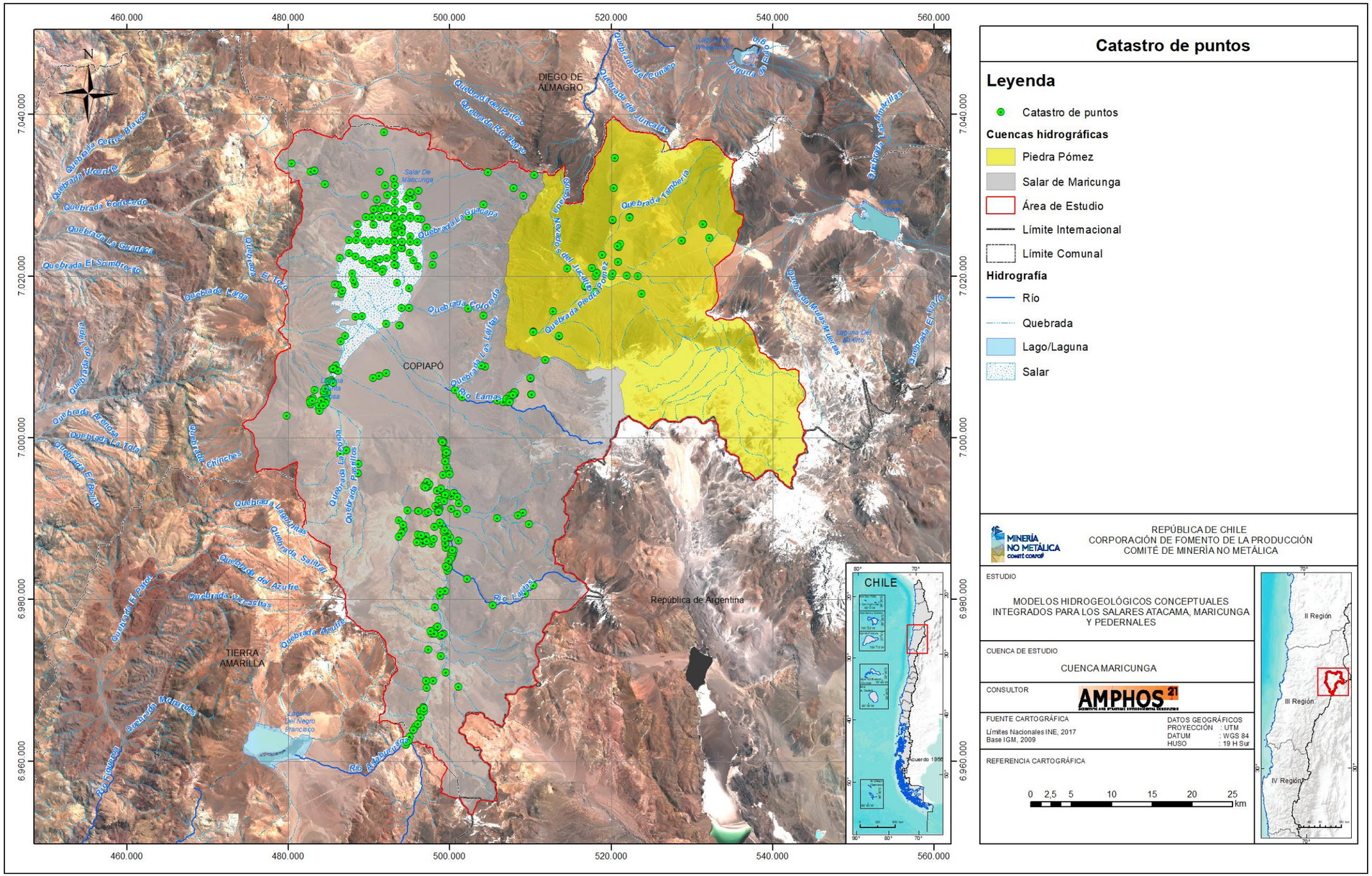


Figura 1-2. Mapa de la zona de estudio con la representación de los puntos que componen el catastro.
Fuente: elaboración propia.

1.3.3 Caracterización hidrológica y geológica de la cuenca

La caracterización hidrográfica, hidrológica, morfológica y geológica de la cuenca se ha llevado a cabo mediante el análisis de los antecedentes y el aporte de Amphos 21 en el presente proyecto.

Los parámetros morfológicos de las cuencas, así como la generación de cuencas y dominios y la delimitación de éstas, se han obtenido a partir del modelo de elevación Alos Palsar (con fecha 24-12-2010) de la agencia japonesa exploración aeroespacial con resolución de 12.5 x 12.5 m por pixel, el cual es de acceso público y cubre la totalidad del área de estudio. El modelo de elevación digital se analiza con herramientas de integración espacial en los Sistemas de Información Geográfica (SIG) tales como Hydrology, Surface, Zonal Statistics, Extraction y Raster dataset y manejo de algoritmos watershed delimitation disponibles en ArcGIS 10.3.

El análisis hidrológico se ha desarrollado en base a una recopilación y análisis de la estadística de precipitación, caudal y evaporación de tanque. Se presenta la disponibilidad de la estadística y posteriormente se calculan los estadígrafos principales de la precipitación, junto a las series de tiempo en estaciones pluviométricas representativas del área de estudio. Además, se presenta una relación entre la precipitación media anual y la altura de las estaciones, a fin de caracterizar la distribución espacial de la misma. Posteriormente se estima la precipitación sobre cada cuenca a partir de curvas isoyetas y la relación entre la precipitación media anual y altura de las estaciones. Se presentan las curvas de variación de caudales y las series de evaporación media mensual en estaciones cercanas al área de estudio, las que en conjunto con una curva regional permiten validar mediciones de evaporación realizadas en el salar de forma puntual.

La geología se ha descrito a partir de cartas geológicas en los que se incluyen mapas geológicos, columnas estratigráficas y artículos de investigación.

1.3.4 Análisis hidrogeológico

Primeramente, se realizó una recopilación de constantes elásticas procedentes de ensayos de bombeo y de mediciones históricas del nivel freático. Para compilar toda esta información se realizaron dos bases de datos:

- Base de datos de niveles: Cada punto contiene su localización en un datum común, su elevación original y una elevación calculada a partir de un *Modelo Digital del Terreno*. Contiene niveles freáticos y cotas piezométricas medidos en pozos, piezómetros y calicatas con su fecha de medición respectiva. En ocasiones, cuando se dispone de la altura del brocal se ha realizado el recálculo del nivel freático teniendo en cuenta este factor. Adicionalmente, se indica la información que ha sido recopilada del antecedente referencia y la que ha calculado Amphos 21. En cada punto se especifica de qué referencia origen se ha recopilado la información (Anexo I).

Con la información de niveles, se pretende observar si ha habido una evolución temporal en el nivel acuífero de la zona de estudio, y por tanto, una variación del almacenamiento. Por ello se realizó un mapa piezométrico y una valoración temporal de los niveles freáticos.

- Base de datos de parámetros hidráulicos: Cada punto contiene su localización en un datum común, su elevación original y una elevación calculada a partir de un *Digital Elevation Model (DEM)*. La base de datos contiene datos de permeabilidad hidráulica (K), Transmisividad (T) y coeficiente de almacenamiento (S). Además, se especifica qué tipo de ensayo se realizó (Prueba de bombeo, prueba de bombeo con pozo de observación, etc), su fecha y el método utilizado para la interpretación de los ensayos (Theis, Hantush, etc). En cada punto se especifica de qué referencia origen se ha recopilado la información.
- Una vez compilados los parámetros hidráulicos y la geología, se procedió a la caracterización de las unidades hidrogeológicas. Adicionalmente, se realizó un mapa hidrogeológico y cortes hidrogeológicos conceptuales para observar la dimensión en planta y en profundidad de estas unidades.
- La geometría de los acuíferos se ha construido a partir de perfiles geológicos e información geofísica. Para ello se ha elaborado un capítulo de geología, donde se detalla la geología regional, la geología a nivel de cuenca, las estructuras geológicas más importantes (fallas, cabalgamientos, etc.) y descripciones estratigráficas a partir de las columnas litológicas identificadas.

  El análisis de la geofísica se ha realizado a partir de la georreferenciación de la traza de los perfiles de sísmica, TEM (Transiente Electro-Magnético), NanoTEM y MT (Magneto-Telúrico), así como las estaciones de estos tres últimos métodos geofísicos. De esta forma, se

  La información de geofísica georreferenciada se ha incorporado a una base de datos que contiene los siguientes campos:

  - **Nombre:** nombre del perfil.
  - **Empresa:** empresa o compañía que ejecuta los perfiles de geofísica y el tratamiento de los datos.
  - **Año** de publicación de los datos
  - **Método geofísico:** método de geofísica empleado
  - **Mandante:** institución o empresa que solicita el estudio geofísico
  - **Referencia**: código asociado en el presente proyecto.
  - **Old_name**: Nombre asociado al estudio de referencia.

- **Obs**: cualquier observación referente al perfil.
- **Long_calc**: indica la longitud del perfil en metros.
- **Sector**: indica el dominio al que pertenece el perfil (Maricunga o Piedra Pómez).

Además, se indica con "Si-No" si el perfil está disponible y si se encuentra georreferenciado.

1.3.5 Análisis hidroquímico e isotópico

La caracterización hidroquímica e isotópica de las aguas presentes en la zona de estudio, se realizó a partir de los antecedentes de estudio anteriores. Para ello se recopilaron y revisaron los antecedentes, y con éstos se generó una completa base de datos, en la cual se indica la ubicación del punto de monitoreo y el tipo de agua, además de la información hidroquímica y/o isotópica con la que cuente.

A continuación, se unificaron los nombres de los puntos que hubiesen sido monitoreados en más de un estudio y se estimó el balance iónico, lo que permitió validar la certidumbre de los datos.

Una vez definidas las analíticas válidas, se realizó una completa descripción de los isótopos y de los parámetros físico-químicos, además de los elementos mayoritarios y representativos de salares andinos, con el objetivo de determinar la existencia de variabilidad espacial y/o temporal de los parámetros, y con ello, determinar posibles orígenes de las aguas, zonas de mezcla, procesos y zonificaciones que pudiesen aportar información al modelo hidrogeológico conceptual.

1.3.6 Elaboración del modelo hidrogeológico 3D (Leapfrog)

A continuación se presenta la metodología empleada para construir el modelo 3D. El modelo hidrogeológico 3D se ha construido en el software Leapfrog Hydro (v 2.7.2). La información que se ha incorporado en el software para construir los volúmenes (*inputs* del modelo), es la siguiente:

- Mapa geológico y estructural digitalizado por Amphos 21 para el presente proyecto (Anexo II-01 y Anexo VII) (formato .shp)
- Mapa hidrogeológico de superficie realizado por Amphos 21 para el presente proyecto (Anexo III y Anexo VII) (formato .shp)
- 125 columnas litológicas de pozos. La litología de las columnas se ha transcrito y se ha integrado en una base de datos Excel para posteriormente ser incorporado al Leapfrog. En el Anexo I-02 se presenta la base de datos, en el Anexo II-02 se incluyen las columnas litológicas disponibles y Anexo VI-01-02 se presenta la base de datos de input al modelo Leapfrog en formato .csv y .xls.
- 92 perfiles geofísicos de las referencias M_REF.018, M_REF.028, M_REF.029, M_REF.062, M_REF.066 (Anexo II-03 y Anexo VI-01-03) (formato .jpg y .pdf)

- Isopiezas realizadas por Amphos 21 para el presente informe (Anexo VII) (formato .shp).
- y Aster Global DEM de resolución 30 x 30 m (https://gdex.cr.usgs.gov/gdex/) (Anexo VI-01-04) (formato raster).

A partir de las columnas litológicas, perfiles geológicos y geofísicos, así como los mapas hidrogeológico y geológico, se determinaron de forma manual los puntos o zonas de contacto entre las distintas Unidades Hidrogeológicas. Dichos puntos son la base de interpolación con los que se han definido las superficies de contacto entre los volúmenes generados, además de los sondajes. Mediante este método se consigue una mejor precisión y coherencia en la definición de los volúmenes de estudio.

El método utilizado para la interpolación de los puntos de contacto corresponde a Radial Basis Functions (RBF) y las limitaciones de control que ingresa el modelador a la interpolación consisten en definir la secuencia de unidades hidrogeológicas y sus orientaciones y relación sedimentaria –erosión o depositación- o estructural –intrusión-.

El límite horizontal del modelo corresponde al límite de las cuencas hidrográficas, mientras que el límite vertical superior corresponde a la topografía del terreno. La resolución del modelo 3D es de 400 m.

Junto al modelo hidrogeológico 3D Leapfrog Hidro (Anexo VI), se entregan dos conjuntos de archivos:

- el archivo 'Viewer_Cuenca Salar de Maricunga' (Anexo VI-03-01) que se trata de una visualización del modelo en 3D. La plataforma para visualizarlo puede descargarse en el siguiente link: http://www.leapfrog3d.com/es/products/leapfrog-viewer/downloads.
- en la carpeta 'Modelo 3D para CAD' (Anexo Vi-03-02) se encuentran 4 archivos dxf, que corresponden a los 3 volúmenes modelados y a la superficie piezométrica, con los que se podrá trabajar en AutoCAD.

1.3.6.1 Fortalezas y debilidades en el uso delñ Leapfrog Hydro

Fortalezas

- Mediante Leapfrog es posible incorporar información al proyecto en una variedad de formatos (.jpg, .tiff, .shp, .dxf, .msh, etc.) y además, permite visualizar y analizar en 3D todos los datos en conjunto (datos geofísicos, litología de sondajes, mapas vectoriales de superficie, perfiles verticales en pozos, imágenes, superficies piezométricas, etc.)
- Es posible georeferenciar imágenes en el propio software, y exportarlas georeferenciadas.

- Las bases de datos que se utilizan de entrada de datos son validadas por el software mediante un QA/QC ágil, eficiente y además, Leapfrog permite extraer como producto una base de datos sin errores.
- Los datos de interpolación, que sirven para construir superficies y volúmenes, pueden corresponder a datos medidos o inferidos, éstos últimos se generan manualmente mediante interpretación geológica por el propio geólogo y se pueden ajustar a zonas conocidas mediante perfiles geofísicos o perfiles geológicos en formato imagen.
- Leapfrog es capaz de interpolar datos tipo punto, polilíneas, superficies, polígonos, raster. Lo anterior ofrece versatilidad en el uso y la integración de las diferentes fuentes.
- La creación de los volúmenes que constituyen el modelo 3D es relativamente rápida en función de las dimensiones, resolución del modelo y capacidades computacionales.
- La interfaz gráfica del software es ágil y presenta comandos de teclado de acceso rápido a las vistas. Permite realizar la interpretación de la información de forma espacial. Esto es especialmente ventajoso versus el trabajo realizado en dos dimensiones, donde se tiende a interpretación solo en dos dimensiones y sesgar la tercera.
- Una vez realizado el modelo, la generación de material visual para presentar es rápida y eficiente. Adicionalmente, el producto visual, imágenes, videos, etc. que se obtiene del modelo es de buena calidad.
- Existe la posibilidad de generar un proyecto para ser visualizado en Leapfrog Viewer, en el que se puede observar el modelo y los avances del proyecto.
- Mediante Leapfrog es posible exportar a otros formatos compatibles con MODFLOW, AutoCAD, Vulcan y otros softwares mineros.
- Su compatibilidad con MODFLOW permite exportar grillas para MODFLOW, junto a parámetros hidraúlicos, algunas condiciones iniciales. Adicionalmente, se pueden visualizar los resultados de un modelo en el software de forma tridimensional. Esto último, es una ventaja debido a que los programas de interfaz de usuario para MODFLOW como Groundwater Vistas y Visual MODFLOW, no son eficientes en esto.
- El software presenta un gran soporte por parte de la empresa proveedora y por parte de la comunidad. En el foro online existente se pueden resolver problemas en tiempos muy acotados.

Debilidades

- Leapfrog utiliza únicamente el método de interpolación Radial Basis Function, el cual es cercano a un Dual Krigging. Sería interesante modelar con otras tendencias estadísticas

como Krigging simple, inverso de la distancia o vecino más cercano, por ejemplo, para interpolar datos hidroquímicos.

- Dado que es un programa de código comercial, no es posible modificar parámetros del código para conveniencia del modelador.
- Debido a la gran cantidad de información que se analiza gráficamente, es necesario contar con computadores gran capacidad de procesamiento en términos de procesador y gráficos.

1.3.6.2 Inventario de columnas litológicas

Para la construcción del modelo hidrogeológico conceptual se utilizaron las columnas litológicas y los nivel de agua medidos en una serie de pozos distribuidos a lo largo de la cuenca Salar de Maricunga. Esta información permitió definir distintos aspectos relacionados con geometría de la cuenca, sistema acuífero fracturado y no consolidado y superficie freática.

Dentro de la información relevante para la construcción del modelo, los sondajes juegan un rol primordial. Esto es así, ya que son un dato preciso de la ubicación de los contactos entre las distintas Unidades Hidrogeológicas. De esta manera, para la construcción del modelo se utilizó la información de litología y niveles de 125 sondajes de pozos. En la Tabla 1-1 se presenta la ubicación de estos.

Pozo	X_UTM	Y_UTM	Altitud m s.n.m	Profundidad pozo
ANDINA-1	500390	6985526	4060	130,0
ANDINA-2	500494	6986009	4055	86,0
ANDINA-3	500270	6985660	4060	96,0
ANDINA-4	500293	6985995	4056	97,0
CAN-6	497868	7021417	3781	120,0
CR-4	500129	6985577	4080	97,0
CRB-1	499942	6987554	4055	258,0
CRE-1	500030	6987642	4038	275,0
CRE-2	501012	6987218	4065	245,0
CRO-1	500142	6985377	4077	47,0
CRO-2	500087	6985044	4064	47,0
CRO-3	499917	6984589	4069	35,0
CRO-4	499650	6984028	4082	25,0
CRO-5	499685	6983522	4082	28,0
CRO-6	499391	6981035	4098	41,0
M-1	499373	6992947	3980	100,0
M-2	499472	6992921	4020	100,0
MAR-1	493553	7025908	3781	1,0

Pozo	X_UTM	Y_UTM	Altitud m s.n.m	Profundidad pozo
MAR-2	488284	7014961	3785	1,0
MAR-3	494017	7016014	3791	1,0
MAR-4	484748	7004723	3802	1,4
MDO-10	493814	7013898	3771	120,0
MDO-12	493020	7032053	3759	70,0
MDO-13	491965	7031233	3781	150,0
MDO-14	491309	7032922	3792	63,0
MDO-15	490947	7029481	3778	70,0
MDO-23	491246	7007668	3807	150,0
MDO-24	490466	7007348	3802	150,0
MDO-8	494966	7016016	3774	150,0
MDO-9	492113	7007953	3812	150,0
MWLR-1	510072	7005360	4402	111,0
MWLR-1A	510087	7005363	4402	256,0
MWLR-2A	509998	7007343	4375	250,0
MWLR-2B	510003	7007328	4376	138,0
MWLR-2D	509993	7007359	4375	216,0
MWLR-3	511784	7009586	4391	220,0
MWLR-4	513533	7012526	4397	74,0
MWLR-4A	513495	7012549	4395	210,0
P1	494040	7025900	3758	150,0
P2	494040	7023400	3758	150,0
PO-5	499758	6988128	4032	48,0
PO-6	498113	6978954	4138	30,0
PO-7	497957	6969918	4203	26,0
PO-8	495011	6963005	4277	20,0
PPB-1	520810	7021729	4423	220,0
PPB-10	522240	7027259	4426	300,0
PPB-12	528719	7024379	4523	300,0
PPB-14	531372	7026386	4526	303,7
PPB-18	532133	7024678	4557	292,0
PPB-19A	518203	7020353	4407	300,0
PPB-21	517955	7017980	4403	300,0
PPB-23	519980	7019945	4438	292,0
PPB-24	521924	7020016	4459	300,0
PPB-3	520886	7023584	4409	300,0
PPB-4	517570	7020974	4408	299,5

Pozo	X_UTM	Y_UTM	Altitud m s.n.m	Profundidad pozo
PPB-5	516765	7018691	4416	300,0
PPB-6	518860	7022574	4402	250,0
PPB-8	520143	7026901	4409	292,0
PPB-9	520276	7030845	4409	300,0
PPX-1	520795	7021712	4423	250,0
PPX-10	522225	7027242	4424	300,0
PPX-12	528687	7024366	4523	300,0
PPX-14	531351	7026430	4526	300,0
PPX-15 A	510325	7013044	4349	120,0
PPX-18	532113	7024691	4556	300,0
PPX-3	520777	7023711	4407	200,0
PPX-4	517551	7020956	4408	300,0
PPX-5	516758	7018725	4417	300,0
PPX-6	518833	7022617	4402	300,0
PPX-8	520125	7026931	4414	297,5
PPX-9	520286	7030845	4408	300,0
PTG-12A	496672	6986931	4195	242,3
PTG-13A	497044	6987773	4259	300,7
PTG-9A	496449	6987920	4234	260,6
RA-1	496397	6965398	4266	93,0
RA-2	495508	6963814	4284	52,0
RA-3	496781	6966112	4252	100,0
RPG-01	500292	6986068	4050	61,0
RPG-02	499511	6986376	4055	74,0
RPG-03	497703	6986817	4098	55,4
RPG-04A	499392	6986911	4051	85,5
RPG-04B	499403	6986910	4050	61,0
RPG-05B	499330	6987498	4042	86,5
RPG-06	497984	6987480	4091	73,7
RPG-07	497105	6987171	4117	49,0
RPG-08	499238	6988316	4032	92,2
RPG-09	498979	6989044	4024	80,0
RPG-10	498738	6989466	4017	81,0
RPG-11	498658	6991127	3995	18,0
RPG-12A	498414	6993389	4041	91,5
RPG-12B	498419	6993392	4040	24,0
RPG-13	497060	6993797	4206	99,0

Pozo	X_UTM	Y_UTM	Altitud m s.n.m	Profundidad pozo
RPG-14	498857	6993699	3999	134,0
RPG-15	499180	6995399	3992	61,0
RPG-16	499970	6995446	3954	21,3
RPG-17	500179	6992755	4004	55,0
RPG-18B	500499	6993115	3998	74,0
RPG-19	500880	6992641	4018	68,0
RPG-20	501136	6991837	4036	105,4
RPG-21	494532	6961973	4275	120,0
RPG-21C	494895	6962445	4279	96,0
RPG-22	496007	6964571	4257	91,0
RPG-23	499364	6992737	3981	50,0
RPG-24	499528	6993110	3977	46,2
RPG-25	499427	6992941	3979	50,0
RPG-26	499343	6998561	3927	74,0
RPG-27	499528	6998523	3928	110,0
RPG-28	499541	6998131	3931	95,8
RPG-29	499190	6999427	3940	94,0
RPG-30	499553	6998123	3931	106,0
RPG-31	496743	6966540	4237	16,0
RPG-32	494519	6961979	4275	60,0
RPG-33	499344	6988523	4027	80,0
RPG-34	496961	6993813	4230	134,8
RPG-35	498077	6988961	4056	133,0
RPG-37	495923	6987035	4336	183,5
RPG-38	494598	6962292	4277	80,0
RPG-39	498586	6992298	4019	96,8
RPG-40	502057	6991129	4068	156,0
RPG-41	500928	6990553	4041	117,0
RPG-42	500196	6991154	4020	95,0
RPG-43	499278	6992137	3986	54,0
RPG-44	498632	6990994	3997	41,0
RPG-45A	499404	6997100	3943	24,0
RPG-45B	499404	6997100	3943	94,6

Tabla 1-1: Inventario de columnas litológicas proyectadas en Leapfrog.

Fuente: elaboración propia.

1.3.6.3 Antecedentes Geofísicos

Para la realización de la geometría 3D, fue necesario tomar información de levantamientos geofísicos realizados anteriormente, se usaron 12 perfiles nanoTEM, 64 perfiles TEM y 16 perfiles gravimétricos (Tabla 1-2) (ver Capítulo 5.3 y Anexo II-03). Los perfiles TEM y gravimétricos son una buena herramienta para definir la morfología del basamento rocoso y el espesor de las Unidades Hidrogeológicas. Además, la interpretación de los perfiles puede ser calibrada con la información litológica procedente de los sondajes. A continuación se muestra una imagen del modelo con la localización de los perfiles geofísicos utilizados para la caracterización de la cuenca (Figura 1-3).

Perfiles geofísica	
REF.028	NT_L11
	NT_L12
	NT_L13
	NT_L15
	NT_L16
	NT_L24
	NT_L25
	NT_L26
	NT_L27
	NT_L10A
	NT_L10B
	TEM_L1
	TEM_L2
	TEM_L3
	TEM_L4
	TEM_L5
	TEM_L6
	TEM_L7
	TEM_L8
	TEM_L9
	TEM_L10
	TEM_L11
	TEM_L12
	TEM_L13
	TEM_L14
	TEM_L15
	TEM_L16
	TEM_L17
	TEM_L18
	TEM_L19
	TEM_L20
	TEM_L21
	TEM_L22
	TEM_L24
	TEM_L25
	TEM_L26
	TEM_L27
	TEM_L28
	TEM_L29
REF.029	TEM_1
	TEM_2
	TEM_3
	TEM_4
	TEM_5
	TEM_6
	TEM_7
REF.062	Grav_L1
	Grav_L2
	Grav_L3
	Grav_L4
	Grav_L5
	Grav_L6
	Grav_L7
	Grav_L8
	Grav_L9
	Grav_L1N
	NT-1
	TEM_LGBB-1
	TEM_LGBB-2
	TEM_LGPB-2
	TEM_LGPB-3
	TEM_LGPB-4
	TEM_LGPP-1
	TEM_LGPP-2
	TEM_LGPP-3
	TEM_LGRL-1
	TEM_LGRL-2
	TEM_LGRL-3
REF.065	Grav_P1
	Grav_P3
	Grav_P4
	Grav_P5
	Grav_P6
	Grav_P7
	M1_TEM
	M2_TEM
	M3_TEM
	M4_TEM
	M5_TEM
	M6_TEM
	M7_TEM
	TEM_P1
	TEM_P3
	TEM_P4
	TEM_P5
	TEM_P6
	TEM_P7
REF.067	TEM_LM1A
	TEM_LM1B
	TEM_LM2A
	TEM_LM2B
	TEM_LM2C

Tabla 1-2: Perfiles geofísicos usados para definir la geometría 3D

Fuente: elaboración propia.

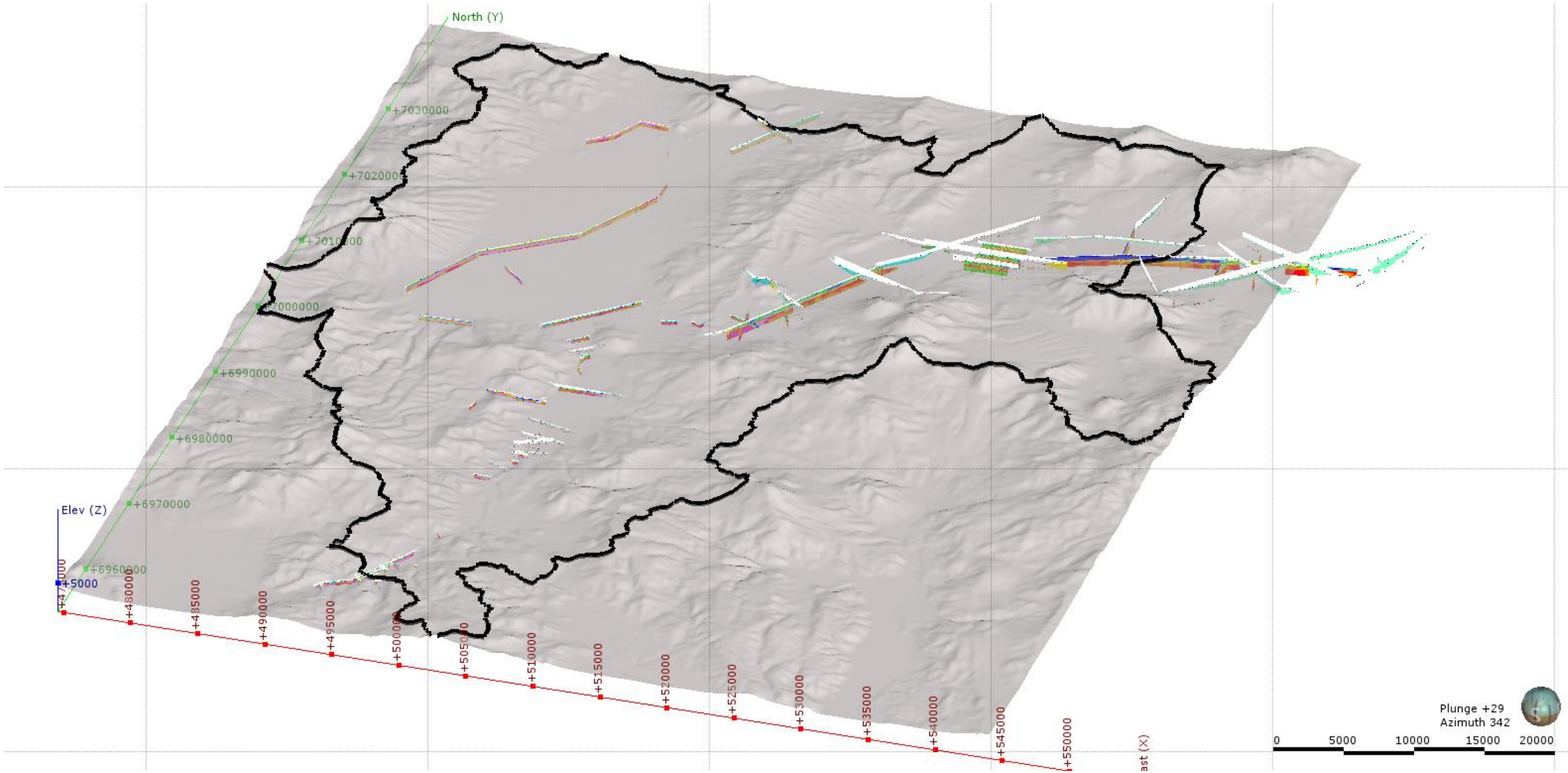


Figura 1-3. Perfiles geofísicos utilizados para la modelación. Exageración vertical de 6x.
Fuente: elaboración propia.

1.3.7 Integración de la información en un proyecto GIS

Además, para facilitar la comprensión de toda la información de interés disponible, se ha diseñado un proyecto GIS (Geographic Information System). La información se encuentra en formato vectorial y raster y se ha referenciado en coordenadas WGS84 Huso 19S (Anexo VII). El proyecto SIG finalizado y que se presenta en la presente Etapa III, contiene la siguiente estructura:

- **Puntos de agua:** catastro de puntos de agua en la zona, pozos y piezómetros.
- **Derechos de agua:** ubicación de las concesiones de derechos de aguas subterráneas y aguas superficiales constituidos y en trámite.
- **Hidrología:** red de drenaje de las cuencas hidrográficas, estaciones meteorológicas, fluviométricas, pluviomérticas, evaporimétricas y de temperatura.
- **Geofísica:** trazas de perfiles geofísicos con el año, el método y la empresa que realizó el perfil.
- **Geología Regional y Local:** mapas con información geológica y estructural.
- **Hidrogeología:** mapas hidrogeológicos, distribución espacial de los parámetros hidráulicos de los acuíferos y polígonos de delimitación de acuíferos.
- **Hidroquímica:** ubicación de puntos de muestreo de calidad de las aguas tanto superficiales como subterráneas, diagramas de Piper y mapas de distribución espacial de los parámetros químicos.
- **Modelos numéricos:** polígonos de delimitación de áreas de modelación numérica.
- **Sitios de protección ambiental:** polígonos que delimitan las reservas naturales, sitios RAMSAR, etc.
- **Sectores de explotación de acuíferos:** polígonos de las propiedades mineras que explotan los acuíferos salinos de los salares.

1.3.8 Balance hídrico

A partir de los datos recopilados se realiza una estimación cuantitativa de la oferta y demanda hídrica del acuífero de la cuenca en estudio. Para determinar la oferta se implementó una relación precipitación-recarga, la que incluye la percolación directa y lateral generada sobre las cuencas. También se estiman los caudales de recarga promedio procedentes de las quebradas, ríos y escorrentías circundantes a los acuíferos presentes.

Se identificaron y calcularon los flujos de descarga del sistema hídrico subterráneo, incluyendo consumos antrópicos y naturales (lagunas, vegas, bofedales y salares). Para estimar la evaporación desde el Salar de Maricunga se realizó una interpolación de los datos de profundidad disponibles. Esta interpolación fue asistida con datos generados a partir de un análisis espectral de imágenes satelitales. Posteriormente se calculó la evaporación por tipo de suelo y rango de profundidad.

2. Análisis y valoración de los antecedentes

En el presente apartado se lleva a cabo una revisión y valoración de la información recopilada desde distintas fuentes, considerando las distintas temáticas que incluyen los objetivos del estudio. Dentro de cada temática se planteará una valoración general, enfocada en la identificación de brechas de información para la definición de un Modelo Hidrogeológico Conceptual robusto.

2.1 Análisis y revisión de la geología

En este apartado se muestran los antecedentes más relevantes dentro de la recopilación de información geológica de las cuencas del Salar de Maricunga y de Piedra Pómez:

- M_REF.001

  Tassara, A. (1997). Mapa geológico del Salar de Maricunga, región de Atacama, escala 1:50.000. Informe registrado IR-97-10. SERNAGEOMIN.

Mapa geológico de escala media que cubre el área del Salar y su entorno inmediato, por lo que sólo cubre una porción menor de la cuenca. En este trabajo se identificaron los distintos depósitos no consolidados y semiconsolidados que conforman el relleno principal área del Salar.

El área fue incluida en el trabajo una la publicación del mismo nombre, en la Carta Geológica de Chile, del año siguiente (M_REF.002) por lo que puede ser considerado un trabajo preliminar.

- M_REF.002

  Conejo P.; Mpodozis C.; Tomlinson, A. (1998). Hoja Salar de Maricunga, escala 1:100.000. Carta Geológica de Chile, SERNAGEOMIN.

Carta Geológica que cubre el área noroccidental de la cuenca, abarcando la mayor parte del área del Salar de Maricunga. Incluye la identificación y descripción de depósitos no consolidados, de rocas estratificadas e intrusivas, más dos perfiles geológico-estructurales.

Por su área de cobertura y buena definición de unidades, puede ser utilizado como base geológica, del área cubierta, para los objetivos del presente estudio.

- M_REF.009-8(1)

  Muñoz J. et al., (2009). Mapa geológico Salar de Maricunga, escala 1:150.000. Levantamiento hidrogeológico para el desarrollo de nuevas fuentes de Agua en áreas prioritarias de la zona norte de Chile, Regiones I, II y III. Etapa II, Parte Final. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental Pontificia Universidad Católica de Chile. S.I.T. N°195, DGA.

Trabajo de compilación de estudios anteriores que cubre toda el área de la cuenca. El mapa posee un documento de respaldo donde se citan las unidades y fuentes. Posee falencias cartográficas que dificultan su lectura como, por ejemplo, no posee identificador de unidades en el mapa. Constituye una fuente relevante, sin embargo, no incluye las últimas cartografías oficiales generadas para la zona (M_REF.002; M_REF.051).

- M_REF.050

  Clavero, J.; Mpodozis, C.; Gardeweg, M.; Valenzuela, M. (2012). Geología del área Laguna Wheelwright y paso San Francisco, escala 1:100.000. Carta Geológica de Chile, SERNAGEOMIN.

Carta Geológica que cubre el área nororiental de la cuenca. Incluye la identificación y descripción de depósitos no consolidados, de rocas estratificadas e intrusivas, así como un perfile geológico y estructural.

Por su área de cobertura y buena definición de unidades, puede ser utilizado como base geológica, del área cubierta, para los objetivos del presente estudio.

- M_REF.051

  Mpodozis, C.; Iriarte, S. Gardeweg, M.; Valenzuela, M. (2012). Carta Laguna del Negro Francisco, escala 1:100.000. Carta Geológica de Chile, SERNAGEOMIN.

Carta Geológica que cubre el área sur de la cuenca de Salar de Maricunga. Incluye la identificación y descripción de depósitos no consolidados, como de rocas estratificadas e intrusivas, así como un perfile geológico y estructural.

Por su área de cobertura y buena definición de unidades, puede ser utilizado como base geológica, del área cubierta, para los objetivos del presente estudio.

- M_REF.020-1

  Vargas, J. et al., (2013). Mapa geológico cuenca N°28: Salar de Maricunga, escala 1:250.000. Diagnóstico de Disponibilidad Hídrica en Cuencas Alto - Andinas de la Región De Atacama, fase I. AQUATERRA. S.I.T. N. º 329, DGA.

Trabajo de compilación de estudios anteriores que cubre toda el área de la cuenca. El mapa posee un documento de respaldo donde se citan las unidades y fuentes. Constituye una fuente relevante, sin embargo, no incluye las últimas cartografías oficiales generadas para la zona (M_REF.002; M_REF.051).

- M_REF. 020-2

  Vargas, J. et al., (2013). Mapa geológico cuenca N°29: Piedra Pómez. Escala 1:250.000. Diagnóstico de Disponibilidad Hídrica en Cuencas Alto - Andinas de la Región De Atacama, fase I. AQUATERRA. S.I.T. N. º 329, DGA.

Trabajo de compilación de estudios anteriores que cubre toda el área de la cuenca. El mapa posee un documento de respaldo donde se citan las unidades y fuentes. Constituye una fuente relevante, sin embargo. La base cartográfica digital está disponible y puede.

- M_REF.018-1

  Lizama, M.; Payano, R.; Escorcia, J.; Sendra, G.; Jiménez, N.; Pérez, D.; Benavente, O. (2016). Diagnóstico de disponibilidad hídrica en cuencas Alto-Andinas de la región de Atacama, fase 3. Informe final. Cuenca N°28: Salar de Maricunga. AMPHOS 21. S.I.T. N. º 398, DGA.

- M_REF.018-2

  Lizama, M.; Payano, R.; Escorcia, J.; Sendra, G.; Jiménez, N.; Pérez, D.; Benavente, O. (2016). Diagnóstico de disponibilidad hídrica en cuencas Alto-Andinas de la región de Atacama, fase 3. Informe final. Cuenca N°29: Salar de Piedra Pómez. AMPHOS 21. S.I.T. N. º 398, DGA.

Ambos documentos utilizan la cartografía generada en las fases precedentes del estudio (M_REF.020-1 y M_REF.020-2), aportando una caracterización mejorada de las unidades y de las estructuras, utilizando fuentes actualizadas, y generando 2 nuevos perfiles geológicos. Cubre toda el área de la cuenca del Salar de Maricunga y se encuentra disponible en formato digital. Si bien puede ser actualizada con referencias de los últimos años, constituye una buena base a partir de la cual desarrollar la geología de la zona de estudio.

Los diferentes trabajos citados cubren a la totalidad de la cuenca a escales que son válidas para los objetivos del estudio. Además, aportan información relevante en cuanto a distribución de unidades en profundidad, con una serie de columnas y secciones, que son de gran relevancia para comprender la estructura tridimensional de los materiales geológicos.

En síntesis, la información actual recopilada cumple con la calidad suficiente para poder definir la geología a la escala del trabajo y objetivos requeridos por el presente estudio. Se estima que sólo se requiere de ajustes menores para para concordar con la cartografía geológica más actualizada.

2.2 Análisis y revisión de la geomorfología

La información más relevante desde el punto de vista geomorfológico, es la que se puede encontrar en los siguientes informes:

- M_REF.028

  Kinross-Amec (2011). Proyecto Lobo Marte. Línea base medio físico (Capítulo 2.3.3.5.2).

Desarrolla una descripción geomorfológica a nivel regional y a nivel local, desde la vega de Barros Negros, por el sur, hasta el Llano de Ciénaga Redonda, por el norte. En el estudio se comentan las principales morfologías generadas por los procesos geológicos externos, además relacionándolas también con los diferentes factores que condicionan las diferentes formas (climatología, geología, glaciares y relieve).

- M_REF.009-8

  Muñoz, J. et al., (2009). Levantamiento hidrogeológico para el desarrollo de nuevas fuentes de agua en áreas prioritarias de la zona norte de Chile. Etapa 2. Informe final Parte X. Salares de Maricunga y Pedernales. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental Pontificia Universidad Católica de Chile. S.I.T. N°195, DGA.

Desarrolla una descripción geomorfológica regional a partir del registro bibliográfico, y una descripción geomorfológica local que incluye la descripción de relieves volcánicos, de erosión y acumulación. Dentro del informe se presentan dos cartografías, una geomorfológica y otra de la red hidrográfica, que incluye toda la cuenca hidrográfica Salar de Maricunga (dejando fuera la cuenca hidrográfica Piedra Pómez), las cuales son propias del estudio.

- M_REF.034

  Risacher, F.; Alonso, H.; Salazar, C. (1999). Geoquímica de aguas en cuencas cerradas: I, II y III regiones-Chile. DGA-UCN-IRD. S.I.T. N°51.

Informe que expone un buen tratamiento del tema a escala regional, que además facilita la comprensión sobre los procesos geomorfológicos que afectan a la zona de estudio a nivel principalmente de escala regional.

- M_REF.020

  Vargas, J. et al., (2013). Diagnóstico de disponibilidad hídrica en cuencas Alto - Andinas de la región de Atacama. Informe final, fase I. AQUATERRA. S.I.T. N. º 329, DGA.

Estudio que desarrolla la descripción geomorfológica de la zona a escala regional, además de una leve introducción del mismo a nivel local (abarcando las cuencas hidrográficas Salar de Maricunga y Piedra Pómez), comentando las principales formas del terreno y su origen. En el estudio también existe una cartografía geomorfológica en escala de trabajo regional.

La información precedente resulta correcta y suficiente para la consecución del presente estudio. En este caso, los antecedentes son de dos tipos: unos que tratan más la materia a nivel regional (M_REF.020 y M_REF.034), definiendo las características geográficas regionales donde se encuentra emplazada la zona de estudio, y los otros (M_REF.028 y M_REF.009-8) a escala más local, aportando conocimiento actualizado a la fisiografía de la zona de estudio, donde se puede encontrar una sectorización clara de las acciones superficiales de génesis geomorfológica que han actuado sobre el territorio (Figura 2-3).

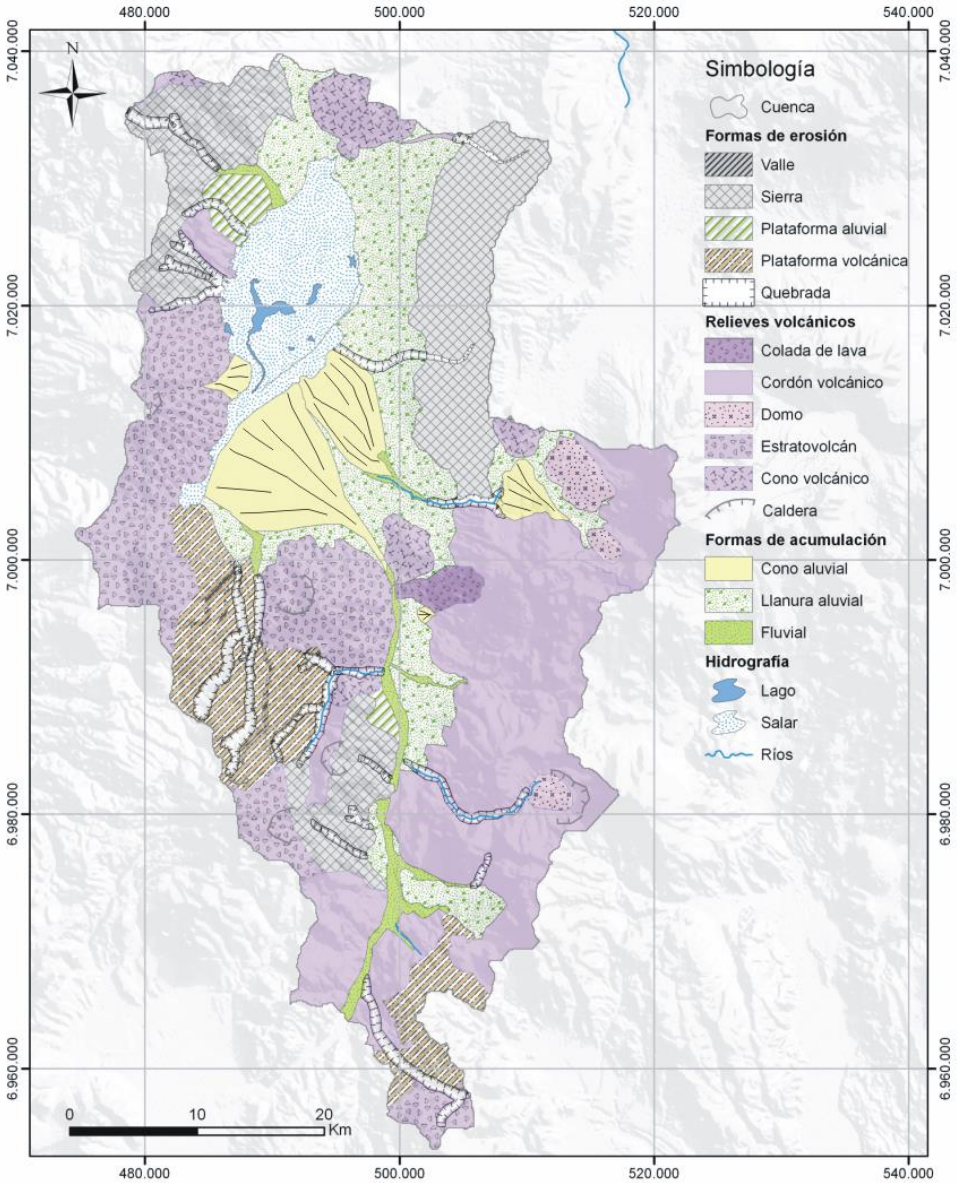


Figura 2-1: Mapa geomorfológico de la cuenca hidrográfica Salar de Maricunga.
Fuente: Muñoz, J. *et al*., 2009; M_REF.009-8.

2.3 Análisis y revisión de la meteorología

Se identifican a continuación los documentos que contienen información más relevante sobre los datos meteorológicos que abarcan parcial o totalmente el área de la cuenca de Salar de Maricunga.

- M_REF.009-3

  Muñoz, J. et al., (2008) Levantamiento hidrogeológico para el desarrollo de nuevas fuentes de agua en áreas prioritarias de la zona norte de Chile, regiones XV, I, II y III. Etapa 1. Parte III. Hidrología Regional del Altiplano de Chile. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental Pontificia Universidad Católica de Chile. S.I.T. N°157, DGA.

El documento consiste en un estudio hidrológico regional que abarcó el territorio altiplánico chileno, comprendido entre las regiones de Arica y Parinacota (ex Región I) hasta la Región de Antofagasta, e incluye el análisis de datos meteorológicos de diferentes estaciones disponibles de la DGA. Además del análisis de datos disponibles, dentro del estudio se instalaron 12 nuevas estaciones meteorológicas, las que registran precipitación líquida (todas) y, algunas, temperatura, humedad del aire y del suelo. Se analizó la validez de los registros, distinguiendo entre las diferentes estaciones vigentes, las estaciones suprimidas con un buen registro histórico y, finalmente, las estaciones suprimidas con poca información.

Los datos estudiados han correspondido principalmente a la precipitación, la temperatura y la evaporación. La información ha sido recopilada en las cuatro regiones en las que se ubicó el estudio. En la tabla 2-1 se especifica el número de estaciones en las que se recogieron los datos para el estudio y aquellas específicas ubicadas en la III Región, lugar donde se encuentra ubicada la cuenca del Salar de Maricunga:

Estaciones	Total	III Región
Estaciones pluviométricas	191	12
Estaciones fluviométricas	289	21
Estaciones meteorológicas (T°)	337	14
Estaciones meteorológicas (Ev.)	353	15

Tabla 2-1: Datos de estaciones meteorológicas revisadas.

Fuente: elaboración propia con daos de Muñoz, J. et al., 2008 (M_REF.009-3).

La información faltante en las series, en mayor grado la de la precipitación, fue rellenada con modelos de regresión linear. Algunas de las actividades de análisis desarrolladas fueron: elaboración de isoyetas, estudio de la precipitación estacional, temperaturas (determinaciones de los valores medios, máximos

y mínimos), determinación de isotermas, evaporación y gradientes de cada uno de los parámetros estudiados.

En los diferentes anexos del estudio se pueden consultar las estaciones pluviométricas empleadas y los diferentes valores obtenidos en las estaciones meteorológicas (temperatura y evaporación).

En síntesis, el estudio posee relevancia para la caracterización de las variables meteorológicas, a nivel regional.

- M_REF.029

  GHD-ANDINA, (2012). Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Minero Volcán.

Dentro del estudio para la elaboración de la línea de base ambiental del Proyecto Volcán, se analizó la información de 3 estaciones meteorológicas instaladas en el entorno del área del proyecto, las que registraron datos, con algunos vacíos de información, entre abril de 2009 y julio de 2011. Las variables registradas fueron velocidad y dirección del viento, temperatura, humedad, radiación solar, presión atmosférica, precipitación líquida y nivel de nieve.

De estas estaciones, una se encuentra en el extremo sur de la cuenca del Salar de Maricunga (en el valle de Ciénaga Redonda), mientras que los dos restantes se ubican en la cuenca de Laguna de Negro Francisco, próximo a la divisoria de aguas con la cuenca de Salar de Maricunga. Por lo limitado del período de registro, los datos son de interés restringido para los fines del presente estudio.

- M_REF.020

  Vargas, J. et al., (2013). Diagnóstico de disponibilidad hídrica en cuencas Alto - Andinas de la región de Atacama. Informe final, fase I. AQUATERRA. S.I.T. N. º 329, DGA.

Informe referente a la disponibilidad hídrica en 34 cuencas cerradas alto-andinas, en el cual se analizó la disponibilidad de datos meteorológicos de estaciones disponibles, con el subsiguiente relleno de series estadísticas con vacíos de información. En total se utilizaron los datos de pluviometría de 12 estaciones meteorológicas y los datos de temperatura únicamente de 4. En los anexos se presentan datos de evaporación, precipitación y temperatura. Adicionalmente, se estima la evaporación producida desde las diferentes superficies naturales, realizando una extrapolación para la totalidad de la cuenca. Finalmente, y a modo de recomendaciones, se presenta una propuesta para la instalación de nuevas estaciones pluviométricas y evaporimétricas en la cuenca de estudio.

Consiste en una buena recopilación regional de datos hidrológicos, sin embargo, esta información ha sido actualizada en trabajos posteriores (ej. M_REF.018)

- M_REF.009-8

  Muñoz, J. (2009). Levantamiento hidrogeológico para el desarrollo de nuevas fuentes de agua en áreas prioritarias de la zona norte de Chile. Etapa 2. Informe final Parte X. Salares de Maricunga y Pedernales. PUC. S.I.T. N°195, DGA.

El presente informe presenta un análisis hidrológico de la zona de estudio, en el que se elaboró un análisis completo de las series hidrológicas. El estudio se complementa con la instalación de una estación meteorológica y la puesta en marcha de diferentes pluviómetros, el monitoreo de la evaporación y de la red hidrográfica existente en la zona. Se realiza la caracterización hidrológica de la zona, con datos de estaciones cercanas, se determina las probabilidades de lluvia según los días y se determina el gradiente de precipitaciones y de escurrimientos y de isoyetas, a partir de 30 años de series con 5 estaciones fluviométricas. En este estudio, a partir del mapa de las isotermas y de la evaporación en tanque, se calibra de forma precisa el balance hídrico de la zona.

2.4 Análisis y revisión de la hidrología

Existe una gran cantidad de informes referentes a hidrología en los antecedentes revisados. Entre ellos, destacan los siguientes:

- M_REF.048

  Teck-MDO (1998). Estudio hidrológico del Salar de Maricunga. Exploración y desarrollo de recursos de agua S.A.

Estudio efectuado por Compañía Minera Mantos de Oro. Entre los temas analizados, se define la red de drenaje, se rescatan estadísticas pluviométricas, y se definen datos generales del balance hídrico de la zona de estudio.

Los diferentes elementos del balance se calculan en función de la disponibilidad de los datos. La evapotranspiración se calcula a través de la formulación de Turc, 1961; a través de diferentes perfiles de precipitación y gradientes de temperatura se establecen los diferentes datos hidrológicos de la zona de estudio. Mientras que la evaporación se estimó mediante valores de tanque y aplicación de diferentes coeficientes. Se efectuó una determinación del consumo de agua en la zona y la valoración de los caudales medios mensuales.

- M_REF.028

  Kinross-Amec (2011). Proyecto Lobo Marte. Línea base medio físico (Capítulo 2.3.3.5.2).

El estudio presenta datos hidrológicos recopilados desde revisión bibliográfica y a datos generados para fines específicos del proyecto, en el valle de Ciénaga Redonda. Entre los datos generados, se estableció un control de niveles de cuerpos y cursos de agua, con sensores de registro continuo, durante el año 2010, consistente en 10 puntos de control (Tabla 2-2). Adicionalmente se efectuaron aforos en cursos

de agua, en 6 de los puntos con sensores de nivel (en los cuales se efectuó una curva de descarga fluviométrica) y 5 puntos adicionales.

El estudio incluyó un balance hídrico regional del área del proyecto

Punto monitoreo	Coincidente con punto de muestreo de calidad de agua	UTM Norte [m]	UTM Este [m]	Período de medición	Frecuencia de medición [min]	Área aportante [km^2]	Descripción punto monitoreo
EFG-1	SWG-1	6.960.721	475.855	enero 2010 – dic. 2010	30	692,7	Laguna roja Negro Francisco
EFG-2	SWG-2	6.960.612	476.278	enero 2010 – dic. 2010	30	692,7	Laguna verde Negro Francisco
EFG-3	SWG-5	6.966.638	496.698	enero 2010 – dic. 2010	3	79,2	Aguas abajo vega en Pantanillo
EFG-4	SWG-6	6.984.053	499.499	enero 2010 – dic. 2010	3	359,0	Estación DGA - Valle Ancho, antes Barros Negros
EFG-5	SWG-7	6.983.902	499.901	enero 2010 – dic. 2010	3	86,5	Estación DGA - Barros Negros antes junta Valle Ancho
EFG-6	Cerca de LM- 35	6.990.933	498.659	enero 2010 – dic. 2010	3	100,2	Aguas abajo de vega Villalobos
EFG -7	Cerca de LM- 34	6.990.626	497.024	enero 2010 – dic. 2010	3	96,6	Estación DGA - Río Villalobos en Vertedero
EFG-8	SWG-14	6.997.788	499.493	enero 2010 – dic. 2010	3	258,9	Estación DGA - Río Valle Ancho en La Barrera
EFG-9	SWG-17	7.003.548	483.773	enero 2010 – dic. 2010	30	1.251,4	Laguna Santa Rosa sur
EFG-10	SWG-18	7.003.983	483.783	enero 2010 – dic. 2010	30	1.251,4	Laguna Santa Rosa norte

Tabla 2-2. Puntos de medición y período de registro en cauces y cuerpos de agua monitoreados para el estudio EIA Lobo Marte.
Fuente: Kinross-Amec, 2011 (M_REF.028).

- M_REF.020

  Vargas, J. (2013). Diagnóstico de disponibilidad hídrica en cuencas alto-andinas de la región de Atacama. Anexo 4-1 Estadísticas originales. AQUATERRA. S.I.T. 329, DGA.

Dentro del proyecto de determinación de recursos hídricos en las Cuencas Alto Andinas (II Fase), en este trabajo se puede consultar el desarrollo completo de los datos hidrológicos para el proyecto:

- Se establecen los caudales para las diferentes estaciones a partir de correlaciones.
- Se recopilan las estadísticas originales de diferentes estaciones para la evaporación, el caudal en las quebradas, datos pluviométricos y temperaturas.
- Se rellena las series pluviométricas a partir del cálculo de las precipitaciones medias por estadística.

- Al final se está en condiciones de calcular un balance hídrico para la zona de estudio y para cada una de las cuencas involucradas.

El presente trabajo se puede considerar de buena calidad.

En resumen, se puede concluir que los datos presentan una buena calidad para el objetivo del estudio. Es notable la gran cantidad de suposiciones y modelaciones que se realizan en los diferentes estudios para relleno de las series, tanto de precipitación como de escorrentía, pero se puede concluir que en general la bibliografía recopilada resulta de buena calidad para el estudio de las diferentes cuencas y de relevancia alta.

- M_REF.055

  Lizama, M.; Payano, R.; Escorcia, J.; Sendra, G.; Jiménez, N.; Pérez, D.; Benavente, O. (2016). Diagnóstico de disponibilidad hídrica en cuencas Alto-Andinas de la región de Atacama, fase 3. Informe final. AMPHOS 21. S.I.T. N. º 398, DGA.

- En este trabajo, incluyó, en la temática de hidrología, el análisis de la precipitación, la estimación de la recarga, el cálculo de la escorrentía, un balance hidrometeorológico y una estimación de la evaporación directa, en 34 cuencas cerradas alto-andinas, dentro de la que se encuentran la cuenca de Salar de Maricunga y Piedra Pómez. Se elaboró un mapa de isoyetas de precipitación media anual, que cubre a todas las cuencas del área de estudio, en la región de Atacama. Dentro del estudio, se instalaron 7 lisímetros en cuencas cerradas alto-andinas, ubicadas más al norte, fuera de la cuenca de Salar de Maricunga, las que pueden tener utilidad referencial dentro de estimaciones de la evaporación.

- M_REF.016

  Vargas, J. et al., (2011). Estimación de recarga en cuencas altiplánicas, región de Atacama. AQUATERRA ING. Ltda. S.I.T. N°251, DGA.

Siguiendo la metodología desarrollada por la DGE (2010; M_REF.015) se definió como recarga neta de una cuenca como el caudal base de salida, compuesto por el agua que infiltra y transita en algún momento en forma subterránea, tal que su permanencia dentro de la cuenca es superior al de un año hidrológico. Dicha recarga neta ha sido estimada, en términos de caudal medio mensual, como el promedio de los mínimos de caudales observados entre los meses de Junio, Julio y Agosto. Bajo la hipótesis anterior, la recarga neta en una determinada cuenca corresponde al 40 % del caudal observado, si el caudal subterráneo en la sección de medición del caudal es despreciable, o sumando el caudal subterráneo, si existiese. El documento no asigna un valor estimado para las cuencas objeto de esta investigación.

- M_REF.019

  DGA (2012). Estimación de recarga en cuencas altiplánicas, Región de Atacama. Versión Corregida. División de estudios y planificación, SDT N°334.

Se realiza una evaluación de la metodología elaborada por la DGA (2011; M_REF.016), con dos variantes de aplicación: hidrogeológica e hidrológica. Cada variante de cálculo considera datos específicos de cada una de ellas. Se estimó que, para las cuencas de estudio, la variante hidrológica es la que resulta de mayor utilidad entre ambas variables. Se obtuvo la recarga neta mínimo de cada cuenca que corresponde al 40% de la escorrentía total de salida de cada una de ellas. Para la cuenca Salar de Maricunga, esta se estimó en 136,66 l/s y para la cuenca de Piedra Pómez, en 96,01 l/s.

La estimación de la precipitación que ocurre en las cuencas alto andinas está asociada a una incertidumbre importante, ya que se ha estimado en base relaciones regionales (Muñoz et al., 2008), regresiones lineales elaboradas con estaciones meteorológicas ubicadas en la cuenca del río Copiapó (todas bajo los 2.300 msnm) o bien utilizando algunas mediciones parciales (GHD-ANDINA, 2012). Por otro lado, la precipitación en la zona de las cuencas alto andinas puede caer en forma de nieve y no se cuenta con estudios que abarquen la sublimación, evaporación y dinámica de los mantos de nieve en la zona. Algo similar ocurre para la evaporación, ya que también ha sido estimada con mediciones puntuales (Johnson, 2009) y curvas regionales (Muñoz et al., 2008). Finalmente, desde el punto de vista de los caudales, se puede mencionar que es la variable hidrológica mejor representada, ya que existe un número importante de estaciones con registro extenso.

Debido a las diferentes metodologías, los cálculos de precipitación y escorrentía resultan bastante dispares entre los diferentes informes. Se resalta el estudio de Lizama *et al.*, (2016; M_REF.055) como el trabajo más actualizado realizado en la zona, que homogeniza cálculos de variable meteorológicas y una estimación de balance hídrico para la cuenca de Salar de Maricunga.

2.5 Análisis y revisión de la geofísica

Los estudios de geofísica en la cuenca han sido elaborados por varios autores y se han aplicado diversos métodos. En la Figura 5-1 se presenta un mapa con la distribución espacial de la traza de los perfiles geofísicos que se han llevado a cabo en el área de estudio. En el mapa se han diferenciado los perfiles geofísicos no disponibles y disponibles, éstos últimos se encuentran archivados en formato digital. En dicho anexo se puede identificar el archivo del perfil mediante el nombre de éste y la referencia (por ejemplo: L-1_2004_M_REF.029-2).

Las principales referencias bibliográficas de geofísica del presente informe son las siguientes:

- M_REF.048

  Teck-MDO (1998). Hidrología del Salar de Maricunga. Exploración y desarrollo de recursos de agua S.A.

En el estudio Hidrología del Salar de Maricunga realizado por Mantos de Oro en 1998 se muestran mapas de sondajes, información estratigráfica y perfiles de pozos en el Salar de Maricunga. A pesar que la información resulta relevante para el estudio, la forma de la presentación de la misma resulta de poca utilidad, pues si bien hay gran cantidad de datos recopilados en terreno, en la presentación en el informe solo se representa la interpretación, además en un formato poco amigable para incorporarlo al presente estudio. La geofísica que se recopiló se resume en la Tabla 2-3:

Empresa	Año	Zona del estudio	Tipo de prospección	Ensayos
Chevron Minera	--	NE Salar de Maricunga	Gravimetría	No se especifica
MDO	--	S Salar de Maricunga	Gravimetría	No se especifica
Geoexploraciones	1987	Ciénaga Redonda	SEV	4 perfiles
AgraEarth environment	1987	Quebrada Villalobos Ciénaga Redonda	Sísmica	6 perfiles
Geodatos	1997	SE Salar de Maricunga	TEM	50 sondajes 10 perfiles

Tabla 2-3: Tabla resumen de la geofísica.

Fuente: elaboración propia con datos de Teck-MDO 1998; M_REF.048.

- M_REF.023

  Venegas, M., Iriarte, S., Aguirre, I. (2000). Mapa hidrogeológico de la cuenca del Salar de Maricunga: sector Ciénaga Redonda, escala 1:100.000. SERNAGEOMIN.

- M_REF.033

  Santibáñez, I., Venegas, M., Espinoza, C. (2006). Hidrogeología de la cuenca campo de Piedra Pómez - Laguna Verde, escala 1:100.000. SERNAGEOMIN.

- M_REF.061

  Iriarte, S. (1999). Mapa hidrogeológico de la cuenca del Salar de Maricunga: sector Salar de Maricunga, escala 1:100.000. SERNAGEOMIN.

- M_REF.070

  Aguirre, I., Fonseca A. (2000). Interpretación gravimétrica y geoeléctrica de la cuenca de Ciénaga Redonda, Altiplano, III región

En los mapas (M_REF.023, M_REF.033 y M_REF.061) se puede consultar una cartografía de isoprofundidades del basamento gravimétrico en la cuenca. El reconocimiento geofísico se realizó en cada uno de los estudios realizados y proporciona información relevante para establecer las zonas de mayor profundidad la interfase rellenos sedimentarios-basamento rocoso, en gran parte de la cuenca. En total, las prospecciones realizadas se pueden consultar en la siguiente tabla.

Referencia estudio	Prospección	Área cubierta (Km2)	N° Perfiles
M_REF.023	Gravimétrica	30 x 10	13 perfiles
M_REF.033	Gravimétrica	15 x 30	8 perfiles
M_REF.061	Gravimétrica	35 x 12	11 perfiles

Tabla 2-4: Tabla resumen de la geofísica recopilada estudios SERNAGEOMIN.
Fuente: elaboración propia.

Es remarcable el grado de detalle conseguido en la referencia M_REF.070, con los diferentes perfiles de gravimetría y SEV.

- M_REF.062.

  SRK Consulting (2011). Actualización Estudio Hidrogeológico Piedra Pómez. Apéndice B. Geofísica. Estudio de Impacto Ambiental Optimización Proyecto Minero Cerro Casale. MWH-Cía. Minera Cerro Casale.

Este trabajo constituye el establecimiento de la línea de base ambiental del Estudio de Impacto Ambiental de la Optimización Proyecto Minero Cerro Casale. El trabajo recopiló los siguientes trabajos de prospección geofísica:

1. Geodatos 2009. Estudio de Conductividad GEM-2 Sector Nacimiento Río Peñas Blancas Altiplano III Región de Chile.
2. Geodatos 2009. Estudio Geofísico Transiente Electromagnético (TEM) Sectores Río Lamas, Barrancas Blancas, Peñas Blancas y Piedra Pómez. Altiplano III Región de Atacama.
3. Geodatos 2010. Gravimetría Quebrada Piedra Pómez, Sector Piedra Pómez, Altiplano III Región de Atacama.
4. Geodatos 2010. Estudio Geofísico Transiente Electromagnético (TEM). Re-inversión de Sondeos TEM, Sector Río Lamas, Altiplano III Región de Atacama.

5. Geodatos 2010. Perfilaje Geofísico de Pozos Sector Quebrada Piedra Pómez, III Región de Atacama.
6. Geodatos 2010. Estudio Geofísico Transiente Electromagnético (NanoTEM) Sector Río Lamas, Altiplano III Región de Atacama.
7. Geodatos 2010. Estudio de Gravimetría Sector Laguna Verde, III Región de Atacama.

En la Tabla 2-5 se puede consultar el autor, la técnica, el contenido, la longitud de la prospección y el sector donde se realizó la misma. A partir de estos datos, se puede observar que se recopiló una buena cantidad de datos geofísicos, los cuales permiten una buena comprensión geológica de la zona de trabajo.

Año	Autor	Técnica	Contenido	Longitud	Sector
2009	SRK - Geodatos	GEM-2	20 perfiles	2 km	Nacimiento Rio Peñas Blancas
2009	SRK - Geodatos	TEM	11 perfiles	75 km	Río Lamas
2010	SRK - Geodatos	GRAV	3 perfiles	52 km	Piedra Pómez
2010	SRK - Geodatos	TEM	3 perfiles	23 km	Río Lamas
2010	SRK - Geodatos	PERF	25 perfiles	No aplica	Toda la cuenca
2010	SRK - Geodatos	TEM	1 perfiles	2,5 km	Río Lamas
2010	SRK - Geodatos	GRAV	7 perfiles	65 km	Laguna Verde

Tabla 2-5: Alcance estudios EIA del proyecto Cerro Casale.

Fuente: elaboración propia.

Existen una gran cantidad de estudios, los cuales cubren una gran parte de la zona de trabajo. Mucha de la geofísica realizada con anterioridad no se encuentra disponible para ser incorporada al presente estudio, pero la información revisada permite establecer con detalle diversas conclusiones relevantes para el trabajo:

- A partir de la cartografía hidrogeológica se puede establecer el mapa de isoprofundidades del basamento de forma precisa.
- A partir de la prospección en TEM, se ha podido establecer los niveles freáticos principales de la zona de estudio.
- En el caso de la prospección gravimétrica, se ha estado en disposición de delimitar el contacto existente entre los materiales de cobertura más recientes y el basamento.

- A partir de los diferentes perfilajes realizados en los pozos, se ha podido estimar los principales parámetros hidráulicos del terreno (permeabilidad y almacenamiento) del agua subterránea.
- Finalmente, se ha establecido también una correlación de los materiales que han aparecido en las diferentes perforaciones a partir de las secciones geofísicas aledañas a los sondajes.

    - M_REF.020

      AQUATERRA (2013). Estudio geofísico mediante TEM, Diagnóstico de Disponibilidad hídrica en cuencas alto-andinas de la Región de Atacama, Fase I, Anexo 10-1 (Geodatos). S.I.T. N° 329, DGA

Estudio Geofísico mediante TEM en cuatro cuencas cerradas alto-andinas. Entre las cuencas estudiadas, está la cuenca Piedra Pómez, en la que se realizaron 4 estaciones TEM, ubicadas al NE de la cuenca.

- M_REF.055

  Lizama, M.; Payano, R.; Escorcia, J.; Sendra, G.; Jiménez, N.; Pérez, D.; Benavente, O. (2016). Diagnóstico de disponibilidad hídrica en cuencas Alto-Andinas de la región de Atacama, fase 3. Informe final. Cuenca N°28: Salar de Maricunga. AMPHOS 21. S.I.T. N. º 398, DGA.

  Lizama, M.; Payano, R.; Escorcia, J.; Sendra, G.; Jiménez, N.; Pérez, D.; Benavente, O. (2016). Diagnóstico de disponibilidad hídrica en cuencas Alto-Andinas de la región de Atacama, fase 3. Informe final. Cuenca N°29: Salar de Piedra Pómez. AMPHOS 21. S.I.T. N. º 398, DGA.

Dentro del estudio se efectuaron 13 perfiles geofísicos con la técnica TEM, que alcanzan una longitud de 45 km, los que se distribuyen en los sectores de Pantanillo (próximo a la divisoria de aguas entre las cuencas de Laguna del Negro Francisco y la cuenca de Salar de Maricunga. El estudio aporta información relevante en el sector del límite sur de la cuenca, e información que permite la interpretación de las características del subsuelo en la periferia del Salar de Maricunga. Con esta información se ha interpretado la zona más probable de presencia de salmuera subterránea.

2.6 Análisis y revisión de la hidrogeología

Las principales fuentes bibliográficas con respecto a la hidrogeología en la zona de estudio son las siguientes:

- M_REF.023

  Venegas, M., Iriarte, S., Aguirre, I. (2000). Mapa hidrogeológico de la cuenca del Salar de Maricunga: sector Ciénaga Redonda, escala 1:100.000. SERNAGEOMIN.

- M_REF.033

  Santibáñez, I., Venegas, M., Espinoza, C. (2006). Hidrogeología de la cuenca campo de Piedra Pómez - Laguna Verde, escala 1:100.000. SERNAGEOMIN.

- M_REF.061

  Iriarte, S. (1999). Mapa hidrogeológico de la cuenca del Salar de Maricunga: sector Salar de Maricunga, escala 1:100.000. SERNAGEOMIN.

La información extraída de estos estudios se expone en conjunto debido a la gran similitud existente entre ellos. Consisten en estudios de cartografía hidrogeológica que cubren, en conjunto, toda la cuenca de Salar de Maricunga. Estos, presentan una buena definición de las unidades hidrogeológicas (UH), utilizando los criterios propuestos por Struckmeier y Margat (1995). En la siguiente tabla, se resume las principales informaciones extraídas de los estudios. En los tres documentos se expone una síntesis hidrogeológica de las diferentes, además de presentar secciones hidrogeológicas que complementan la información de la cartografía de superficie.

Referencia	N° Perforaciones	Parámetros relevantes	Piezometría	Definición UH	Secciones HG
M_REF.023	11 pozos	Caudal específico	Sí	Sí	1 sección
M_REF.033	19 pozos	Caudal específico	Sí	Sí	2 secciones
M_REF.061	12 pozos	Caudal específico	Sí	Sí	1 sección

Tabla 2-6: Información relevante.

Fuente: elaboración propia con datos de los estudios del SERNAGEOMIN.

Aun cuando estos trabajos constituyen una muy buena base referencial inicial para la conceptualización del sistema hidrogeológico, adolece de información relevante, como por ejemplo, no posee datos de ensayos de bombeo para el cálculo de coeficiente de almacenamiento, identifica sólo acuífero en el nivel comprendido entre 0 a 100 m, mientras que la zona probable de existencia de un acuífero con salmuera, se encuentra bajo esta profundidad, no posee monitoreo de variables en el tiempo, entre otros.

- M_REF.055

  Lizama, M.; Payano, R.; Escorcia, J.; Sendra, G.; Jiménez, N.; Pérez, D.; Benavente, O. (2016). Diagnóstico de disponibilidad hídrica en cuencas Alto-Andinas de la región de Atacama, fase 3. Informe final. Cuenca N°28: Salar de Maricunga. AMPHOS 21. S.I.T. Nº 398, DGA.

- M_REF.055

  Lizama, M.; Payano, R.; Escorcia, J.; Sendra, G.; Jiménez, N.; Pérez, D.; Benavente, O. (2016). Diagnóstico de disponibilidad hídrica en cuencas Alto-Andinas de la región de Atacama, fase 3. Informe final. Cuenca N°29: Salar de Piedra Pómez. AMPHOS 21. S.I.T. N. º 398, DGA.

Forman parte de un mismo estudio, en el que se efectúa una evaluación preliminar del funcionamiento hidráulico de la cuenca, considerando balance hidrometeorológico y estimación de recarga, tanto la para la cuenca de Salar de Maricunga como para la cuenca de Piedra Pómez. Ambos estudios se basan en gran medida, sobre información antecedente, revisando su validez, y re-analizando algunas de las variables del balance hídrico. Existen definiciones de las unidades hidrogeológicas, revisión de la piezometría, recopilación actualizada de datos hidrológicos e hidrogeológicos, entre los que destacan un catastro de puntos de agua, levantamiento de nuevos datos de química y nivel piezométrico, entre otros.

Los mapas de las referencias (M_REF.023, M_REF.033, M_REF.061) muestran una cartografía hidrogeológica a escala media que cubren la totalidad de las dos cuencas hidrográfica que forman la cuenca Salar de Maricunga. En ellas se definen las unidades hidrogeológicas a un buen nivel de detalle, aportando datos en profundidad mediante columnas, interpretación geofísica y secciones.

En los dos estudios finales (M_REF.055), comprende una recopilación actualizada de datos hidrológicos e hidrogeológicos, con planteamiento preliminar del funcionamiento hidráulico en ambas cuencas.

Revisando la información antecedente, se han identificado las siguientes brechas para la definición de un modelo hidrogeológico conceptual.

- No existen análisis de pruebas de bombeo con pozos de observación. Esta información es de gran relevancia para la determinación del coeficiente de bombeo. Las pruebas de bombeo también sirven para observar existencia de barreras hidráulicas que definan distintos horizontes acuíferos, también permiten el monitoreo hidroquímico dinámico.
- Se desconoce la extensión subsuperficial de los depósitos salinos actuales y antiguos del Salar de Maricunga.
- Se desconoce el comportamiento hidráulico de los depósitos salinos del Salar de Maricunga.
- En importantes partes del salar la cobertura de sondajes para conocer la estratigrafía y extensión de los depósitos sedimentarios factibles de conformar acuíferos, es muy pobre. Por ejemplo, en el interior del Salar.
- Sólo existe información estratigráfica e hidrogeológica en sondajes y pozos que alcanzan entre 100 a 150 m de profundidad. Estos pozos limitan con rocas volcánicas (zona norte del Salar) y depósitos arcillosos (sector sureste del Salar). Considerando que la información gravimétrica estima una profundidad del basamento rocoso que podría alcanzar a 800 m bajo el nivel de

suelo, y un horizonte con posibilidad de conformar acuífero con salmuera, ubicada entre 150 a 400 m de profundidad, existen una importante parte de la cuenca sin ser reconocida mediante información directa (sondajes) para calibrar la geofísica.

- En la periferia entre ambas cuencas hidrográficas y de la periferia de la cuenca en general, no existen datos de la permeabilidad y estado de saturación de las rocas, como para determinar posibles flujos subterráneos entre cuencas hidrográficas

- M_REF.068.

  Espinoza, C (2015). Caracterización Hidrogeológica Sistema acuífero Ciénaga Redonda.

Informe técnico referente al potencial efecto sobre el acuífero de Ciénaga Redonda de los pozos instalados en la zona de Pantanillo. El informe establece de forma precisa el funcionamiento hidrogeológico de la subcuenca de Ciénaga Redonda. En este trabajo se presenta el catastro de puntos de agua subterránea, con la incorporación de seis nuevas pruebas de bombeo con la recopilación de otras tantas anteriores. También presenta un catastro de puntos de agua y el balance hídrico del acuífero. Finalmente, se expone también la evolución de los niveles en los principales pozos de bombeo en la subcuenca y se determina la no afección al Valle Ancho por los bombeos en la zona de estudio.

El informe constituye un buen referente para el estudio de la subcuenca de Ciénaga Redonda, presentando una calidad media y una alta relevancia.

2.7 Análisis y revisión de la hidrogeoquímica

Los informes más relevantes para el conocimiento hidrogeoquímico de la zona de estudio son los siguientes documentos:

- M_REF.067

  Corporación de Fomento de la Producción (CORFO), Chile (1982). Informe Prospección Preliminar Salar de Maricunga. Comité Sales Mixtas

El estudio aporta una breve descripción geomorfológica, climática, vegetacional, geológica e hidrológica, dando un contexto general de la zona. El objetivo principal fue la realización de una prospección del Salar construyendo una malla de calicatas distribuidas en el sector norte, para luego elaborar planos con curvas de isoconcentración de potasio y de litio. En el informe, se presentan las analíticas aportando datos de concentraciones de Li, Na, K, Ca, Mg, Cl, SO_4 y H_3BO_3, además de pH, densidad y temperatura. Se pudo rescatar 37 muestras, georreferenciando un mapa de mala calidad incluido en el informe. Se le atribuye una alta relevancia y calidad media, respecto a los datos utilizados.

- M_REF.034

  Risacher, F., Alonso, H., Salazar, C. (1999). Geoquímica de aguas en cuencas cerradas: I, II y III regiones-Chile. DGA-UCN-IRD. S.I.T. N°51.

El trabajo, de relevancia alta y de buena calidad, supone un buen aporte al conocimiento completo de la hidroquímica de las zonas de estudio. El estudio aporta explicaciones de tipo teórico con respecto a la evolución y génesis de los depósitos salinos, origen y clasificación de las aguas, y otro tipo de datos relevantes. Se realiza una evaluación de las aguas en función de la calidad y se definen diferentes grupos de agua de aporte en el salar. Adicionalmente en el estudio se comenta el origen de las aguas y su relación con la geología de la zona de estudio, para finalmente definir la evolución geoquímica de las aguas en el contexto general de la zona norte de Chile.

Finalmente, el estudio se centra en el Salar de Maricunga, en el que se concluye que las aguas de aporte al Salar de Maricunga presentan una gran variedad de composiciones químicas, distinguiendo dos grandes grupos de aguas de aporte: las aguas diluidas, de vía evolutiva sulfatada, y las salobres de vía evolutiva cálcica.

Para las determinaciones químicas, en el presente estudio se analizaron un total de 600 muestras aproximadamente, y se recopiló un total de 600 analíticas de empresas mineras. Estos datos fueron utilizados para el estudio de escala regional. A otra escala, en el Salar de Maricunga se analizaron 30 muestras de agua más 3 de nieve. En estas muestras únicamente se realizó una determinación de elementos mayoritarios y minoritarios, no se realizó una evolución temporal de las mismas. Los puntos de muestreo correspondieron a muestras de nieve (3), manantiales (3) superficial (18), humedales (4) y subterránea (5). Estas han presentado un error inferior al 5 % en todos los casos, por lo que se puede establecer la alta relevancia y buena calidad del estudio.

- M_REF. 061; M_REF. 023; M_REF. 033

El SERNAGEOMIN ha publicado tres estudios en la forma de cartografías, que cubren la totalidad de la cuenca de Salar de Maricunga (y Piedra Pómez). Estos estudios son:

M_REF.061: Iriarte, S. (1999) Mapa Hidrogeológico de la Cuenca del Salar de Maricunga, Sector Salar de Maricunga: Incluye los resultados químicos de 38 muestras, correspondientes a aguas superficiales de ríos, esteros y lagunas (33 muestras), 1 humedal más 4 muestras de aguas subterráneas.

M_REF.023: Venegas, M.; Iriarte, S.; Aguirre, I. (2000). Mapa Hidrogeológico de la Cuenca del Salar de Maricunga, Sector Ciénaga Redonda (2000): Incluye los resultados químicos de 36 muestras, de las cuales 10 corresponden a aguas subterráneas, 25 a aguas superficiales y 1 a manantiales.

M_REF.033: Santibáñez, I.; Vengas, M.; Espinoza, C. (2006). Hidrogeología de la Cuenca Campo de Piedra Pómez y Laguna Verde: Incluye el análisis de 27 muestras, donde todas corresponden a muestras de agua subterránea. El resto de las analíticas del mapa caen fuera de la cuenca, en Laguna Verde.

Estos tres estudios presentan resultados de concentración de As, B, Cl, F, Li, Mg, Mn, Mo, SO_4, y Na (Na%), más los parámetros físico-químicos pH y TDS. La interpretación de facies química se presenta sólo de manera gráfica con diagramas Piper. Debido a la ausencia de la concentración de algunos iones mayores en el reporte (Ca, HCO_3, K) y de análisis isotópicos, no fue posible integrar estos estos datos a la interpretación de facies químicas ni isotópicas de este estudio. La calidad de la información es buena; sin embargo, dada la ausencia de ciertas analíticas de importancia para su interpretación, su relevancia es media.

- M_REF.009-4.

  Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental (DIHA), Pontificia Universidad Católica de Chile (2009). Levantamiento hidrogeológico para el desarrollo de nuevas fuentes de agua en áreas prioritarias de la zona norte de Chile. Etapa 2. Informe final Parte IV. Hidrogeoquímica e Isotopía Regional. S.I.T.N°195, DGA.

Se realiza un estudio comparativo de la calidad del agua con las normativas de agua potable y de riego. A partir del estudio, se está en condiciones de comentar una serie de conclusiones relevantes a nivel regional. El trabajo es de buena calidad. Los puntos son representativos del agua superficial, profunda y los manantiales de la cuenca, aunque hay que aclarar que solo se analizan los elementos mayoritarios y algunos metales en las diferentes muestras tomadas.

En general existe una gran cantidad de bibliografía para definir la hidroquímica de la zona de estudio, tanto a nivel local, observando los diferentes tipos de agua y procesos en el salar, como a nivel regional de la interacción entre cuencas. Se han seleccionado principalmente los estudios con descarte de datos con error excesivo en el balance iónico de los elementos analizados. La relevancia de estos trabajos es media para la definición de la hidroquímica en el presente proyecto.

- M_REF. 009-8

  Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental (DIHA), Pontificia Universidad Católica de Chile (2009). Levantamiento hidrogeológico para el desarrollo de nuevas fuentes de agua en áreas prioritarias de la zona norte de Chile. Etapa 2. Informe final Parte Sistema Piloto III Región, Salares de Maricunga y Pedernales. S.I.T.N°195, DGA.

Estudio de buena calidad y relevancia para el presente trabajo. En general, el proyecto se encuentra elaborado con detalle y con amplia revisión de los datos. En éste, se extraen conclusiones con respecto a las diferentes facies hidroquímica del agua en función de la zona donde se encuentran y la integración de los datos químicos al Modelo Hidrogeológico Conceptual.

En particular, el estudio conllevó la compilación de una serie de estudios anteriores con información hidroquímica de las tres primeras regiones del país (entre ellos el estudio de Risacher et al., y los mapas del Sernageomin). Adicionalmente, el estudio incorpora información proveniente de estudios realizados por EDRA (1999) y del Dpto. de Conservación F-N°42, de los que no se tuvo acceso. En total, se

incorporaron 81 muestras, de las cuales 19 fueron colectadas por el DIHA PUC durante el año 2008, mientras que el resto corresponden a analíticas recopiladas de los estudios de EDRA (1999) y Dpto. de Conservación F-N°42. Las muestras de esta campaña (las propias del DIHA PUC), correspondieron a agua de fuentes superficiales (río/estero, lagos, humedales) y manantiales, los que fueron analizados por iones mayoritarios, algunos metales e isótopos estables de oxígeno y deuterio. El resto de las analíticas recopiladas desde la base de datos de este estudio, se asignaron a su referencia original (e.g. las de Sernageomin y Risacher et al.)

- M_REF.028

  Kinross-Amec (2011). Proyecto Lobo Marte. Línea base medio físico (Capítulo 2.3.3.5.2).

Dentro del estudio EIA presentado a la autoridad ambiental para el desarrollo del proyecto Lobo Marte, se presentaron los análisis químicos de 295 muestras, correspondientes a un total de 63 puntos de muestreo, de los cuales 37 pertenecen a fuentes de agua subterránea (pozos o piezómetros), 25 pertenecen a fuentes superficiales (esteros, lagunas y humedales) y 1 a una vertiente o manantial. El período de muestreo consistió en un registro mensual (parcial), que abarcó desde noviembre de 2009 a diciembre de 2010. Los análisis de las muestras consistieron en parámetros físico-químicos, concentración de iones mayoritarios y de un número importante elementos minoritarios (metales y no metales).

El estudio se considera de buena calidad, pero de media relevancia para el objetivo del presente trabajo.

- M_REF.055

  Lizama, M.; Payano, R.; Escorcia, J.; Sendra, G.; Jiménez, N.; Pérez, D.; Benavente, O. (2016). Diagnóstico de disponibilidad hídrica en cuencas Alto-Andinas de la región de Atacama, fase 3. Informe final. AMPHOS 21. S.I.T. N. º 398, DGA.

Referencia de relevancia en la que se analizan datos propios de 35 muestras y un total de 133 ensayos. En el informe se muestra la localización de las mismas y sirven para extraer conclusiones relevantes de los diferentes ambientes de recarga de la zona de estudio. El estudio debe ser evaluado a nivel regional, puesto que, de forma más local, no existen datos en la cuenca de Piedra Pómez, mientras que la información con respecto al Salar de Maricunga no resulta excesivamente relevante por la escasa información que se ha podido recopilar en los salares. Por el contrario, en el trabajo se obtienen conclusiones relevantes con respecto a los ambientes de recarga. En el estudio se realiza una buena caracterización del agua superficial y subterránea del área de estudio, y se llega a conclusiones relevantes con respecto al origen del agua y a la evolución de la conductividad eléctrica. Adicionalmente en el estudio se compara la calidad de las aguas, con la normativa de riego y de consumo de agua. El presente trabajo es de buena calidad.

En particular, se incluyó una recopilación de gran parte de los antecedentes previamente citados, incorporando además una campaña en la que se colectaron 9 muestras, 4 de las cuales se tomaron

desde fuentes superficiales (estero, río, lago/laguna), 2 desde humedales y 3 desde fuente subterránea (pozos o piezómetros). El análisis de estas muestras, incluyó tanto la concentración de elementos mayoritarios, metales y no metales minoritarios, e isótopos de oxígeno y deuterio.

2.8 Análisis y revisión de los isótopos

Los estudios más relevantes que hacen referencia al conocimiento isotópico de las aguas de la zona de estudio, corresponden a los siguientes trabajos:

- M_REF.034

  Risacher, F., Alonso, H., Salazar, C. (1999). Geoquímica de aguas en cuencas cerradas: I, II y III regiones-Chile. DGA-UCN-IRD. S.I.T. N°51.

En este documento se pueden encontrar datos relativos a la caracterización isotópica regional. En el informe se plotea en un diagrama los fraccionamientos isotópicos de las aguas de la zona, las alturas topográficas de las muestras vs el contenido isotópico, además de las composiciones isotópicas de las aguas superficiales, como otros datos interesantes a la vez que relevantes para el presente estudio. En total se caracterizaron 126 muestras de la región, 82 de análisis anteriores, 44 análisis propios del estudio y 3 muestras específicamente recogidas en la zona del Salar de Maricunga. El trabajo presenta una buena calidad y una buena relevancia de cara al presente estudio.

- M_REF.009-6.

  Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental (DIHA), Pontificia Universidad Católica de Chile (2009). Levantamiento hidrogeológico para el desarrollo de nuevas fuentes de agua en áreas prioritarias de la zona norte de Chile, regiones XV, I, II Y III. Etapa 2. Informe final parte VI. Campañas de Muestreo Geoquímicos e Isotópicos. S.I.T.N°195, DGA.

En este estudio se analizan 19 muestras nuevas y 3 antiguas, de otros proyectos. En la interpretación de las mismas se remarca los procesos de evaporación desde el terreno y en superficie libre que han padecido las aguas. El trabajo presenta una buena calidad a efectos del presente proyecto.

A modo de conclusión, existen suficientes datos como para realizar una buena caracterización isotópica de las aguas presentes en la zona de estudio. La toma de muestras se realizó en una campaña de terreno y únicamente se recogieron muestras de aguas superficiales. La información en todos los documentos expuestos en la bibliografía, presenta una buena calidad, una relevancia media e interesantes conclusiones con respecto al origen de las aguas subterráneas y con respecto a su altitud de recarga.

- M_REF.030

  Vargas Paysen, J. (2013). Diagnóstico de disponibilidad hídrica en cuencas Alto - Andinas de la región de Atacama. Informe final. DGA-Aquaterra.

Toda la información disponible en el presente informe, ha sido extraída de los estudios de DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA Y AMBIENTAL PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE y de la EIA Lobo Marte (M_REF.036 y M_REF.037, y M_REF.028, respectivamente). En el Anexo 8-1 se encuentra recopilada la información de isotopía de los documentos mencionados. Las conclusiones más importantes hacen referencia al fraccionamiento isotópico característico de las aguas, bien ajustado a la línea meteórica local, y a la presencia de aguas que se ajustan a las líneas de evaporación desde lámina libre y desde el terreno. El trabajo presenta una buena calidad y es de relevancia media para el presente proyecto.

- M_REF.055

  Lizama, M.; Payano, R.; Escorcia, J.; Sendra, G.; Jiménez, N.; Pérez, D.; Benavente, O. (2016). Diagnóstico de disponibilidad hídrica en cuencas Alto-Andinas de la región de Atacama, fase 3. Informe final. AMPHOS 21. S.I.T. N. º 398, DGA.

Referencia de buena relevancia en la que se analizan datos propios de 35 muestras, en zonas adyacentes al Salar de Maricunga. En el trabajo se analizan diferentes composiciones isotópicas de trabajos anteriores, con análisis de muestras superficiales y subterráneas. En el informe se muestra la localización de las mismas y sirven para extraer conclusiones relevantes de los diferentes ambientes de recarga de agua subterránea presentes en la zona de estudio. El trabajo resulta de buena calidad.

2.9 Análisis y revisión del balance hídrico

Existen numerosos documentos que hacen referencia al balance hídrico. Las más relevantes para el presente estudio son las siguientes:

- M_REF.006

  IPLA Ingenieros Consultores (1984). Balance hidrológico nacional regiones III y IV. DGA.

Este estudio constituye una referencia para la comprensión del balance hídrico a nivel regional, en el que se estudian todas las componentes del balance con detalle. En el estudio se desarrolla la ecuación de continuidad para el cálculo de los diferentes componentes del balance. El trabajo es de gran relevancia por su alcance regional, y como base de comparación en estudios actualizados.

- M_REF.048

  Teck-MDO (1998). Estudio hidrológico del Salar de Maricunga. Exploración y desarrollo de recursos de agua S.A.

Este estudio desarrolla el balance en la cuenca de Salar de Maricunga a partir de la ecuación de la continuidad. La evapotranspiración se determina a partir de Turc y la precipitación por correlación lineal. Al final se realiza un esquema del balance hídrico de la zona, con todas las componentes y un valor para cada una de ellas.

- M_REF.008

  Johnson, J. (2009). Evaporación desde napas freáticas someras en cuencas endorreicas del altiplano chileno. Tesis de Magister en Ciencias de la Ingeniería. Pontificia Universidad Católica de Chile.

Documento que define metodologías de cálculo de la evaporación en función de la profundidad del freático, con datos específicos sobre la evaporación en el Salar de Maricunga.

- M_REF.019

  DGA (2012). Estimación de recarga en cuencas altiplánicas, Región de Atacama. Versión Corregida. División de estudios y planificación, SDT N°334.

Se define una metodología propia para la estimación de la recarga en los acuíferos, a partir de una metodología propia. En el documento se analizan con detalle los diferentes elementos para el cálculo del balance.

El documento aporta información relevante para los fines de balance hídrico estudio.

- M_REF.016

  Vargas, J. et al., (2011). Estimación de recarga en cuencas altiplánicas, región de Atacama. AQUATERRA ING. Ltda. S.I.T. N°251, DGA.

En el documento se determina el balance hídrico para el Salar de Maricunga, a nivel de balances mensuales, con datos de precipitación media anual y la escorrentía. Se obtiene que la recarga neta corresponde al 40 % del caudal observado, si el caudal subterráneo en la sección de medición del caudal es despreciable, o sumando el caudal subterráneo, si existiese. El documento no asigna un valor estimado para las cuencas objeto de esta investigación. Al final del estudio se expone un diagrama explicativo de los diferentes componentes del balance en un esquema detallado.

- M_REF.055

  Lizama, M.; Payano, R.; Escorcia, J.; Sendra, G.; Jiménez, N.; Pérez, D.; Benavente, O. (2016). Diagnóstico de disponibilidad hídrica en cuencas Alto-Andinas de la región de Atacama, fase 3. Informe final. Cuenca N°28: Salar de Maricunga. AMPHOS 21. S.I.T. N. º 398.

- M_REF.055

  Lizama, M.; Payano, R.; Escorcia, J.; Sendra, G.; Jiménez, N.; Pérez, D.; Benavente, O. (2016). Diagnóstico de disponibilidad hídrica en cuencas Alto-Andinas de la región de Atacama, fase 3. Informe final. Cuenca N°29: Salar de Piedra Pómez. AMPHOS 21. S.I.T. N. º 398, DGA.

En ambos estudios se define el balance hídrico a partir de la ecuación de continuidad. En el proyecto se expone un buen análisis de los diferentes componentes del balance hídrico, además de exponer las diferentes especificaciones para los diferentes instrumentos instalados para realizar el cálculo de la evaporación. Estos trabajos presentan una buena calidad y una alta relevancia para el presente proyecto.

La información de los estudios presenta una buena calidad, a pesar de las suposiciones que se debe de realizar para apoyar los datos de los balances, se encuentra bien justificada en los diferentes documentos. En la M_REF.016 se encuentra un interesante ejercicio de cálculo, que además presenta un buen esquema del balance final de la cuenca. La M_REF.048 también presenta un buen detalle del desarrollo de los diferentes cálculos, para finalizar en un completo detalle del balance hídrico de la cuenca, de la misma manera que se desarrolla en la M_REF.055.

A pesar de que en la mayoría de documentos se exponen diferentes metodologías de cálculo que se centran primordialmente en la presentación de la cuantificación del balance (M_REF.018, M_REF.019 y M_REF.048), existen un par de estudios muy interesantes para el cálculo de diferentes elementos del balance hídrico. El primero por consistir en un cálculo antiguo del balance hídrico de la zona (M_REF.006) y, el segundo, por constituir una acertada metodología de cálculo de la evaporación en función de la posición del freático en el terreno (M_REF.008).

Es remarcable la referencia M_REF.055 por un doble motivo. Además de tratarse de una de las referencias más actuales con respecto a la determinación del balance en la zona de estudio, presenta uno de los rangos con mayor certeza en el cálculo, debido a la estimación de los diferentes factores que intervienen en el balance. En todo caso, los estudios referenciados presentan una alta relevancia para el presente proyecto.

2.10 Análisis y revisión de los modelos numéricos

Los documentos en los que existe modelación numérica de la cuenca del Salar de Maricunga, son los siguientes:

- M_REF.029

  Andina Minerals (2012). Estudio hidrogeológico Salar de Maricunga, proyecto Volcán.

  Andina Minerals (2012). Estudio hidrogeológico Salar de Maricunga, proyecto Volcán.

En este trabajo se discretizaron los elementos de la geometría en una malla de 200 x 200, con una sola capa verticales. La zona cubierta por el estudio corresponde al sector sur del Salar de Maricunga. La recarga se definió únicamente por el aporte del río Lamas y de la quebrada Ciénaga redonda. El modelo se calibró en régimen estacionario con las observaciones realizadas en 5 puntos, y las principales condiciones de contorno fueron de evapotranspiración y la descarga en Maricunga a partir de unos drenes. Según lo especificado en el informe, el modelo se encuentra adecuadamente calibrado para la representación de los diferentes escenarios:

1. Según el escenario actual, se produce un ligero descenso con los bombeos actuales, para posteriormente recuperar los niveles a largo plazo.
2. Según el siguiente escenario de explotación, se prevé un descenso continuado de los niveles hasta el final de los bombeos. Posteriormente la recuperación no llega a alcanzar los niveles originales.

En el mismo trabajo se puede consultar otro modelo numérico representativo del acuífero de la zona Barros Negros – Ciénaga Redonda. De la misma manera que el anterior, este se realizó en VISUAL MODFLOW, representando una superficie de aproximadamente 15 x 5 km, con una capa vertical. El tamaño de la malla es de 50 x 50 m.

En una visión preliminar, se puede observar que se determinan unas buenas condiciones de contorno, con la generación de las entradas en el modelo a partir de aportes laterales por pozos de inyección, y las salidas a través del nivel de carga constante del norte del modelo y la evaporación por las vegas de Barros Negros y la Ciénaga Redonda. De la misma manera, en la calibración, se consigue un buen intervalo de confianza a partir de la reproducción de niveles en los 32 sondajes donde se tiene registro de niveles.

Una vez calibrado, el modelo es capaz de reproducir las condiciones a las que se encuentra sometido el acuífero, de bombeo de las diferentes operaciones mineras. El resultado final pronostica la disminución de salida a partir de la evaporación en el Salar de Maricunga y el aumento de las fluctuaciones de niveles de agua subterránea.

- M_REF.048

  Teck-MDO (1998). Estudio hidrológico del Salar de Maricunga. Exploración y desarrollo de recursos de agua S.A.

En el estudio se utilizó el código MODFLOW para evaluar los efectos a corto y largo plazo causado por el bombeo de unos pozos instalados de MDO y MSR. Con esta finalidad, se desarrolló, calibró y utilizó un modelo para realizar unas simulaciones de bombeo y recuperación en el área. La zona cubierta por el estudio corresponde al sector sur del Salar de Maricunga. Las características principales del modelo realizado son las siguientes:

1. Las entradas al acuífero se definieron con de manera bastante completa (Quebrada Pastillos, Q. Ciénaga Redonda, Río Lamas, Q. Colorado y Zonas intermedias).
2. Los mecanismos de descarga del agua subterránea (evapotranspiración y flujos subterráneos hacia el centro del salar), también fueron definidos de forma correcta.
3. La geometría del modelo se definió a partir de unos perfiles geofísicos gravimétricos, una serie de sondajes de resistividad, la topografía y seis perforaciones, a partir de las cuales, se definieron los niveles geológicos presentes en la zona.
4. En el mallado del modelo se intercalaron zonas de mayor tamaño de la cuadricula (230 m) con otras mejor discretizadas (40 m) en los lugares de mayor variación del nivel freático.
5. Se definieron diferentes zonas de recarga y condiciones de borde, además del bombeo de unos pozos, para representar de forma correcta las condiciones existentes en los límites del modelo.
6. Finalmente, se utilizaron 11 puntos de control para calibrar el modelo.
7. A partir de los resultados obtenidos, se puede observar que el modelo simula de forma correcta las condiciones del nivel freático.

En ambos casos, la modelación numérica fue de nuevo desarrollada, para observar los efectos en la zona del bombeo que se produce en las operaciones mineras adyacentes, y el potencial impacto de un nuevo proyecto minero.

Asimismo, los modelos, realizados en la plataforma VISUAL MODFLOW, resultan correctos, sencillos y son capaces de dar respuesta a la inquietud por la que fueron generados. Las condiciones de contorno implementadas resultan válidas para cumplir con el objetivo del trabajo. Utilizan diferentes puntos de observación y de bombeo, y se logra reproducir la piezometría en la zona de estudio. Sin embargo, debido a la sencillez y al limitado alcance de ambos modelos, no resultarían reciclables para el presente estudio. Por todo lo expuesto, se puede concluir que los estudios presentan una calidad alta, pero una relevancia media para el desarrollo del presente proyecto.

- M_REF.028

  Golder (2012). Construcción y calibración del Modelo Proyecto Lobo Marte - modelos de flujo subterráneo. Anexo P-T010, Anexo P-T011, Anexo P-T012 y Anexo P-T013.

Proyecto en el que se realizaron diferentes modelos a diversas escalas de detalle con el objetivo de evaluar las condiciones regionales del agua superficial y subterránea en el proyecto Lobo Marte:

1. Un primer modelo de escala Subregional en el que se modelan los flujos de las subcuencas de Villalobos, Valle Ancho en la Barrera y Salar de Maricunga. En este modelo se intentan simular los elementos que controlan el flujo de agua subterránea, de manera que se pueda alimentar el segundo modelo con las condiciones de contorno.

2. Un segundo modelo de escala local en el que se encuentra simulada el flujo de agua subterránea en la vega de la Ciénaga Redonda, para reproducir los efectos del bombeo sobre los niveles de agua y conocer sus efectos en las zonas protegidas.

Modelo subregional de flujo numérico

Modelo que representa el flujo subterráneo del área definida en los puntos anteriores. La modelación se realiza en VISUAL MODFLOW, con una discretización de las celdas comprendida entre 300 x 300 m en las zonas de menor refinado, hasta 100 x 100 m en las zonas de mejor discretización. El modelo presenta 4 capas verticales: las dos primeras en las que se representa el relleno aluvial, y las otras dos en donde se encuentra representado el basamento rocos volcánico e intrusivo.

A partir de unas propiedades hidráulicas y unas condiciones de contorno coherentes con lo definido en el modelo conceptual, se realiza una calibración en estacionario (ver Figura **2**-**2**), en donde se obtiene una calibración bastante aceptable, con un error del 4,5%, con una ligera sobreestimación de los niveles de agua subterránea. En el modelo se analiza por separado las diferentes subcuencas representadas, realizándose un análisis de sensibilidad para los parámetros que eran más importantes para controlar el flujo de agua subterránea y determinar la representatividad de cada uno de los parámetros en los resultados de la modelación. Los valores determinados en las proximidades de la vega de Ciénaga Redonda, sirvieron para introducir las condiciones de contorno en el modelo local.

Modelo local de flujo numérico

En el modelo local se representó la zona del acuífero local y de la vega de Ciénaga Redonda, donde se modeló el acuífero aluvial en el código de modelación VISUAL MODFLOW, con una discretización de los diferentes elementos de mayor detalle (100 x 100 en las zonas periféricas, hasta 10 x 10 en las zonas en donde las condiciones del modelo lo ameritaban). A partir de unas permeabilidades y condiciones de contorno coherentes con el modelo conceptual y determinadas a partir del modelo subregional, se realizó una calibración con un buen ajuste y con valores de permeabilidad congruentes con los previstos.

A partir de la calibración y la validación del modelo, se estuvo en condiciones de implementar los diferentes escenarios en el modelo para la evaluación de diversos impactos:

- Impactos en los niveles a partir de diferentes escenarios de bombeo y recuperación.
- Impactos de la puesta en marcha del proyecto Lobo Marte sobre los recursos de agua.
- Impactos en el medio a partir de la modelación de la infiltración de productos en la zona de la pila de lixiviación.

Estos modelos presentan son de gran calidad para la representación de las condiciones hidrogeológicas en la zona de estudio debido a la buena cantidad de datos utilizados para la modelación, la coherencia de los mismos con lo especificado en el modelo conceptual y el nivel de desarrollo alcanzado en las

simulaciones. De la misma manera, el modelo presenta una gran relevancia para el presente proyecto, debido principalmente al alcance del mismo, en el que queda representado el flujo de agua subterránea prácticamente en la totalidad de la cuenca objeto del estudio.

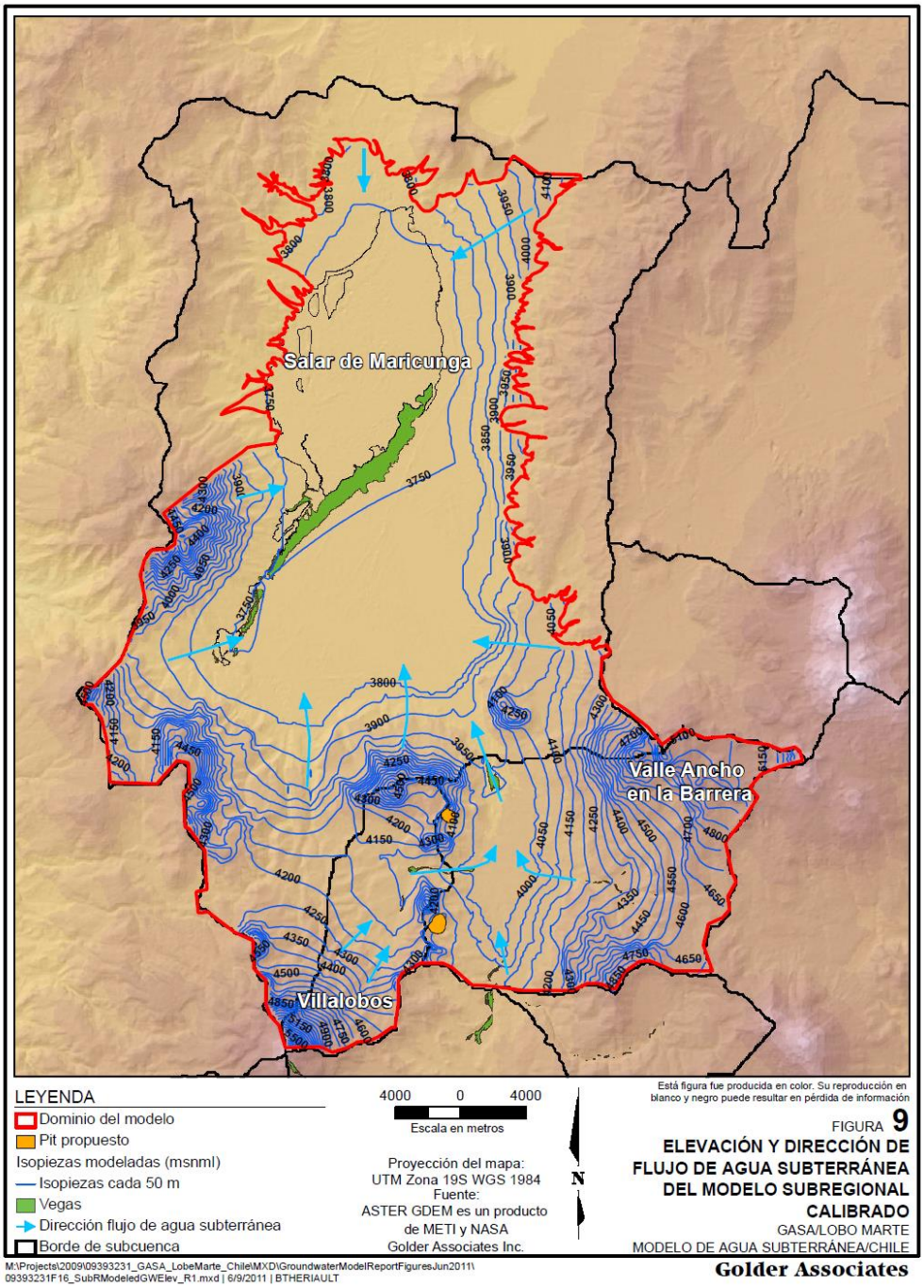


Figura 2-2: Piezometría cuenca Salar de Maricunga.

Fuente: Golder Associates.

2.11 Síntesis y recomendaciones de la valoración de los antecedentes

A partir de la revisión de los antecedentes, se ha podido clasificar y compilar la información que alimentará el Modelo Hidrogeológico Conceptual. Con el análisis y revisión de los antecedentes se han construido bases de datos mediante las cuáles, se han inventariado puntos de agua, datos y registros pertenecientes a éstos e información de niveles en pozos y/o sondajes. Lo anterior ha servido para unificar los datos presentados por otros autores y georreferenciar en un sistema de información geográfica (SIG) los registros, con el objetivo de determinar si existen sectores donde no hay información hidrogeológica o ésta no es suficiente para construir el modelo conceptual. Además, de cada referencia bibliográfica se ha extraído una ficha que la caracteriza. Por tanto, toda esta información compilada, servirá de base para la elaboración del modelo conceptual en el presente trabajo y también para futuros.

En general se concluye, que mediante la revisión y análisis de los antecedentes (tabla 2-1) se ha logrado obtener información relevante de cada área temática definida (geología/geofísica/hidrología /hidrogeología/modelos numéricos). En definitiva, dichas materias constituyen la base para elaborar el modelo conceptual hidrogeológico de la cuenca. A continuación, se presenta una valoración de cada área temática:

- Geología: la información geológica recopilada en la cuenca del Salar de Maricunga resulta de buena calidad y suficiente a efectos de caracterizar geológicamente el área de estudio.
- Geomorfología: la información recopilada resulta correcta y suficiente para la consecución del presente estudio. En este caso, los antecedentes son de dos tipos: unos que tratan más la materia a nivel regional, definiendo las características geográficas regionales de la zona de estudio, y otros, a escala más local.
- Meteorología: en general la bibliografía recopilada resulta de calidad media para el estudio de la cuenca Salar de Maricunga, pero de relevancia media, debido a las pocas estaciones (y que además son privadas), que existen en la zona del salar.
- Geofísica: existen una gran cantidad de trabajos en la zona de estudio, los cuales cubren una gran parte de la zona de estudio.
- Hidrogeología: los mapas del SERNAGEOMIN recopilados en los antecedentes, muestran una detallada cartografía hidrogeológica de las dos cuencas en las que se definen las unidades hidrogeológicas, aportando datos de la geología en sección, de la profundidad de la cuenca y otros parámetros relevantes para el presente estudio. La información que aportan ambos estudios resulta base para el proyecto actual, pudiéndose clasificar como de calidad media.

- Hidroquímica e isótopos: En general existe una gran cantidad de bibliografía con gran cantidad de datos para definir la hidroquímica, tanto a nivel local, observando los diferentes tipos de agua y procesos en el salar, como a nivel regional de la interacción entre cuencas.
- Modelos numéricos: Los modelos recopilados presentan una calidad media, puesto que se siguen los criterios y recomendaciones de la guía de modelación (SEA, 2012), aunque tienen un papel de relevancia media a baja para el presente estudio, debido a su alcance.

Finalmente, y de forma resumida, en la Tabla 2-7, se puede consultar en cada una de las diferentes temáticas tratadas en el presente informe, el número de registros disponibles, los sectores donde no existe información y donde no se encuentra disponible y, finalmente, el grado de precisión con el que se podría construir el modelo.

Información de antecedentes		Registros disponibles	Registros NO disponibles	Unidad	Sectores donde NO EXISTE información	Información NECESARIA y NO DISPONIBLE	Grado de precisión para construir el modelo	Justificación del grado de precisión	Recomendaciones
GEOLOGÍA	**Columnas estratigráficas**	146	50-70	ud	Falta información en: - Materiales aluviales que rodean al Salar por el NE hasta el Sur (Llano de Ciénaga Redonda). - Zona de la Pampa Valle Ancho.	Perforaciones del catastro en las que no se ha encontrado registro de la litología de los pozos, como del Proyecto Volcán, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental del la PUC y del Sernageomin. Prospecciones de propiedades mineras de Codelco, SQM, Melissa Godoy, Pablo Rodo y Sociedad Punta de Lobos.	**Regular**	Falta información en determinadas zonas, por lo que no se puede conocer con total precisión la geología del subsuelo.	- Solicitar información a las propiedades mineras enumeradas, con respecto a los estudios de nueva realización y a la otra información no encontrada.
	Mapa geológico (SERNAGEOMIN)	4	1	ud	Existe información geológica en toda la zona.	-	**Óptimo**	La cartografía geológica de la zona de estudio cubre la totalidad de la misma.	- Revisar cartografía geológica actualizada de la hoja Nevado Ojos del Salado.
METEOROLOGÍA	**Estaciones meteorológicas**	22	1	ud	-	1 Estación DGA (Nevado Tres Cruces).	**Bueno**	Si bien la informacion meterorológica acerca de la zona de trabajo no es completa, la informacion disponible en otras áreas cercanas permite la extrapolación de los datos a la cuenca de Maricunga.	- Solicitar a la DGA los datos de la estación de Nevado Tres Cruces. Dicha estación se encuentra operativa pero sus datos no son públicos (hay que descargarlos en terreno o pagar el GOES).
HIDROLOGÍA	**Estaciones fluviométricas**	5	0	ud	Existen registros en los 2 ríos de la cuenca y en 3 de sus quebradas principales, sin embargo no se cuenta con aforos de los cauces que se forman en el sector del salar.	-	**Bueno**	La informacion disponible permite conocer o interpolar la totalidad de datos fluviométricos en la zona de estudio.	- Se recomienda aforar los cauces presentes en el salar (datos propios).
	Lisímetros	4	--	ud	Sector W del salar de Maricunga	--	**Bueno**	A partir de los datos disponibles, se puede cuantificar de forma bastante completa, la evaporación en la zona de estudio.	- A pesar de que existen 4 lisímetros instalados en la zona de estudio, sería recomendable la instalación de un nuevo lisímetro en el Sector W del salar. - De los 4 lisímetros existentes únicamente se dispone información hasta septiembre de 2016. Para disponer de la información actualizada, se debe ir a terreno a recoger los datos.
GEOFÍSICA	**TEM y NanoTEM**	57 / 255.2	15 / 75	perfiles/Km	Falta un mejor conocimiento del entorno del salar.	Potenciales prospecciones de propiedades mineras de Salar Blanco, Codelco, SQM, Melissa Godoy, Pablo Rodo y Sociedad Punta de Lobos.	**Regular**	No se han realizado suficientes prospecciones TEM y NanoTEM para conocer	- Se recomienda solicitar información geofísica a Codelco, SQM, Melissa Godoy, Pablo Rodo y Sociedad Punta de Lobos, una vez esta información sea pública. - Se recomienda la realización de perfiles TEM en el entorno del Salar.
	Gravimetría	146 / 531,1	*	perfiles/Km	Existe información en toda la cuenca.	-	**Óptimo**	Se han realizado una gran cantidad de prospecciones gravimétricas que permiten conocer, o interpolar en las zonas donde no existen datos, la disposicion del basamento rocoso en la zona de estudio.	
HIDROGEOLOGÍA	**Puntos con Niveles de agua**	160	oct-20	ud	Falta información de niveles, principalmente en los materiales aluviales que rodean al Salar por el NE hasta el Sur, y en la zona de la Pampa Valle Ancho.	No hay pozos ni registros en los sectores comentados.	**Bueno**	A partir de los datos obtenidos, se puede obtener una piezometria en casi la totalidad de la zona de estudio.	- Se recomienda realizar pezómetros en las zonas indicadas para disponer de nivles de agua.
	Parámetros hidráulicos	62	*	ud	Falta más información en los materiales aluviales que rodean al salar y desde la vega Barros Negros hasta el sur de la zona de estudio.	Solicitar registros de perforación e informaciones adicionales en estudios con información que todavía no es pública.	**Regular**	No se han realizado suficientes ensayos de bombeo como para conocer el rango total de los parametros hidraulicos en la totalidad de la zona de estudio.	- Se desconoce si los nuevos proyectos incluyen o no, pruebas de caracterización hidrogeológica. Se cree que no se va a disponer de esta información para el presente estudio. - Se recomienda la construcción de nuevas perforaciones en las zonas indicadas y la realización de ensayos de caracterización hidrogeológica.
HIDROGEOQUÍMICA	**Puntos de agua con hidroquímica**	230	*	ud	Existe información prácticamente en toda la cuenca.		**Bueno**	Se han conseguido datos hidroquimicos de un 90 % de las aguas superficiales o subterraneas, de la zona de estudio.	- Se recomienda solicitar información hidroquímica que en el momento de realización del presente estudio, todavía no sea pública.
ISÓTOPOS	**Puntos de agua con isótopos**	7	*	ud	Falta una mejor caracterización isotópica en el centro del salar, en el aluvial del sur del Salar, en la subcuenca de Piedra Pómez y en el sur de la cuenca.	Información de los nuevos estudios de línea base y de impacto ambiental de empresas mineras en la zona.	**Regular**	Los datos isotópicos existentes no permiten conocer la totalidad de los procesos sufridos por el agua superficial o subterránea.	- Se recomienda incluir determinaciones isotópicas en las nuevas campañas de muestreo hidroquímico.

* Se cree que se cuenta con toda la información pública disponible hasta el momento.

Tabla 2-7. Valoración de los antecedentes.

Fuente: elaboración propia.

3. Caracterización hidrológica

En este capítulo se presenta una caracterización hidrológica del área de estudio. Para realizar la caracterización se consideraron los registros de precipitaciones, caudales y evaporación de las estaciones ubicadas tanto dentro del área de estudio como en sus cercanías.

3.1 Caracterización hidrográfica

El área de estudio se compone por las cuencas hidrográficas Salar de Maricunga y Piedra Pómez y, en su conjunto, presenta una extensión de 3.125 km^2. En la Figura 3-1 se muestra la ubicación de la zona de estudio, la red hidrográfica y la delimitación de las cuencas. Con respecto a la delimitación de la cuenca hidrográfica en la DGA, no existen grandes diferencias. Esta redefinición se ha adaptado del relieve DEM de la red JAXA (Alos Palsar), de 12,5 x 12,5 m.

3.1.1 Cuenca hidrográfica Salar de Maricunga

La cuenca hidrográfica Salar de Maricunga tiene una superficie de 2.209 km^2, siendo la segunda cuenca hidrográfica endorreica de mayor extensión en la región de Atacama. Se ubica al sur de la cuenca del Salar de Pedernales y al este de la cuenca del Río Copiapó, siendo colindante con la subcuenca de la Quebrada de Paipote. El salar se encuentra ubicado en la parte norte de la cuenca hidrográfica, con su borde occidental a unos 7 km de la divisoria que la separa de la cuenca de Copiapó. El salar presenta un ancho aproximado de 10 km en su sector norte y se estrecha abruptamente hacia el sur, exhibiendo un ancho variable entre 0,5 y 3,0 km. Su superficie aproximada alcanza los 146 km^2.

Varias quebradas alimentan el salar desde el sur y sureste de la cuenca hidrográfica, donde destacan la quebrada La Coipa, Pastillos y Ciénaga Redonda. Por otro lado, el río Lamas presenta su naciente en el llano de Tres Cruces, desde donde fluye de este a oeste. Los cauces descritos infiltran en el llano de Ciénaga Redonda. Al sur del salar se encuentra la laguna Santa Rosa, que se alimenta de afloramientos de agua subterránea. Un curso superficial nace de esta laguna y corre de sur a norte por el margen oeste del salar en forma permanente hasta la laguna ubicada en el centro de la costra salina. Otras lagunas de menor importancia se localizan en los márgenes del salar, tanto por el este como por el oeste, siendo alimentadas por afloramientos subterráneos.

3.1.2 Cuenca hidrográfica de Piedra Pómez

La cuenca hidrográfica Piedra Pómez se encuentra al oeste de la cuenca hidrográfica de Laguna Verde y al este de la cuenca del Salar de Maricunga. En algunos estudios se ha considerado como parte de ésta última (ej. Risacher et al., 1999). La cuenca hidrográfica Piedra Pómez no presenta salar ni una laguna y sus cauces superficiales se infiltran para luego fluir de forma subterránea hacia sus cuencas vecinas y presenta una superficie de 916 km^2. Las quebradas Nevados del Juncalito y Piedra Pómez son las más importantes de la cuenca hidrográfica y fluyen de norte a sur para luego perfilarse hacia el oeste en la parte final de su recorrido. Las quebradas desaparecen en la parte baja de la cuenca.

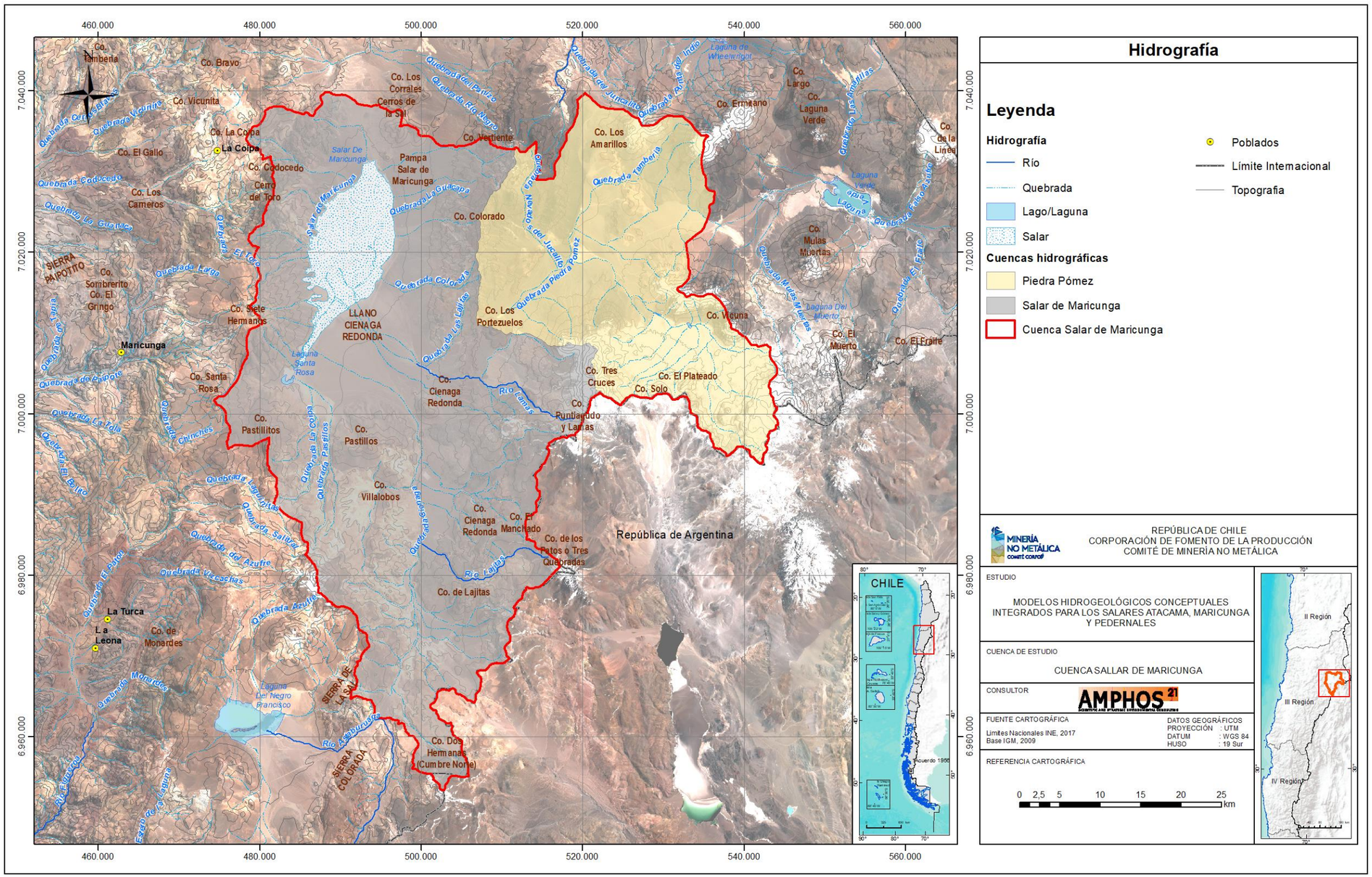


Figura 3-1. Cuencas y red hidrográfica.
Fuente: Elaboración propia.

3.2 Caracterización morfológica

La tabla 3-1 se presenta los parámetros morfológicos de las cuencas hidrográficas estudiadas. La delimitación de las cuencas hidrográficas y los parámetros morfológicos se han obtenido a partir del modelo de elevación Alos Palsar (con fecha 24-12-2010) de la agencia japonesa exploración aeroespacial con resolución de 12.5 x 12.5 m por pixel, el cual es de acceso público y cubre la totalidad del área de estudio. El modelo de elevación digital fue analizado con herramientas de integración espacial en los Sistemas de Información Geográfica (SIG) tales como Hydrology, Surface, Zonal Statistics, Extraction y Raster dataset y manejo de algoritmos *watershed delimitation* disponibles en ArcGIS 10.3. La Figura 3-2 muestra las curvas hipsométricas de las dos cuencas hidrográficas en estudio.

Parámetros morfológicos	**Cuenca hidrográfica**		
	General*	**Salar de Maricunga**	**Piedra Pómez**
Área cuenca [km^2]	3124,7	2208,8	915,9
Atura mínima [m]	3769,0	3769,0	6783,0
Altura máxima [m]	6783,0	6760,0	4380,0
Altura promedio [m]	4518,0	4338,0	4952,4
Pendiente media [%]	20,9	20,5	22,0
Longitud cauce principal [km]	78,3	78,3	46,7
Altura mín. cauce principal [m]	3804,0	3804,0	4451,0
Altura máx. cauce principal [m]	5434,0	5434,0	6302,0
Altura media cauce principal [m]	4215,2	4215,2	4981,0
Pendiente mín. cauce principal [%]	0,0	0,0	0,0
Pendiente máx. cauce principal [%]	52,2	52,2	91,9
Pendiente media cauce principal [%]	8,3	8,3	9,3

Tabla 3-1. Parámetros morfológicos principales del área de estudio.

Fuente: elaboración propia.

(*) Nota: La cuenca general corresponde a la formada por la cuenca hidrográfica Salar de Maricunga y la cuenca hidrográfica Piedra Pómez.

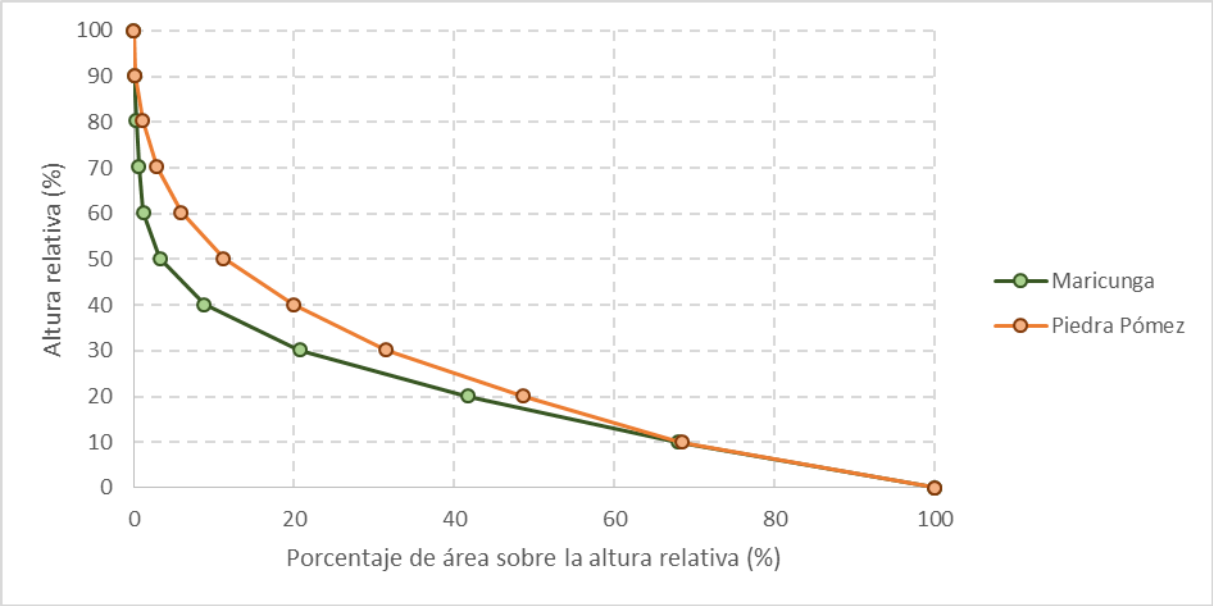


Figura 3-2. Curvas hipsométricas.

Fuente: Elaboración propia.

3.3 Análisis hidrológico

3.3.1 Análisis de la precipitación

A continuación, se presenta el análisis de la estadística de precipitaciones. Este análisis se basa en una recopilación y un análisis de disponibilidad de información. Posteriormente se presentan los estadígrafos principales en cada estación y las series de tiempo en estaciones representativas. Finalmente, a partir de la relación entre altura y precipitación media anual, se construyen curvas isoyetas en las cuencas hidrográficas Salar de Maricunga y Piedra Pómez. El análisis fue realizado considerando que el año hidrológico va desde octubre hasta septiembre.

3.3.1.1 Estaciones meteorológicas

Las estaciones meteorológicas consideradas en este análisis se presentan en la Tabla 3-2. La Figura 3-3 presenta la ubicación de las estaciones. Como es posible observar, el sector de la cuenca del Río Copiapó presenta un número adecuado de estaciones meteorológicas y con una distribución homogénea. Por otro lado, las cuencas Alto Andinas presentan un número menor de estaciones privadas, las cuales están concentradas en la cuenca hidrográfica de la Laguna Negro Francisco, del Salar de Maricunga y del Salar de Pedernales.

3.3.1.2 Disponibilidad de estadística

La disponibilidad de la estadística se presenta en la Tabla 3-2. El registro es amplio y con pocos vacíos de información en las estaciones públicas, ubicadas en la cuenca del Río Copiapó. Por otro lado, el registro en la zona de las cuencas Alto Andinas es de corta duración y ninguna de las estaciones presenta más de 3 años con registros continuos. Considerando esto, se puede decir que la cobertura y extensión del registro es buena para la cuenca de Copiapó, mientras que el registro es de baja calidad en las cuencas Alto Andinas.

Código BNA	Nombre Estación	Coordenada este (WGS84)	Coordenada norte (WGS84)	Elevación m.s.n.m.	Fuente
03210001-5	Las Vegas	433.572	7.048.666	2.250	BNA
03340001-2	Caldera	319.753	7.004.222	15	
03404002-8	Jorquera en la Guardia	425.650	6.920.649	2000	
03414002-2	Iglesia Colorada	413.310	6.884.686	1.550	
03421004-7	Manflas Hacienda	404.044	6.887.231	1.410	
03430006-2	Lautaro Embalse	401.119	6.904.410	1.110	
03430007-0	Los Loros	390.289	6.920.567	940	
03431004-1	Elibor Campamento	381.958	6.933.229	750	
03441001-1	Pastos Grandes	443.874	7.000.412	2.260	
03450004-5	Copiapó	368.189	6.970.697	385	
-	Potrerillo	455.118	7.079.939	2.850	(1)
-	Campamento Marte	-	-	4.090	(2)
-	Ambimet	498.348	6.991.350	4.025	(2)
-	Laguna Negro Francisco	476.946	6.961.854	4.136	(1) y (3)
-	Aldebarán 1	-	-	3.450	(3)
-	Aldebarán 2	-	-	3.700	(3)
-	Aldebarán 3	-	-	4.400	(3)
-	Maricunga	486.326	7.000.372	3.852	(4)
-	Pedernales Norte	488.306	7.108.827	3.417	(4)
-	Pedernales Sur	493.056	7.049.016	3.774	(4)
-	Nevado Tres Cruces	482.408	7.004.564	3.784	(5)
-	Salar de la Isla (ISL-1)	537.256	7.161.378	3.966	(5)
-	La Ola	494.019	7.071.078	3.550	(6)
-	Los Arroyos	501.854	7.054.150	3.865	(6)

Tabla 3-2. Estaciones meteorológicas.

Fuente: elaboración propia con datos de:

(1): Henríquez (1975)

(2): EIA Proyecto Lobo Marte (2011)

(3): CODELCO (2004)

(4): DGA-DIHA PUC (2009)

(5): DGA-Amphos 21 (2016)

(6) DIA Continuidad Operacional División Salvador (2017)

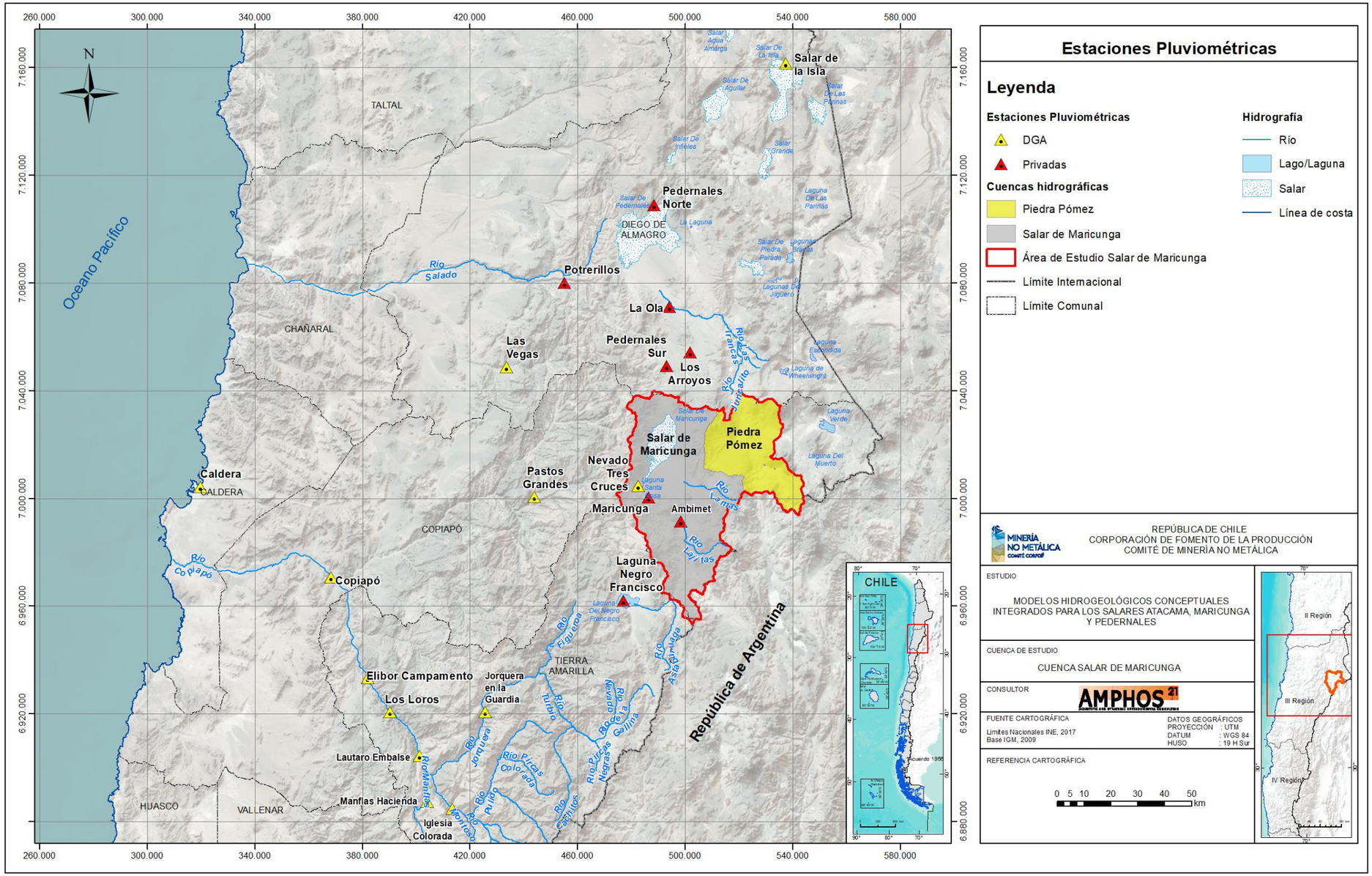


Figura 3-3. Ubicación estaciones meteorológicas.

Fuente: elaboración propia.

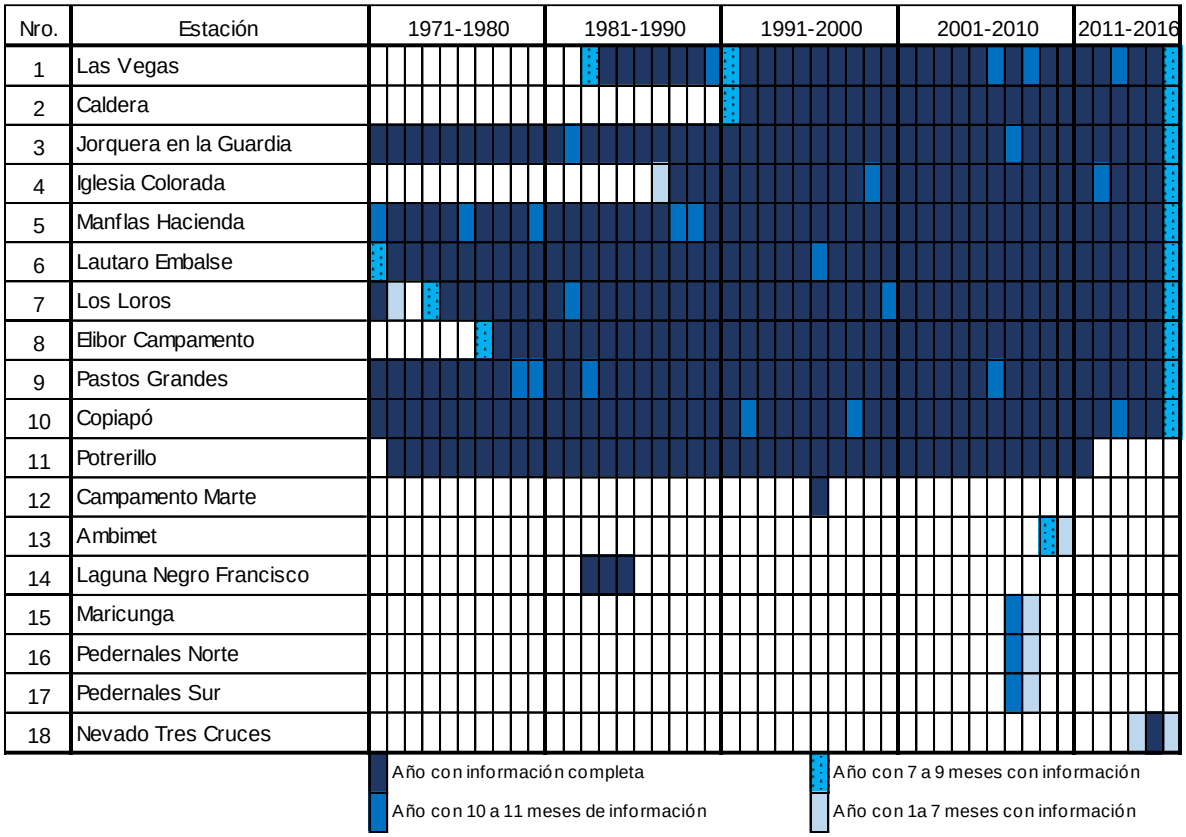


Tabla 3-3. Disponibilidad de información pluviométrica.

Fuente: elaboración propia.

Nota: El registro de las estaciones Potrerillo y Laguna del Negro Francisco se muestra entre los años 1931 a 1976. No se cuenta con el registro de las estaciones de Aldebarán, la Ola y los Arroyos, pero se tiene su valor promedio. El registro de la estación Salar de la Isla (ISL-1) solamente puede ser descargado si se realiza una vistita a terreno, actualmente no se cuenta con él.

3.3.1.3 Estadígrafos y series de tiempo

La Figura 3-4 presenta las series de tiempo de la estación Copiapó (ubicada a 385 msnm), representativa de la parte baja de la cuenca del mismo nombre y de la estación Pastos Grandes (2.260 msnm), representativa de la zona media-alta. Es posible divisar que existe una amplia variación temporal en la precipitación. Se observa la ocurrencia de años relativamente secos, con precipitaciones menores a 20 mm, también se observan la ocurrencia de años especialmente lluviosos (como los años hidrológicos 1986/1987, 1996/1997 y 2014/2016), en donde se supera ampliamente el promedio de precipitación anual en las estaciones. A partir de las series de tiempo presentadas, se puede afirmar que la precipitación presenta una alta variación interanual.

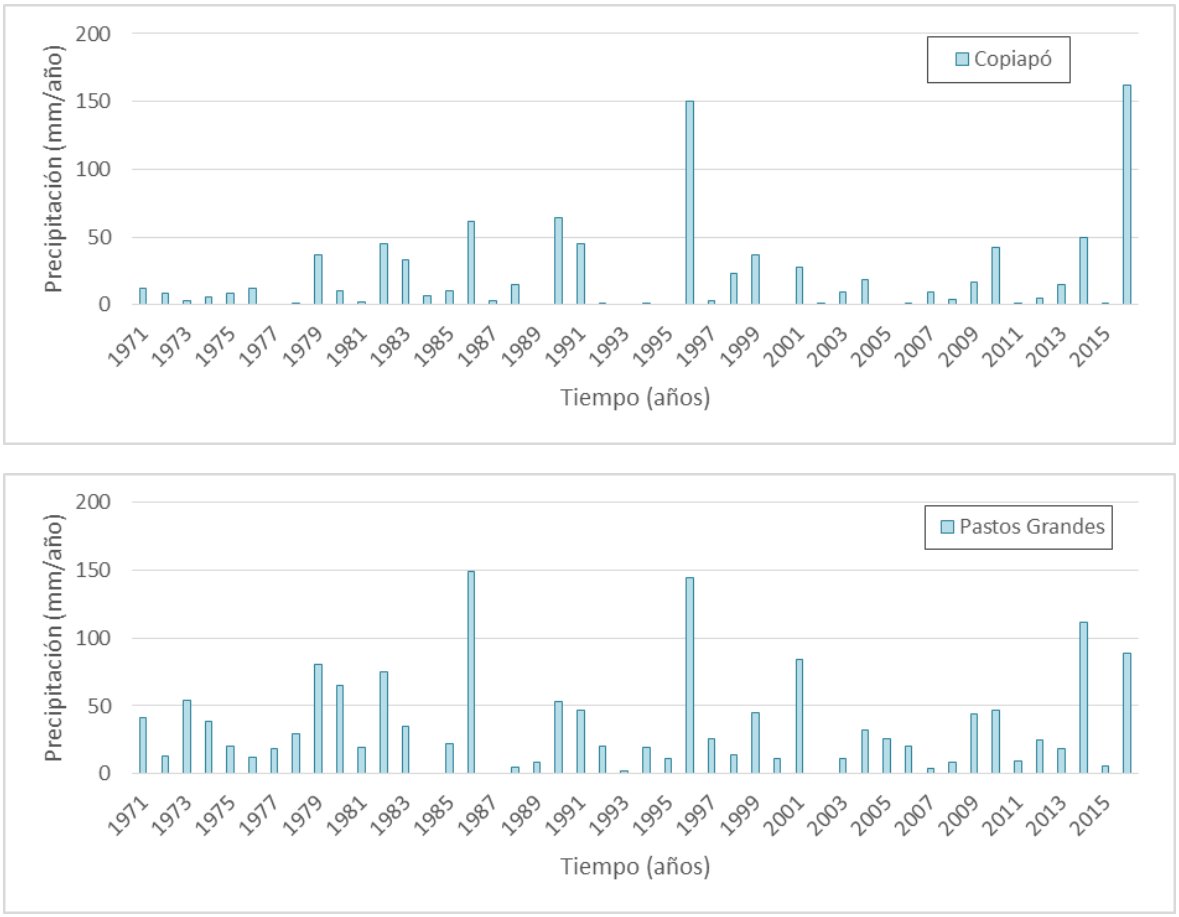


Figura 3-4. Serie de tiempo de precipitación anual (periodo 1971-2016).

Fuente: Elaboración propia.

Considerando la variabilidad temporal que presentan la precipitación anual y lo acotado del registro de las estaciones privadas ubicadas en las cuencas Alto Andinas, se optó por corregir el valor promedio registrado en estas estaciones. Los promedios se ponderaron mediante un factor de corrección que se obtiene dividiendo el promedio en la estación de referencia (Pastos Grandes) por el promedio registrado en la estación de referencia, para el periodo con registros en la estación a corregir. De esta forma se compensa el sesgo asociado a los breves periodos de registro. Se seleccionó la estación Pastos Grandes como patrón, ya que presenta un registro extenso, prácticamente completo y se ubica en la cercanía de las cuencas Alto Andinas. La Tabla 3-4 presenta los estadígrafos principales de las series de precipitación anual en las estaciones públicas, así como el promedio corregido en las estaciones privadas.

Nombre Estación	Promedio		Des. estándar	Mínimo	Máximo
	(mm/año)		-	(mm/año)	(mm/año)
Las Vegas	36		52	0	274
Caldera	13		28	0	134
Jorquera en la Guardia	52		45	7	164
Iglesia Colorada	57		57	1	197
Manflas Hacienda	48		49	0	207
Lautaro Embalse	40		45	0	206
Los Loros	36		45	0	224
Elibor Campamento	28		38	0	201
Pastos Grandes	35		36	0	150
Copiapó	18		27	0	150
Potrerillo	33		-	-	-
Campamento Marte	110		-	-	-
Ambimet	96		-	-	-
Laguna Negro Francisco	106		-	-	-
Aldebarán 1	50		-	-	-
Aldebarán 2	65		-	-	-
Aldebarán 3	150		-	-	-
Maricunga	82		-	-	-

Nombre Estación	Promedio		Des. estándar	Mínimo	Máximo
	(mm/año)		-	(mm/año)	(mm/año)
Pedernales Norte	23		-	-	-
Pedernales Sur	150		-	-	-
Nevado Tres Cruces	22		-	-	-
La Ola	42		-	-	-
Los Arroyos	37		-	-	-

Tabla 3-4. Estadígrafos principales de la precipitación anual.

Fuente: Elaboración propia.

3.3.2 Distribución espacial de las precipitaciones

Se construyó un gráfico que describe la relación entre altura y precipitación media anual (ver Figura 3-5) a partir de los valores obtenidos en la Tabla 3-4. La relación muestra que los datos exhiben 3 comportamientos diferentes. Hasta los 1.600 msnm la precipitación aumenta con una tasa de 28 mm cada 1.000 metros. Posteriormente, se registra un descenso de la precipitación media hasta los 3.400 msnm. Finalmente, sobre los 3.500 msnm la precipitación media anual aumentaría con una tasa elevada, igual a 97 mm cada 1.000 m. La precipitación de las cuencas hidrográficas del área de estudio puede ser descrita con la curva de alta pendiente definida por los puntos azules de la Figura 3-5.

Se compararon la precipitación obtenida de la relación mostrada en la Figura 3-5 con los valores estimados a partir de las curvas isoyetas desarrolladas en el estudio DGA-Amphos (2016). Se encontró que los resultados coinciden favorablemente. Así, se adoptaron las isoyetas desarrolladas en el estudio DGA-Amphos (2016) para distribuir espacialmente la precipitación en el área de estudio. Estas curvas se desarrollaron considerando: a) la estadística hidrológica en estaciones públicas y privadas, b) las herramientas de distribución espacial de ArcGIS y c) realizando una combinación de las isoyetas generadas en los estudios previos (DGA, 1987, 2009). Las isoyetas en el área de estudio se presentan la Figura 3-6.

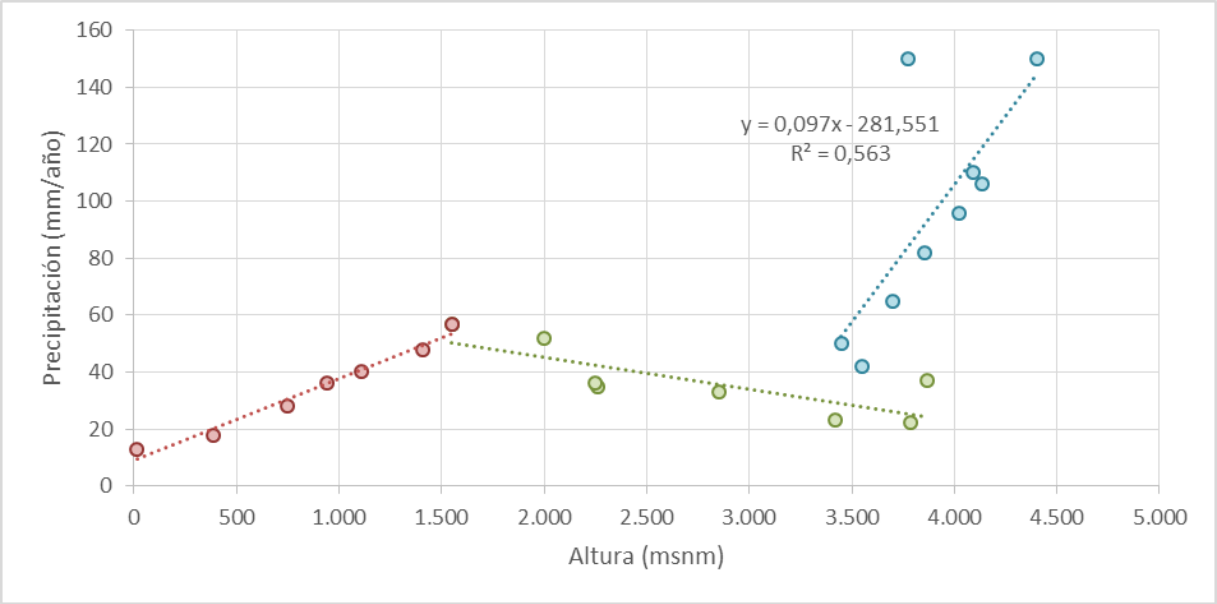


Figura 3-5. Relación de altura contra precipitación media anual.

Fuente: elaboración propia.

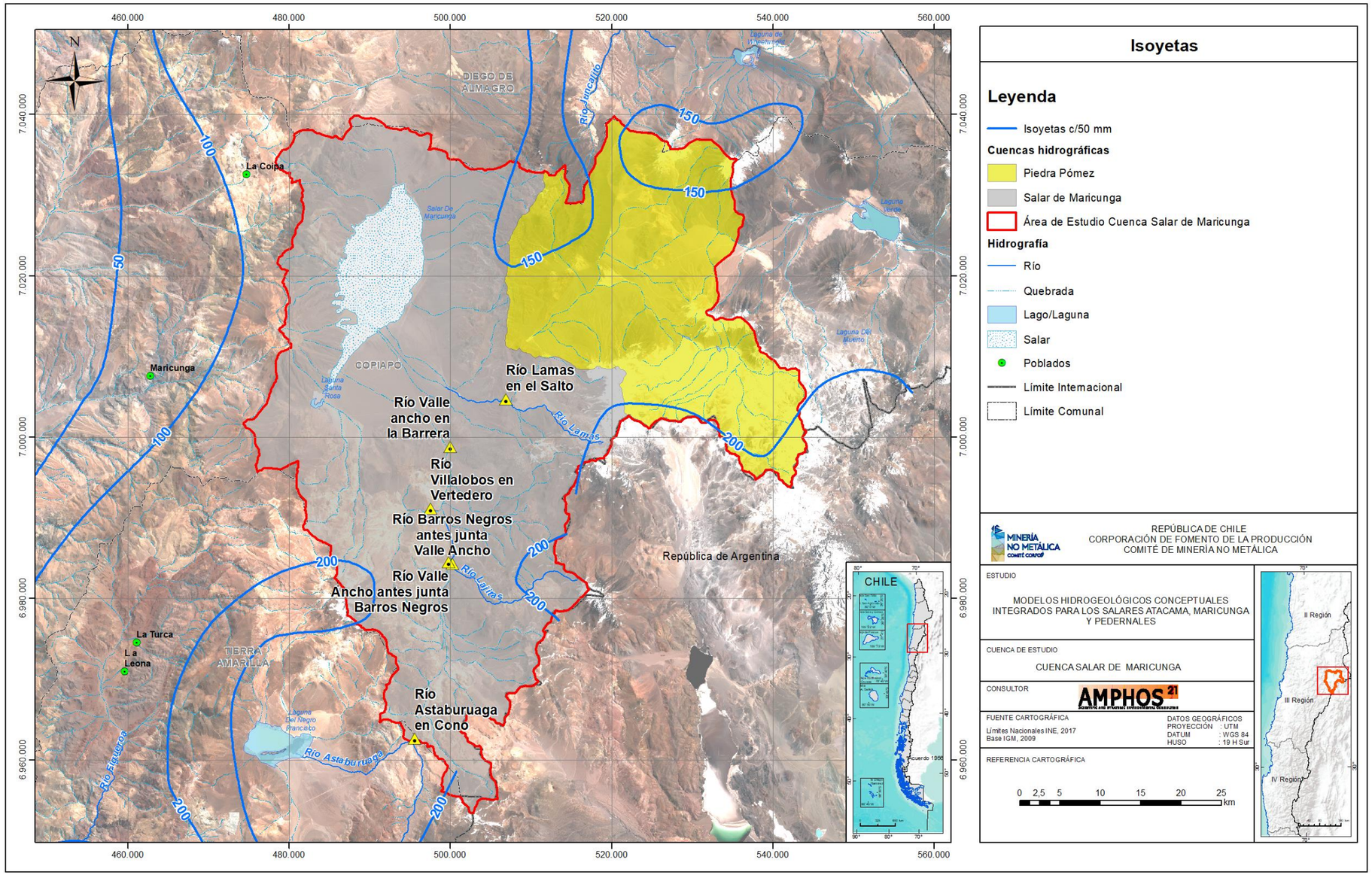


Figura 3-6. Isoyetas de precipitación media anual en el área de estudio.

Fuente: Amphos 21, 2016.

Finalmente, la Tabla 3-5 presenta la precipitación media anual calculada en las cuencas hidrográficas Salar de Maricunga y Piedra Pómez. La tabla permite comparar el valor calculado con estimaciones realizadas en estudios anteriores. Se observa que la precipitación media anual calculada está dentro de un rango similar a los valores obtenidos en los antecedentes.

Cuenca hidrográfica	Altitud	Área	Pp media BHCh (1987)	Pp media DGA-DIHA PUC (2009)	Pp media DGA-Aquaterra (2013)	Pp media Isoyetas (DGA-Amphos 21, 2016)
	(msnm)	(km^2)	(mm/año)	(mm/año)	(mm/año)	(mm/año)
Piedra Pómez	4.952	915,9	171	166	174	165
Salar de Maricunga	4.338	2208,8	167	149	172	155

Tabla 3-5. Precipitación media anual en el área de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

3.3.3 Análisis de escorrentía

Este análisis se basa en una recopilación de la estadística fluviométrica perteneciente a la DGA. Posteriormente, se presentan las curvas de variación estacional de caudales en las estaciones representativas de la cuenca. Se optó por no rellenar la estadística de caudales, ya que la extensión del registro permite estimar adecuadamente los parámetros medios en las estaciones principales.

3.3.3.1 Estaciones fluviométricas

Las estaciones fluviométricas consideradas se presentan en la Tabla 3-6, mientras que la Figura 3-7 presenta la ubicación de las estaciones. Como se puede observar, la cuenca hidrográfica Salar de Maricunga presenta estaciones fluviométricas ubicadas en sus cauces principales. Más aún, el análisis se realiza sobre las cuencas Laguna Negro Francisco y Salar de Pedernales, ya que presentan características similares a la cuenca del Salar de Maricunga, además de contener una estación fluviométrica en cada una.

Código BNA	Nombre estación	Coordenada Este (WGS84)	Coordenada Norte (WGS84)	Elevación (msnm)
03022001-3	Río la Ola en Vertedero	494.019	7.071.024	3.560
03041001-7	Río Barros Negros antes junta Valle Ancho	500.247	6.984.263	3.965
03041002-5	Río Villalobos en Vertedero	497.523	6.991.094	3.850
03041003-3	Río Valle Ancho antes junta Barros Negros	499.725	6.984.479	3.950
03041004-1	Río Valle ancho en la Barrera	499.972	6.998.754	3.800
03041005-K	Río Lamas en el Salto	506.885	7.004.661	4.130
03050001-6	Río Astaburuaga en Cono	495.525	6.962.601	4.130

Tabla 3-6. Estaciones fluviométricas.

Fuente: Elaboración propia.

3.3.3.2 Disponibilidad de estadística

La disponibilidad de la estadística se presenta en la Tabla 3-7. El registro en las estaciones río la Ola en Vertedero, río Villalobos en vertedero y río Lamas en el salto presenta un número importante de años completos. El resto de las estaciones presenta registros extensos, pero con información de 7 a 9 meses, debido a que registran pocos datos en los meses de junio y septiembre.

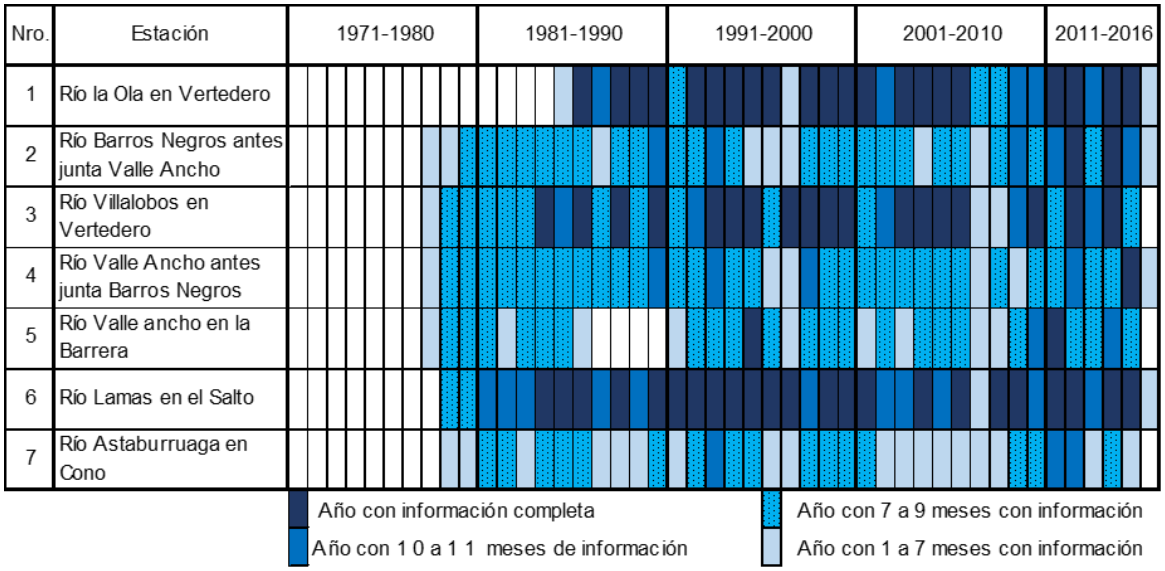


Tabla 3-7. Disponibilidad de información fluviométrica.

Fuente: elaboración propia.

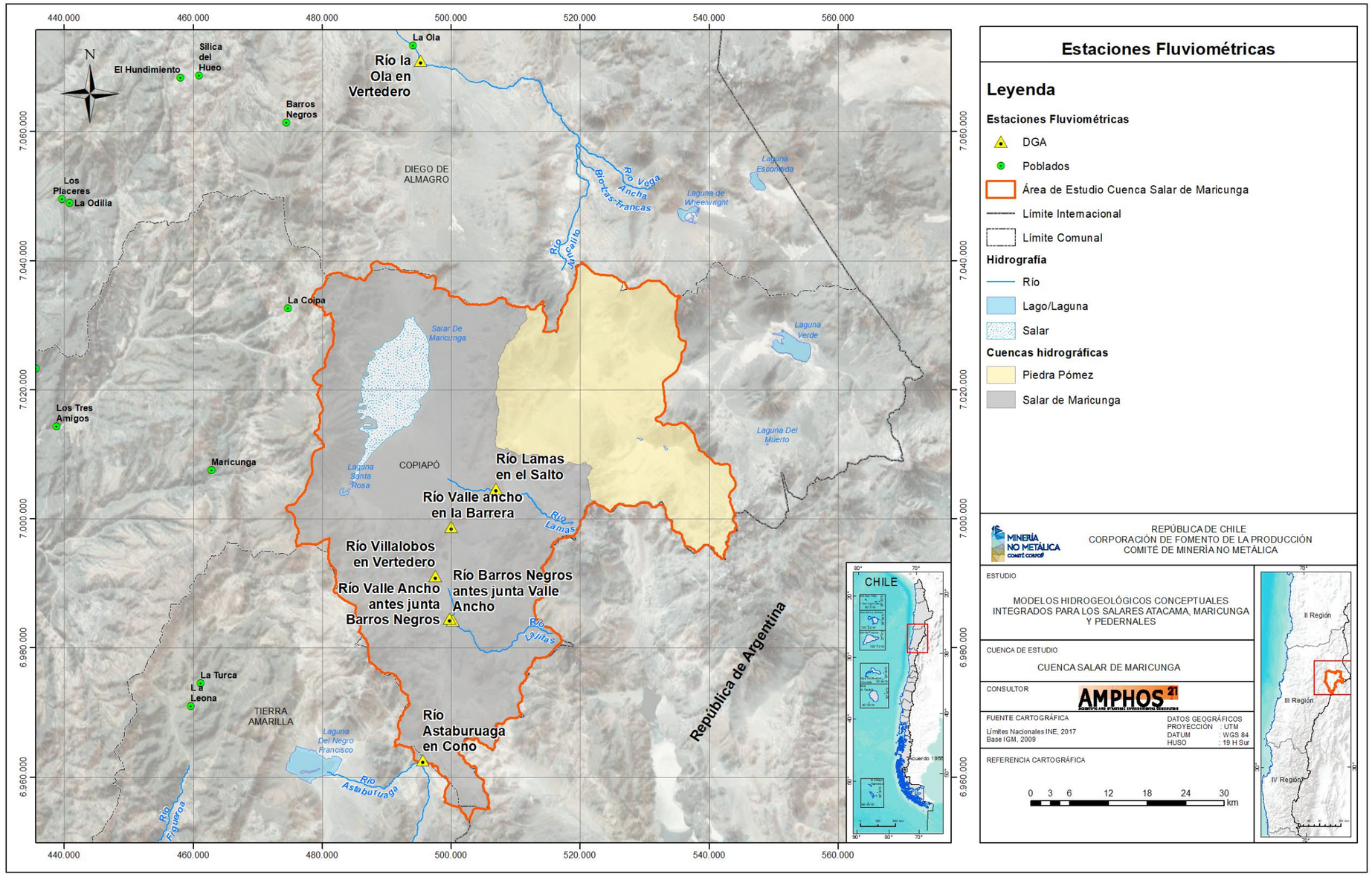


Figura 3-7. Ubicación de estaciones fluviométricas en el área de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

3.3.3.3 Curvas de variación estacional de caudales

Se calcularon las curvas de variación estacional para la estación río Lamas en el Salto y río Barros Negros antes junta valle Ancho. Se ajustaron las distribuciones Gamma 2, Log-Normal, Normal, y Pearson III a los datos de caudal medio mensual. Se realizó un test de bondad de ajuste de Chi cuadrado (5%) cuyos resultados favorecen, levemente, las distribuciones Log-Normal en la estación del río Lamas y la distribución Gamma 2 en la estación del río Barros Negros. Las curvas obtenidas se presentan en la Figura 3-8 y muestran que los caudales se mantienen, relativamente, constantes a lo largo del año. Lo anterior se puede explicar porque los caudales presentarían una componente importante de flujo base y, por otro lado, la precipitación cae principalmente como nieve, generando caudales con bajas probabilidades de excedencia que son comparables con el caudal promedio de cada mes.

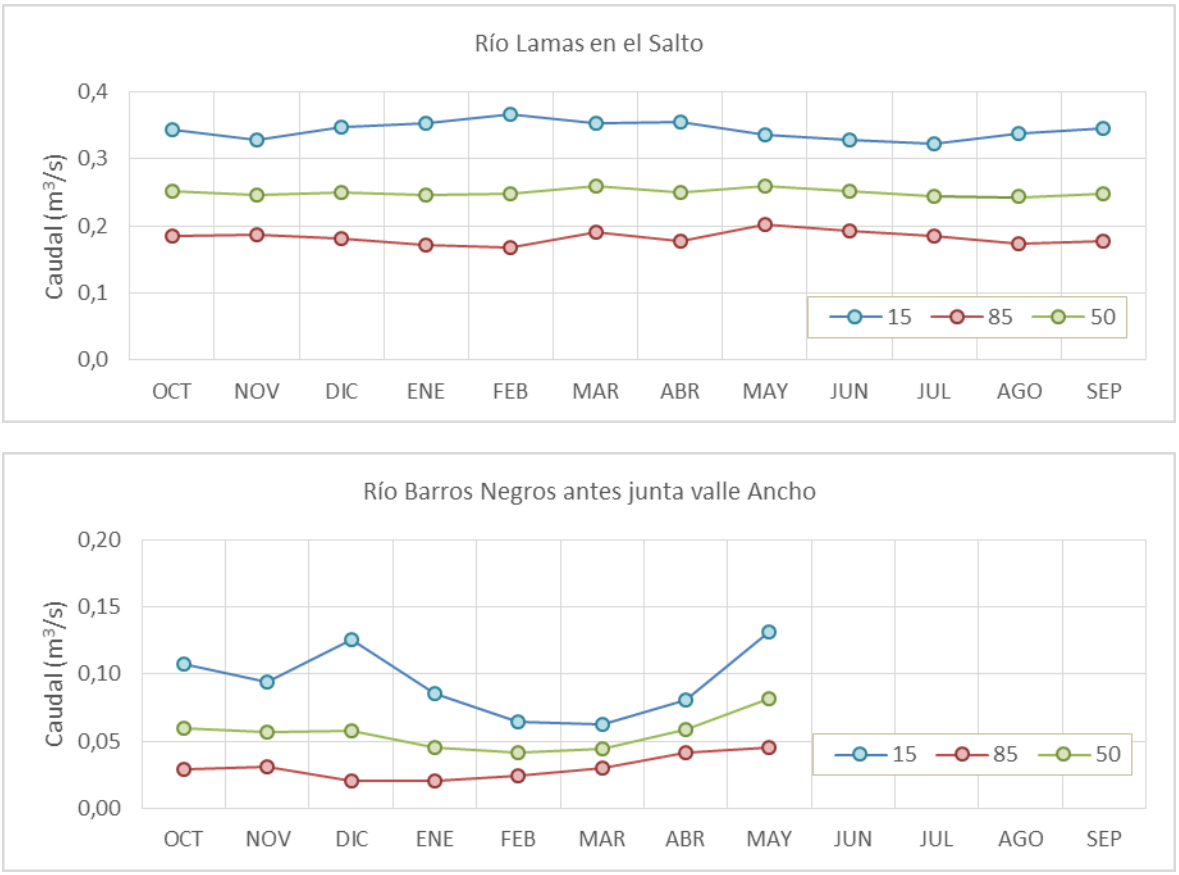


Figura 3-8. Curvas de variación estacional de caudales para distintas probabilidades de excedencia (%).

Fuente: Elaboración propia.

Nota: No se presentan los ajustes para los meses de junio a septiembre en la estación río Barros Negros antes junta valle Ancho, ya que el registro presenta pocos datos en esos meses.

3.3.4 Evaporación

3.3.4.1 Distribución regional de la evaporación

Se recopiló la curva regional de evaporación media anual en función de la elevación presentada por DGA-DIHA PUC (2009). Esta curva se construyó a partir de información meteorológica disponible en las Regiones XV, I, II y III. En base a dicha información, se determinó la relación presentada en la Figura 3-9. La curva muestra que sobre los 3.000 msnm la evaporación va disminuyendo con la altura. Además, se aprecia una variabilidad importante entre los 3.000 y 3.500 msnm.

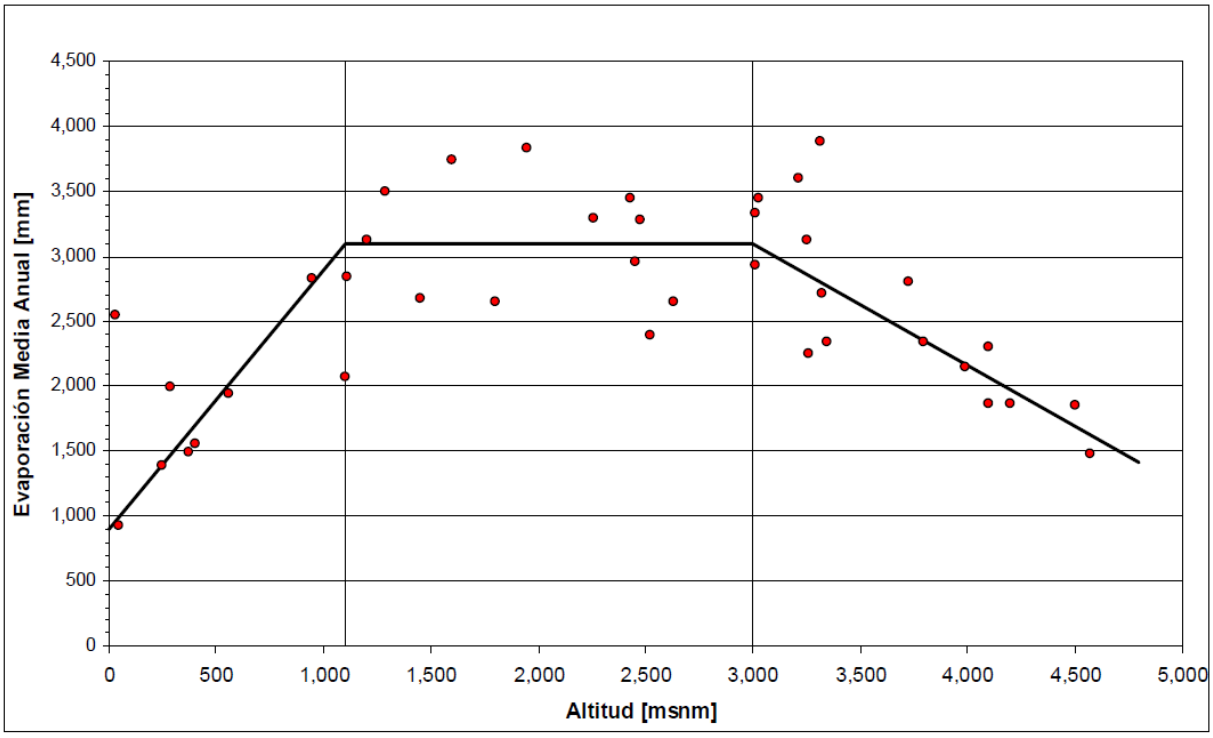


Figura 3-9. Gradiente de la evaporación media anual.

Fuente: DGA-DIHA PUC (2009).

3.3.4.2 Estaciones con medición de evaporación de tanque

Se recopilo la estadística de evaporación de tanque media mensual (mm/día) en las estaciones meteorológicas ubicadas en la cuenca del río Copiapó, ya que las cuencas Alto Andinas no cuentan con estaciones públicas. Por otro lado, se recopilaron las mediciones puntuales realizadas en las cuenca hidrográfica Salar de Maricunga y del Salar de Pedernales realizadas por Johnson (2009). Como es posible observar, todas las estaciones públicas se ubican bajo los 1.550 msnm.

Código BNA	Nombre Estación	Coordenada Este (WGS84)	Coordenada Norte (WGS84)	Elevación (msnm)	Fuente
03414002-2	Iglesia Colorada	413.514	6.885.023	1.550	DGA
03430006-2	Lautaro Embalse	401.640	6.906.043	1.100	
03430007-0	Los Loros	390.492	6.920.905	940	
-	Salar de Pedernales (Z9)	476.891	7.089.135	3.350	(1)
-	Cuenca de Pedernales (Z10)	492.200	7.068.310	3.600	(1)
-	Salar de Maricunga (Z11)	495.581	7.029.345	3.750	(1)

Tabla 3-8. Estaciones con medición de evaporación de tanque.

Fuente: elaboración propia.

(1) Johnson (2009) (Las coordenadas de los puntos tienen referencia PSAD 56).

3.3.4.3 Disponibilidad de la estadística

La disponibilidad de la estadística se presenta en la Tabla 3-9. El registro se muestra, relativamente, incompleto en las estaciones públicas ubicadas en la cuenca del río Copiapó. Pese a lo anterior, se puede considerar que el registro es suficiente para caracterizar la evaporación en la cuenca de Copiapó, ya que esta componente presenta poca variabilidad interanual. Por otro lado, el registro en la zona de las cuencas Alto Andinas presenta una duración de dos días en cada punto. Pese a lo breve del registro, estos datos aportan información significativa, ya que son mediciones directas de evaporación de tanque en la cuenca hidrográfica Salar de Maricunga y en una cuenca vecina (Salar de Pedernales).

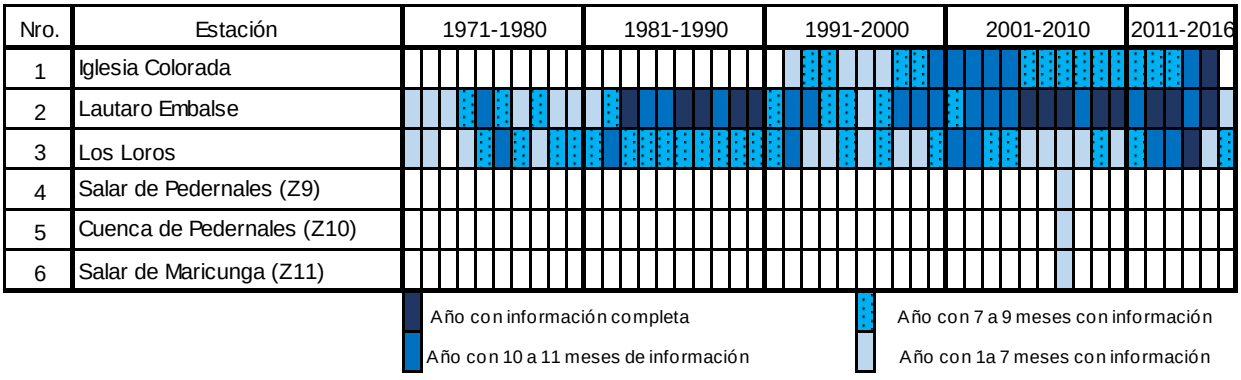


Tabla 3-9. Disponibilidad de información de evaporación de tanque. Nota: El registro realizado por Johnson (2009) en las cuencas hidrográficas Salar de Maricunga y Pedernales se realizó durante 2 días en cada punto.

3.3.4.4 Evaporación media

Se calculó la evaporación media mensual en las tres estaciones pertenecientes a la DGA. El resultado se muestra en la Figura 3-10. Por otro lado, Johnson (2009) registró 8,2 mm/d en los puntos Z10 y Z11, en el punto Z9 el registro fue de 6,5 mm/d. La diferencia entre esta medición y las 2 anteriores puede explicarse ya que durante el primer día de medición en el punto Z9, las condiciones atmosféricas fueron inestables, incluso se registraron precipitaciones leves.

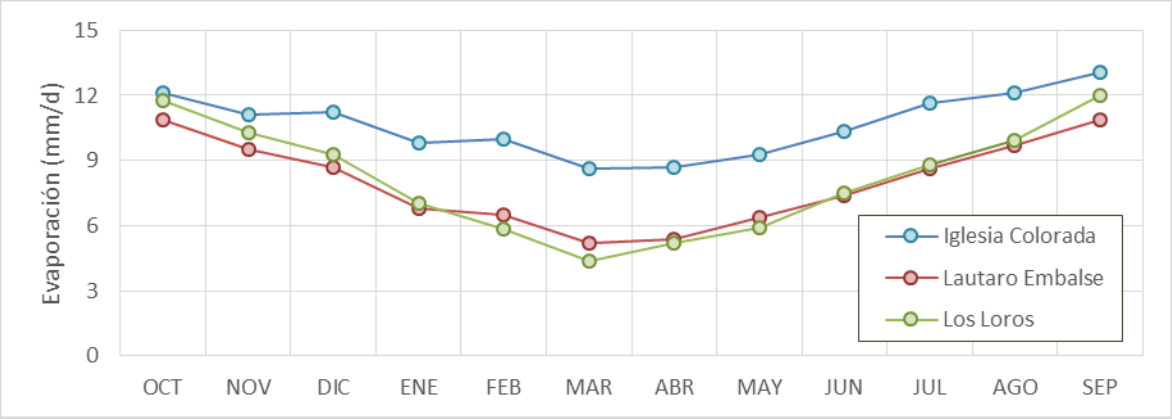


Figura 3-10. Evaporación media mensual en estaciones DGA.

Fuente: Elaboración propia.

Considerando la relación regional y la altura de los puntos de muestreo de Johnson (2009) (entre 3.350 msnm y 3.750 msnm), se puede afirmar que las mediciones de Johnson, de 8,2 mm/d de evaporación de tanque (equivalentes a 2.993 mm/año) están dentro del rango de variabilidad de la curva presentada por DGA-DIHA PUC (2009).

4. Caracterización geológica

4.1 Marco geológico

En un contexto geológico, la cuenca del Salar de Maricunga se enmarca dentro de la denominada Franja de Maricunga, la cual consiste en una provincia metalífera de 200 x 50 km de extensión, desarrollada en un intervalo comprendido entre los 26° a 28° de latitud sur, a cotas entre los 4.000 y los 6.000 msnm. Asimismo, la Franja de Maricunga, se encuentra dividida entre tres subfranjas, claramente diferenciadas entre ellas (Figura 4-1). Enumeradas desde el Oeste hacia el Este, son las siguientes:

1. La primera, que contiene rocas sedimentarias y volcánicas, con edades comprendidas entre el Jurásico Inferior y el Terciario.
2. La segunda, que ocupa el centro de la franja, principalmente formada por rocas volcánicas de edades comprendidas entre el Oligoceno superior y el Mioceno superior, y que albergan las depresiones donde se emplazan los salares.
3. La última, formada por rocas volcánicas del Plioceno, representada principalmente por los volcanes que forman las altas cumbres de la cordillera andina.

Las mineralizaciones de metales preciosos presentes en la franja se producen, predominantemente, en las rocas volcánicas de edad Miocena. Estas formaciones se encuentran emplazadas de forma discordante sobre el basamento Paleozoico y Mesozoico, formado por materiales de naturaleza ígnea y sedimentaria.

La formación de rocas ígneas y volcánicas del Mesozoico y Cenozoico es producto de las características del margen tectónico y del proceso de subducción existente en esta parte del continente, donde algunos centros volcánicos, de tipo estratovolcán, todavía se encuentran activos. En este sector de la cordillera andina, entre los volcanes de mayor altura destacan los complejos volcánicos Copiapó y Ojos de Maricunga, ambos formados durante el Mioceno.

Debido a la tectónica de la zona, se generó una estructura característica en horst y graben, en la que, a partir del sistema de fallas de orientación NNE SSW, aflora una secuencia de basamento con materiales de edades comprendidas entre el Paleozoico superior y el Terciario inferior. Estas estructuras controlan de forma directa la distribución de las rocas y los rasgos geomorfológicos de la cuenca. También generaron las condiciones para la formación de amplias llanuras de inundación o sistemas aluviales, a veces afectados por transporte de material grueso, los que se destacan por la presencia de capas de minerales salinos (principalmente halita), con intercalaciones de arcillas a diferente escala.

Bajo este tipo de condiciones, resulta relativamente común la formación de ambientes deposicionales evaporíticos, comúnmente denominados salares.

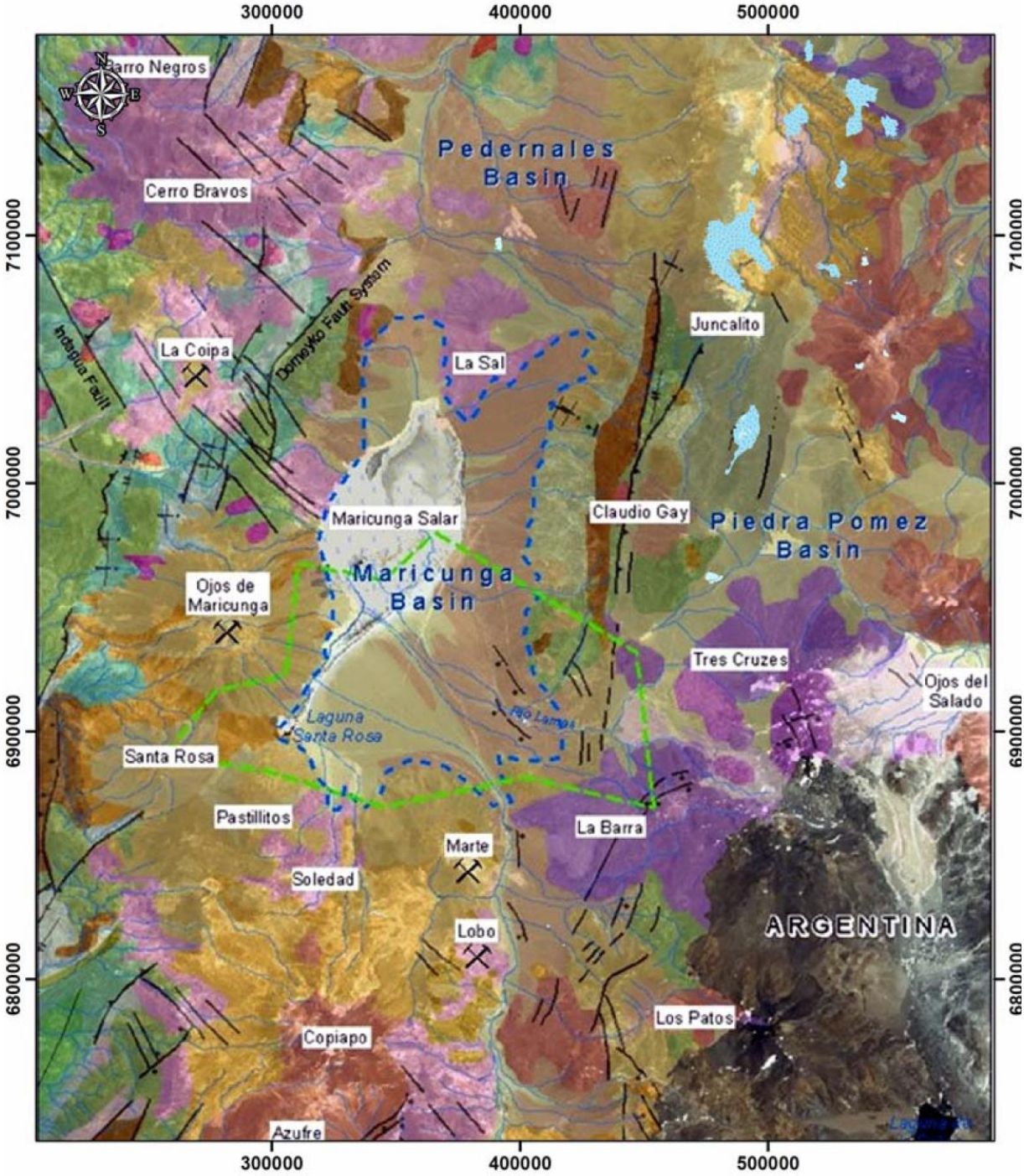


Figura 4-1: Mapa geológico regional del Salar de Maricunga

Fuente: P. Ehren et al., 2017 (M_REF.069).

Las características principales de estos sistemas, son:

1. Corresponden a ambientes donde dominan los procesos de evaporación por sobre la precipitación, condiciones características de climas desérticos.
2. La evaporación se produce, principalmente, debido a la proximidad del nivel freático respecto a la superficie topográfica. Estos sistemas se recargan, principalmente, por agua subterránea.
3. El agua subterránea contiene elevadas concentraciones de iones disueltos, proveniente de la disolución de minerales de las rocas y formaciones circundantes, ya sea por aguas meteóricas, aguas termales y/o lixiviado de evaporitas.
4. Conforman sistemas de cuencas endorreicas (sin afluente superficial)

El Salar de Maricunga corresponde a uno de estos ambientes de deposición. Se encuentra emplazado al Norte de la cuenca homónima, constituyendo una depresión de forma elipsoidal de 140 km^2. El salar, que presenta una forma asimétrica característica, determinada por la tectónica de la región, se encuentra rodeado por rocas volcánicas del Mioceno y Cenozoico, emplazadas al Oeste y Sudoeste, y por depósitos no consolidados del Cuaternario, distribuidos en valles y depresiones colindantes.

4.2 Unidades Geológicas

En la Figura 4-2, se puede observar la geología compilada de la cuenca de Maricunga, con cortes geológicos de detalle de la estructura de la misma (Figura 4-3, Figura 4-5 y Figura 4-6). En los capítulos siguientes, se describen las diferentes unidades geológicas presentes en la cuenca.

Las descripciones de esta sección corresponden a una compilación de la siguiente bibliografía oficial del Sernageomin:

- Gardeweg, M.; Mpodozis, C.; Clavero, J., 1997. Mapa geológico de la Hoja Nevado Ojos del Salado. Servicio Nacional de Geología y Minería, escala 1:100.000, Santiago.
- Cornejo, P.; Mpodozis, C., Tomlinson, A.J., 1998. Hoja Salar de Maricunga, región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, Mapa Geológico No.7, escala 1:100.000, Santiago.
- Iriarte, S; Mpodozis, C.; Gardeweg, M.; Valenzuela, M., 2012. Carta Laguna del Negro Francisco, Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 145: 30 p. Escala 1:100.000, Santiago.
- Clavero, J.; Mpodozis, C.; Gardeweg, M., Valenzuela, M., 2012. Geología de las áreas Laguna Wheelwright y Paso San Francisco, Región de Atacama. Servicio Nacional de Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 139-140: 34 p, escala 1:100.000, Santiago.

4.2.1 Depósitos no Consolidados a Semi-consolidados

Depósitos coluviales antiguos (Tac)

Materiales no consolidados formados por el espectro granulométrico (gravas, ripios, arenas y limos), principalmente asociados a sistemas de drenaje inactivo, y a otro tipo de afloramientos debido al relieve actual. Se ubican en el sector suroriente de Maricunga.

Gravas de Atacama (Mga)

Material formado por gravas y arenas gruesas poligénicas, mal consolidadas, erosionadas por el drenaje actual y depositadas en superficies peneplanizadas, predominantemente entre 3.500 a 3.900 msnm, al oeste y norte de la Cuenca del Salar de Maricunga. La unidad incluye, además, intercalaciones de ignimbritas débilmente soldadas en la periferia de los centros volcánicos oligo-miocenos. También pueden ser observadas en estratos y terrazas colgadas en relación a la red hidrográfica actual, conformando afloramientos de escasa extensión y espesores de orden métrico.

Los materiales reposan de forma concordante sobre materiales volcánicos de edad miocena, aunque localmente se puede sobreponer a otras litologías de edades paleozoicas a mesozoicas, y se encuentran cubiertos por la Ignimbrita San Andrés. Los depósitos corresponden al relleno de un sistema fluvial de edad comprendida entre el Mioceno medio y el superior.

Depósitos aluviales antiguos (MsPa)

Materiales predominantemente aluviales, aunque localmente, en las inmediaciones de la cuenca de Piedra Pómez se han incluido dentro de la unidad a depósitos de origen coluvial, formados por bancos de gravas y bloques de bajo redondeamiento y selección y, de forma más local, con granulometrías tamaño grava, arena y limo. Hacia el sector Este de la zona de estudio, son de origen polimíctico y se encuentran mal seleccionados y pobremente estratificados.

Principalmente se trata de materiales matriz soportados, con abundante arena y limo y, localmente, con lentes de arena fina. Pueden alcanzar una potencia variable entre 100 a 150 m.
Los materiales conforman conos aluviales de baja pendiente y, de forma más localizada, en los márgenes de lagunas endorreicas y depósitos de llanuras de inundación. El techo del material se encuentra erosionado por los cursos aluviales y fluviales actuales como la quebrada Ciénaga Redonda.

El material es de una edad comprendida entre el Mioceno superior y el Plioceno inferior.

Depósitos glaciares (Qg)

Incluye morrenas de fondo y laterales y depósitos periglaciares correspondientes a gravas y bloques polimícticos angulosos a sub-angulosos, inmersos en una matriz de limo-arena. Poseen una distribución superficial marginal en el ámbito de la Cuenca, ubicándose en el borde centro-oriental de la misma, en las vertientes inferiores de Volcanes del Plioceno Inferior y Superior (Pliv y Plsv). Los depósitos más

antiguos, del Plioceno-Holoceno (Qg), poseen desarrollo métrico, y se encuentra en pequeños afloramientos ubicados en las laderas del Nevado Tres Cruces.

Remociones en masa (Qrm)

Depósitos de remoción en masa actuales a subactuales, formados por gravas y bloques polimícticos no consolidados, además de material disgregado in situ. Los depósitos corresponden a deslizamientos de roca y a sedimentos en laderas abruptas y estructuras de colapso de transporte gravitacional. Presentan ámbitos de desarrollo bien restringidos a las zonas donde se han generado. Generalmente se encuentran asociados a sectores donde se ha producido alteración hidrotermal, en sectores aledaños laderas de alta pendiente.

Depósitos aluviales (Qa)

Materiales terrígenos del Cuaternario, formados por partículas de tamaño arena, grava y limo con una potencia que pueden alcanzar excepcionalmente por sobre 50 m de espesor. El sistema de drenaje que transporta y deposita a estos materiales, es de carácter efímero, con cauces divagantes, y direcciones de flujo hacia el centro del salar. Los depósitos se desarrollan en la ladera inferior de valles y quebradas, formando conos aluviales de distintas pendientes y extensión. Este tipo de materiales se puede encontrar principalmente en los llanos y conos aluviales de las inmediaciones del salar, cubriendo a los depósitos aluviales más antiguos.

Depósitos coluviales (Qc y Qac)

Depósitos actuales formados por bloques monomícticos, de formas angulosas y con matriz arenosa. Material desorganizado, presente en las laderas de fuerte pendiente, formando conos de deyección con actividad ocasional y/o coluviones. En las partes topográficamente más elevadas de la cuenca, los materiales se encuentran formados por gravas mal seleccionadas, rellenando los fondos de las quebradas o en laderas de los cerros, de elevada pendiente.

Depósitos Carbonatados (Qca)

Travertinos y travertinos arenosos asociados a la quebrada del río Lamas y el borde occidental del Llano Tres Cruces, en el sector centro-oriente de la cuenca donde cubren una superficie marginal en el ámbito de la Cuenca.

Depósitos piroclásticos pumíceos (Qp)

Depósitos pumíceos actuales a subactuales, no consolidados, asociados al volcán Tres Cruces. Poseen una distribución superficial marginal en el ámbito de la Cuenca y se ubican al sur-poniente del macizo Tres Cruces.

Derrubios del macizo Tres Cruces (Qv (e))

Depósitos actuales de rocas fragmentadas y movilizadas por efecto de la gravedad y el agua que se sitúan en las vertientes inferiores de Volcanes del Plioceno Inferior y Superior (Pliv y Plsv). Poseen una distribución superficial marginal en el ámbito de la cuenca, ubicándose en el borde centro-oriental de la misma.

Vegas (Qh)

Denominación para los humedales de montaña donde se producen importantes acopios de vegetación, de buena productividad, asociados a la presencia de quebradas y/o cursos de agua y/o a zonas con afloramiento o surgencia de las aguas sub-superficiales o subterráneas.

4.2.2 Rocas Estratificadas

Formación Pantanoso (Pep)

Secuencia volcánica del Pérmico, de 300 m que conforma el basamento de la cordillera Claudio Gay. La serie se encuentra formada por lavas de diferente composición, flujos piroclásticos y brechas volcanoclásticas, con intercalaciones de areniscas y conglomerados. La formación aflora en el centro de la zona de estudio y en la confluencia entre las cuencas de Maricunga y Piedra Pómez. Su edad es Pérmico (Paleozoico superior).

Formación La Tabla (Pzlt)

Secuencia volcánica del Paleozoico superior, formada por alternancias de tobas y brechas riolíticas de colores gris rojizo a verdoso. La unidad presenta una potencia regional de 1.000 m y se encuentra depositada de forma discordante sobre la formación Chinches. En la cuenca de Salar de Maricunga sus afloramientos se concentran en el extremo NW.

Formación Chinches (DCch)

Secuencia sedimentaria detrítica que alcanza, a nivel regional, una potencia de 2.500 m, formada por una sucesión de lutitas y areniscas arcósicas de colores negros y grises, con intercalaciones de calcáreas y bancos conglomerádicos, correspondiente a un ambiente deposicional sub acuático marino.

La formación se encuentra localmente intruida, presentando a escala local un metamorfismo de contacto con desarrollo de rocas corneanas. Las rocas de esta unidad afloran en dos grupos, uno en el NW de la cuenca, y otro, al SE de la cuenca, dentro de la Cordillera de Claudio Gay.

Su edad abarca desde el Devónico al Carbonífero (Paleozoico superior).

Estratos El Mono (TrJem)

Secuencia sedimentaria mesozoica, que regionalmente alcanza 2.000 m de potencia, formada por alternancias de conglomerados, lutitas y brechas volcanosedimentarias. El afloramiento de estas rocas se encuentra restringido a NW de la cuenca. Se le asigna una edad Triásico-Jurásico.

Formación Montandón (Jm)

Alternancia sedimentaria mesozoica, formada por calizas, calcilutitas y conglomerados, de espesor variable entre 200 hasta 1.000 m, que en la cuenca de Salar de Maricunga alcanza a 300 m. El material reposa sobre los estratos del Mono y, de forma local, sobre unos granitoides de edad pérmica. El ámbito de deposición corresponde a un ambiente costero profundo.

La serie, que se encuentra intensamente plegada y facturada, aflora en superficies restringida al NW de la zona de estudio. Su edad es Jurásico Medio.

Formación Asientos (Ja)

Secuencia sedimentaria del Mesozoico, de 300 m de potencia, formada por calizas fosilíferas de color amarillo y areniscas volcanoclásticas verdes con intercalaciones de lavas basálticas. El material se encuentra depositado sobre la formación Montandón y por debajo de la formación Quebrada Vicuñita, aflorando de forma muy restringida en el NW de la cuenca. Su edad es Jurásico, indiferenciado.

Estratos Quebrada Vicuñita (Jqv)

Unidad volcánica formada por lavas andesítico basálticas vesiculares con intercalaciones de calizas y areniscas, de 200 m de espesor, que reposa sobre la Formación Asientos. Afloramientos de estas rocas, de edad mesozoica, se encuentra en el NW de la cuenca, en afloramientos de extensión superficial restringida. Posee una edad Jurásico Superior.

Formación Pedernales (JKp)

Secuencia sedimentaria del Jurásico Superior-Cretácico Inferior, formada por alternancias de areniscas, calizas y calcáreas fosilíferas, de 100 m de espesor. Se encuentra por encima de la formación Quebrada Vicuñita, subyaciendo en concordancia a la formación Quebrada Monardes, en afloramientos muy restringidos, al NW de la cuenca.

Formación Quebrada Monardes (Kqm)

Secuencia sedimentaria clástica del Cretácico Inferior, formada por una potente serie de materiales detríticos de ámbito continental, formados por alternancias de lutitas, areniscas y conglomerados. Regionalmente esta unidad comprende espesores entre 1.000 a 1.500 m, mientras que en la zona de estudio alcanzaría hasta 200 m, en afloramientos restringidos hacia el límite oeste de la cuenca. El material reposa de forma concordante sobre la formación Pedernales, y subyace de forma discordante bajo los estratos Los Carneros.

Estratos El Leoncito (Kle)

Secuencia de hasta 500 m de conglomerados de coloración roja oscura, que aflora en la ladera occidental de la sierra El Leoncito, al sureste del salar de Pedernales y al oeste del Salar de Maricunga, y que cubre en discordancia a la formación Quebrada Monardes. Los materiales pueden ser clasto o

matriz soportados, y presentan bloques de forma subredondeada que pueden alcanzar los 60 cm de diámetro.

Estratos Los Carneros (Kcc)

Potente serie volcánica de 2.000 m de espesor, que se encuentra en el límite NW de la cuenca, en las cuales se han definido tres niveles. Un nivel inferior, compuesto de lavas basálticas de olivino, brechas piroclásticas gruesas y tobas riolíticas, un nivel intermedio de traquiandesitas y andesitas basálticas, y un nivel superior, compuesto de brechas volcánicas y tobas dacíticas.

En el nivel intermedio se identificó una estructura en bancos de 10 a 20 m, con fracturamiento planar. Se apoya en discordancia angular sobre la Formación Quebrada Monardes y otras secuencias más antiguas. Se le asigna una edad comprendida entre el Triásico y Cretácico.

Estratos de la Quebrada los Patos (KTp)

Secuencia sedimentaria clástica de ambiente deposicional continental, formada por conglomerados mal seleccionados y areniscas rojas de grosor desconocido. El material se encuentra en pequeños afloramientos en el centro y centro sur de la cuenca. Se le ha asignado una edad del Mesozoico indiferenciado.

Estratos Huidobro (EOh)

Secuencia sedimentaria formada por asociación de dos facies (volcanoclástica -EOh(a)- y evaporítica -EOhv (b)-) de 400 m de espesor que aflora en ubicada en la base oriental de la Cordillera Claudio Gay, ya en la cuenca de Piedra Pómez, formando un anticlinal. Se le ha asignado una Eoceno-Oligoceno

Los materiales volcanoclásticos se encuentran formados por alternancias de areniscas, brechas, ignimbritas y conglomerados, mientras que los evaporíticos presentan yeso, conglomerados y areniscas de color rojo.

Estratos la Vertiente (EOlv)

Secuencia volcánica de edad eocena-oligocena, de 300 m de espesor, formada por alternancia de lavas de composición andesítica, con alteración de arcilla-clorita. Conforman un grupo de afloramientos que se extienden en la parte central y septentrional de la Cordillera Claudio Gay.

Estratos Claudio Gay (OMcg)

Secuencia sedimentaria del Oligoceno, de 500 m de espesor, formada por facies de dos tipos diferentes: la primera volcanoclástica, con ignimbritas, brechas y cenizas (OMcg(a)), y la segunda formada por lavas de composiciones andesíticas (OMcg (b1)) y basálticas (OMcg (b2)). El material se encuentra aflorando en forma de anticlinal en el norte de la zona de estudio, y en la conexión entre cuencas.

Lavas y domos del Oligoceno-Mioceno (OMv)

Remanentes de edificios volcánicos de poca extensión superficial (sólo al oeste de la Cordillera Claudio Gay). Se encuentran en la zona norte de la cuenca. Edad Mioceno indiferenciado.

Tobas y brechas del Oligoceno-Mioceno (Tlc)

Materiales volcánicos compuestos por Brechas de explosión, depósitos de flujos piroclásticos (Tlc(a)) y extensos depósitos de caída asociados a la actividad volcánica del Oligoceno-Mioceno (Tlc (b)) y a las diferentes intrusiones acontecidas. Estos depósitos se encuentran a lo largo de los sectores W de la cuenca de Maricunga.

Lavas del volcán Dos Hermanos (TMdh)

Correspondiente a las lavas de naturaleza andesítica y andesítica basáltica, y otros depósitos de bloques del volcán dos hermanos, ubicado en el centro y sur oeste de la zona de estudio. Su edad es Mioceno superior.

Estrato volcanes del Mioceno Medio-inferior (TMv)

Estrato volcanes con diverso grado de erosión que afloran en el sector sureste y centro este de la zona de Maricunga. Estos materiales incluyen otros productos volcánicos tales como la Ignimbrita Santa Rosa (TMv(a)), lavas andesíticas (TMv (b)), Domos extrusivos dacíticos (TMv(c)) y depósitos de bloques y cenizas (TMv(d)).

Complejo Volcánico Copiapó

Materiales de las etapas inicial y final del complejo volcánico Copiapó, formados por volcanes y productos derivados tales como domos, lavas y flujos piroclásticos de composición dacítica. Aflora en el sector suroeste de la cuenca, incluyendo las siguientes unidades:

1. Etapa Tardía:
    - Lavas dacíticas del cono Copiapó (Tvcs)
2. Etapa Temprana:
    - Lavas del volcán Azufre (Tvca)
    - Lavas y domos del volcán Copiapó (Tvcc(a))
    - Flujos ignimbríticos del volcán Copiapó (Tvcc(b))
    - Ignimbrita Copiapó I (Tvcc(c))

Estratovolcanes del Mioceno medio al superior (TMo (a, b, c))

Materiales correspondientes a la formación del volcán Pastillo y productos asociados. Se trata de un edificio volcánico de 10 km de diámetro ubicado al sur del Salar de Maricunga, y a las lavas asociadas al mismo volcán. Estos materiales presentan composición andesítica y dacítica. De menor alcance y en el SE del volcán, se encuentran otros materiales correspondientes a rocas subvolcánicas de naturaleza dacítica que se incluyen dentro del grupo.

Lavas de soledad (Tls)

Coladas de lava andesíticas y dacíticas correspondientes a vestigios de un centro volcánico erosionado ubicado en las inmediaciones del prospecto Soledad, en el sector suroeste de la cuenca. Se presentan dos tipos de lavas: unas de composición andesítica, con cristales de piroxeno y otras de composición dacítica formadas por cristales de hornblenda y de piroxeno. Los materiales presentan grados de alteración de moderados a altos.

Volcanes y complejos volcánicos del Mioceno

Estratovolcanes con diferente grado de erosión y en parte colapsados, y complejos de domos, cuya producción es predominantemente dacítica. Los principales productos de este volcanismo son los siguientes

- (Mv(a)) Lavas andesíticas y/a dacíticas formados por anfíbol piroxeno y anfíbol biotita.
- (Msv(b)) Depósitos de flujo piroclástico formados por bloques y ceniza de naturaleza dacítica, formados por anfíbol biotita.
- (Mv(b)) Domos dacíticos – riodacíticos

Estratos de Piedra Pómez (Mipp)

Deposito formado por bloques y ceniza, de una potencia máxima de 150 m, organizado en capas de 5 a 20 m de grosor. Los materiales se encuentran entre semi hasta bien consolidados, presentan bloques de tamaño máximo de 50 cm de diámetro y son de naturaleza dacítica. Afloran a ambos lados de los cordones de cerros que forman la divisoria entre las cuencas de Salar de Maricunga y Piedra Pómez.

Se le asigna una edad Mioceno Inferior.

Ignimbrita Los Terneros (Miilt)

Depósitos volcánicos del Mioceno formados por flujos piroclásticos de naturaleza pumícea que afloran en los sectores, quebrada Los Terneros, al norte de la Mina La Coipa, Portezuelo Codocedo y quebrada Toro Sal. El material constituye una toba de composición riodacítica, formada por lapilli de diferente tamaño y cristales.

Lavas y Domos del Mioceno inferior (Miv)

Secuencia volcánica formada por lavas andesíticas y domos riodacíticos, emplazados en niveles subhorizontales o con una ligera inclinación, en el sur de la cuenca. Estos materiales corresponden a productos lávicos de emplazamiento proximal.

Conjunto de Volcanes del Mioceno superior (Mmv)

En el área de Salar de Maricunga, la unidad comprende a las rocas volcánicas que fueran agrupadas como Aparatos Volcánicos Centrales (Tasara, 1998), que incluyen al Volcán Ojo de Maricunga (cerro Maricunga), cerros Vicuñita y cerro La Coipa. Está formada por depósitos de flujos piroclásticos tipo 'bloques y cenizas' de composición dacítica y andesítico-dacítica, domos de dacitas porfídicas, y lavas dacítico-andesíticas. En el área de Salar de Wheelwright, esta unidad comprende un conjunto de materiales volcánicos relacionados con volcanes parcialmente colapsados y erosionados de edad miocena media. Se trata de edificios formados por estratovolcanes, de composición predominantemente dacítica, cuyos productos fueron lavas andesíticas, domos dacíticos y depósitos piroclásticos.

Se ha reconocido que estos materiales reposan de forma concordante sobre los materiales sedimentarios del Mioceno y del Triásico.

Ignimbrita de Valle Ancho (Mmiva)

Flujo piroclástico de composición dacítica, emplazado en afloramientos puntuales en el extremo suroriental de la Cuenca de Maricunga, en el sector del valle Ancho. Se le asigna una edad Mioceno Medio.

Ignimbrita Maricunga (Mmim)

Deposito resultado de un flujo piroclástico pumíceo, formado por una toba dacítica blanquecina, de edad miocena (entre 16 y 14 Ma). El nivel se encuentra formado por lapilli de tamaño grueso y no soldado. El nivel, que presenta un grosor total superior a 100 m, se encuentra organizado en gran cantidad de unidades de flujo, con grosores comprendidos entre 5 a 15 m. el nivel se encuentra cubierto por la formación Gravas de Atacama y otros depósitos piroclásticos. Se encuentra en numerosos afloramientos ubicados al W y el SW del Salar de Maricunga.

Estratos del Río Lamas (Mmrl)

Gravas fluviales y aluviales, de formas angulosas a semiredondeadas, y semiconsolidadas, de origen volcánico y tamaño inferior a 40 cm. La matriz de estos materiales es arenosa. En total, los estratos presentan un grosor aproximado entre 100 a 150 m. Su edad corresponde al Mioceno medio.

Los estratos presentan intercalaciones de ignimbritas dacíticas de color blanco y de grosores no superiores a los 15 m. el nivel se encuentra con diversos grados de plegamiento y fracturado, y con numerosas discordancias internas.

Gravas de la Quebrada Manantiales (Msqm)

Depósitos predominantemente de origen aluvial, formados por gravas polimícticas, arena y limo, mal seleccionados. La unidad fue definida en el área norte de la cuenca, en el borde occidental de la Cordillera Claudio Gay. Estos materiales se encuentran altamente tectonizados, con diferentes grados de plegamiento y alta fracturación. Su edad es Mioceno superior.

La unidad contiene, de manera interestratificada, a la unidad de rocas piroclásticas denominada ignimbrita San Andrés (Msisa).

Depósitos antiguos del Salar de Maricunga (MsPls)

Materiales formados por costras sulfatadas, junto a precipitados de yeso-halita, y de boratos. A nivel superficial, estos materiales afloran en la zona suroriental del salar. Se encuentran levantados entre 1 y 2 m sobre el nivel de las aguas salobres y las otras costras del sector. Las costras de boratos se encuentran formando montículos, por lo que han sido interpretadas como surgencias tipo géiser.

En profundidad, estos materiales se encuentran por debajo de los materiales terrígenos antiguos depositados en el salar, a profundidades comprendidas de 100 a 170 m, con espesores de aproximadamente 20 m. la unidad sobre yace a materiales volcánicos más antiguos. Se le ha asignado una edad Mioceno superior-Plioceno.

Ignimbrita san Andrés (Msisa)

Depósito piroclástico pumíceo de composición riolítica, que aflora en el borde occidental de la zona de estudio. Se trata de un depósito semiconsolidado sin soldar, con fragmentos líticos y pumíceos y matriz de ceniza blanca. Su edad es Mioceno superior.

Volcanes y complejos volcánicos del Plioceno (Plv)

Conjunto de edificios volcánicos, mixtos, bien preservados y de superficies erosionadas. Los materiales presentan composición dacítica andesítica, y presentan una distribución amplia y aleatoria en la zona de estudio, asociada principalmente a la fracturación del basamento rocoso. Los materiales presentan conos adventicios y presentan un buen desarrollo en la zona centro y al este de Piedra pómez.

Conjunto de volcanes del Plioceno Inferior (Pliv)

Materiales volcánicos compuesto por grandes edificios volcánicos aislados y por los afloramientos distales de sus coladas, que constituyen el basamento de los edificios del Plioceno Superior y del Cuaternario. Estos materiales tienen naturaleza principalmente dacítica y andesítica. Se encuentran aflorando en el sector centro-oeste de la cuenca en la región del macizo Tres Cruces, aunque presenta un mayor desarrollo fuera de la cuenca.

Conjunto de volcanes del Plioceno Superior (Plsv)

Conjunto de materiales constituido por edificios volcánicos formados por unidades volcánicas aisladas y las coladas asociadas. Estos materiales constituyen el basamento de los nuevos volcanes emplazados durante el Cuaternario. Este material se encuentra aflorando en la zona centro-oriente de la cuenca en la región cercana al macizo Tres Cruces.

Otros materiales asociados son los siguientes:

- (Plv(a)) Lavas andesíticas a dacíticas
- (Pfp) Depósitos de flujo piroclástico
- (Pliv(c)) Cono adventicio y lava andesítico-basáltica asociada
- (Pliv(e)) Domos dacíticos
- (Plsv(d)) Depósitos piroclásticos de caída proximal
- (Plsv(c)) Derrubios

Conjunto de Volcanes del Cuaternario (Qv)

Conjunto de volcanes y productos volcánicos formados por lavas, domos y depósitos piroclásticos de flujo y caída, con morfologías bien preservadas y características tales como levées, canales centrales, lóbulos de avance, etc. En toda la zona de estudio predominan los estratovolcanes compuestos y los complejos de domos y lavas-domo, con materiales de composición predominantemente dacítica. De la misma manera, también se encuentran depósitos de colada con morfologías tan bien preservadas como las descritas con anterioridad. En la zona de estudio, sin embargo, son predominantes los depósitos de caída pumíceos. Estos materiales presentan un buen desarrollo en la zona de Piedra Pómez, particularmente con buenos afloramientos en el SE de la cuenca.

Los principales afloramientos se encuentran en el sur de la zona de estudio, en el que se encuentran los siguientes depósitos:

- (Qv(d)) Macizos, conos y coladas de lava predominantemente dacíticas
- (Qv(c)) Escoria y conos de escoria

Los depósitos correspondientes al material Qv (e) Derrubios del flanco del Macizo Tres Cruces, ya han sido citados con anterioridad. Este material no pertenece a la súper unidad de los materiales consolidados.

Ignimbrita Tres Cruces (Qitc)

Depósito de flujo piroclástico de ceniza y pómez asociado al centro emplazado más al norte del macizo Tres Cruces. Estos depósitos se emplazan principalmente en el sector W de la cuenca (Llano de Tres

Cruces,). Estos materiales se presentan en afloramientos de limitado alcance donde los depósitos son reducidos y de escaso espesor (< 2 m).

Depósitos salinos del Salar de Maricunga (Qs)

Depósitos salinos actuales de origen evaporítico, de espesores comprendidos entre 120 y 200 m, que se encuentran emplazados en la zona occidental del Salar de Maricunga. Los depósitos se encuentran formados por diferentes tipos de facies entre las que se encuentran facies cloruradas, boratadas y sulfatadas. En el salar, se encuentran separados de una zona de costras antiguas (MsPls) por una falla de orientación NE que permite el afloramiento del nivel freático, formando un grupo de lagunas salobres. En estos depósitos se han definido tres tipos diferentes de facies composicionales.

- Costra de halita en bloques (Qs(a));
- Costra plana de halita, (Qs(b));
- Lámina de halita, (Qs(c)).

La unidad se encuentra en contacto lateral con materiales sedimentarios recientes, y recubriendo a depósitos aluviales y salinos más antiguos.
De la misma manera, en otros emplazamientos, la unidad presenta un desarrollo más marginal, formando costras salinas y sulfatadas de escasa potencia (inferior a 30 cm).

4.2.3 Rocas Intrusivas

Monzodiorita cuarcífera de la Cuesta los Colorados (Pzmd)

Cuerpo intrusivo de color verdoso formado por rocas holocristalinas de textura hipidiomórfica granular gruesa, con cristales de plagioclasa, piroxeno, anfíbol, biotita y cuarzo. Se encuentra en el centro occidental de la cuenca de Piedra Pómez, intruyendo a la formación Pantanoso.

Granitoides Pérmico-Triásico (PeTrg)

Grupo de cuerpos intrusivos que aflora en el sector centro-occidental del área de estudio, en la Cordillera Claudio Gay. En sectores intruyen a tobas riolíticas y riolitas de la Formación Pantanoso y a rocas de la Formación Chinches.

Intrusivos de Quebrada Caballo Muerto (Pzc)

Al sur del Batolito Pedernales, intruyendo a la Formación La Tabla (Pzlt), afloran algunos cuerpos intrusivos independientes, formados principalmente por monzogranitos y cuerpos menores de pórfidos riolíticos, cuya edad ha sido asignada al Pérmico. Afloran en el sector noroeste de la cuenca, al norte del Salar de Maricunga.

Pórfidos granodioríticos y monzodioríticos (Kipgd)

'Stocks' de pequeño diámetro (1-3 km^2) que intruyen a la Formación Chinches (DCch), al norte de Quebrada Caballo Muerto, en la zona norte de la zona de estudio. Edad Cretácico inferior.

Pórfidos granodioríticos (KTpgd)

Intrusivos hipabisales de tamaño reducido (<1 km^2), emplazados en los niveles inferiores de los Estratos de Cerro Los Carneros (Kcc) (Cerros Codoceo y del Toro) y dos 'stocks' de tamaño medio (1-2 km^2) que ocurren en la Quebrada Pastos Largos, todos ubicados al noroeste de la zona de estudio. Se asignan a una edad comprendida entre Cretácico Superior al Paleógeno.

Monzodioritas y pórfidos (KTmzd)

'Stocks' de pequeño tamaño (1-3 km^2) que intruyen a los Estratos El Mono (TrJem) y Estratos de Cerro Los Carneros (Kcc), en los cerros Codoceo y del Toro, en la zona noroeste de la cuenca. Se asignan a una edad comprendida entre Cretácico Superior al Paleógeno.

Monzogabros de Codoceo (KTgb)

Conjunto de stocks de escaso alcance, de composición monzogábrica, que afloran en el límite W de la cuenca de Maricunga. Se encuentran formados principalmente por plagioclasa, olivino, piroxeno, magnetita y biotita, siendo principalmente melanocráticos.

Domos y pórfidos del Oligoceno-Mioceno (Tlc (b))

Sistema de múltiples domos y pórfidos coalescentes de composiciones dacíticas y andesíticas de pequeño diámetro (< 1,5 km) asociados a fallas de rumbo de orientación noroeste activas al momento de su emplazamiento. Se ubican en la zona sur de la cuenca.

Domos Torito y Toro Sal (Mit)

Edificios volcánicos del Mioceno inferior, emplazados al oeste del Salar de Maricunga, de tamaños del orden de 1 a 2 km de diámetro. Los materiales corresponden a domos extrusivos de estructura columnar, rodeados por depósitos piroclásticos de 5 km de extensión, que llegan hasta los bordes del salar. Los materiales se encuentran sobreyaciendo a las rocas oligoceno-miocenas, y a otros materiales de edad paleozoica. Los depósitos distales se encuentran cubiertos por ignimbritas y gravas también de edad miocena.

Intrusivos hipabisales andesíticos (Mih)

Materiales subvolcánicos de escaso desarrollo, de composición andesítica y textura porfídica, que se encuentran intruyendo las riolitas de la Formación Pantanoso. Estos materiales han sido interpretados como asociados a centros volcánicos en la parte noroccidental de la cuenca de Piedra Pómez. Se emplazan en la parte sur de la cordillera Claudio Gay.

Intrusivos hipabisales dacíticos (Mmh)

Conjunto de materiales subvolcánicos de composición dacítica, que intruyen a las riolitas de la formación Pantanoso y a las lavas de los estratos de Claudio Gay. Se encuentran en zonas de intensa alteración hidrotermal, en el flanco oriental de la cordillera Claudio Gay.

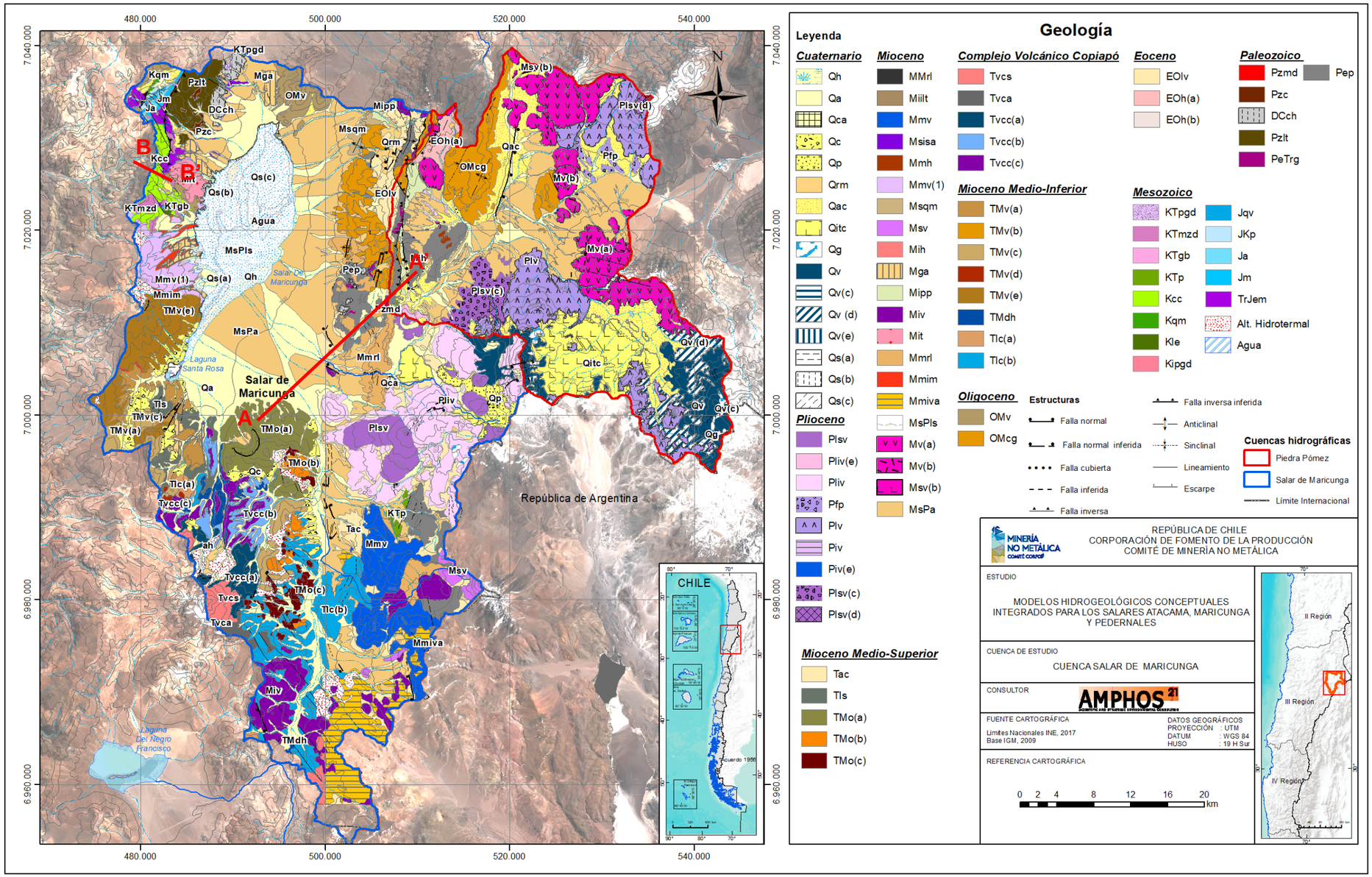


Figura 4-2: Mapa geológico de la cuenca de Maricunga.

Fuente: elaboración propia.

A-A’

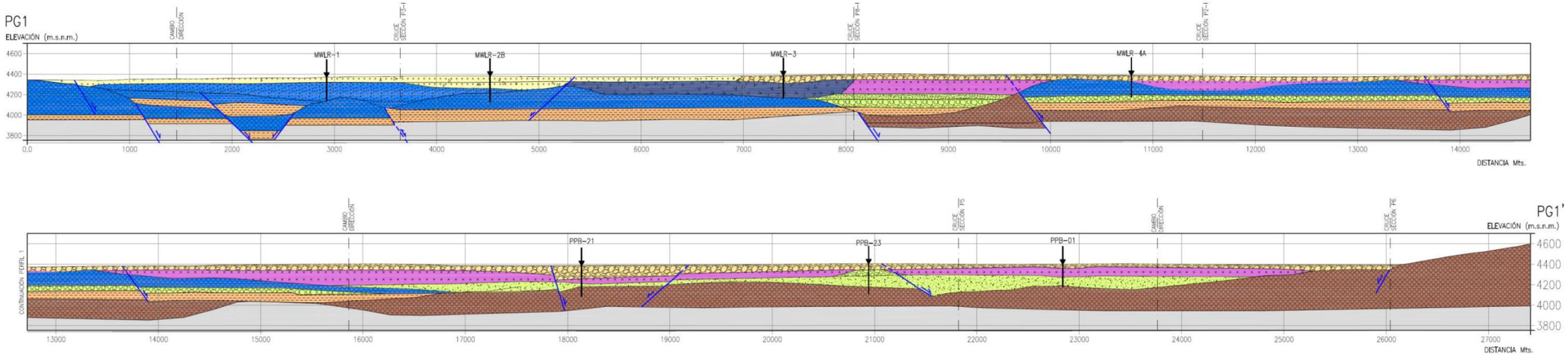


Figura 4-3: Sección Geológica longitudinal SSW-NNE Río Lamas – Piedra Pómez.

Fuente: EIA Cerro Casale; M_REF.062 (ver leyenda a continuación - Figura 4-4)

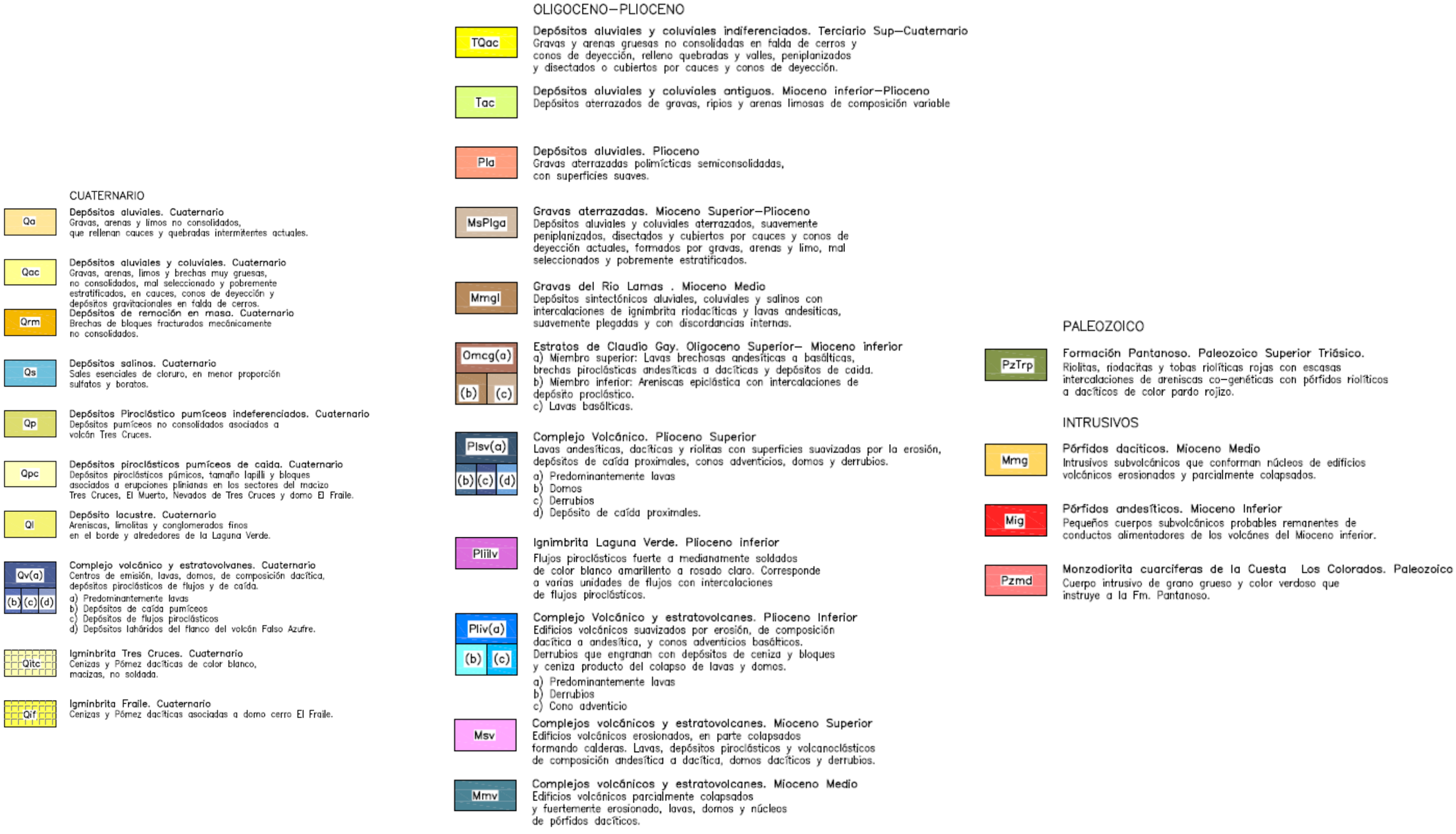


Figura 4-4: Leyenda de la sección Geológica longitudinal SSW-NNE Río Lamas – Piedra Pómez

Fuente: EIA Cerro Casale; M_REF.062

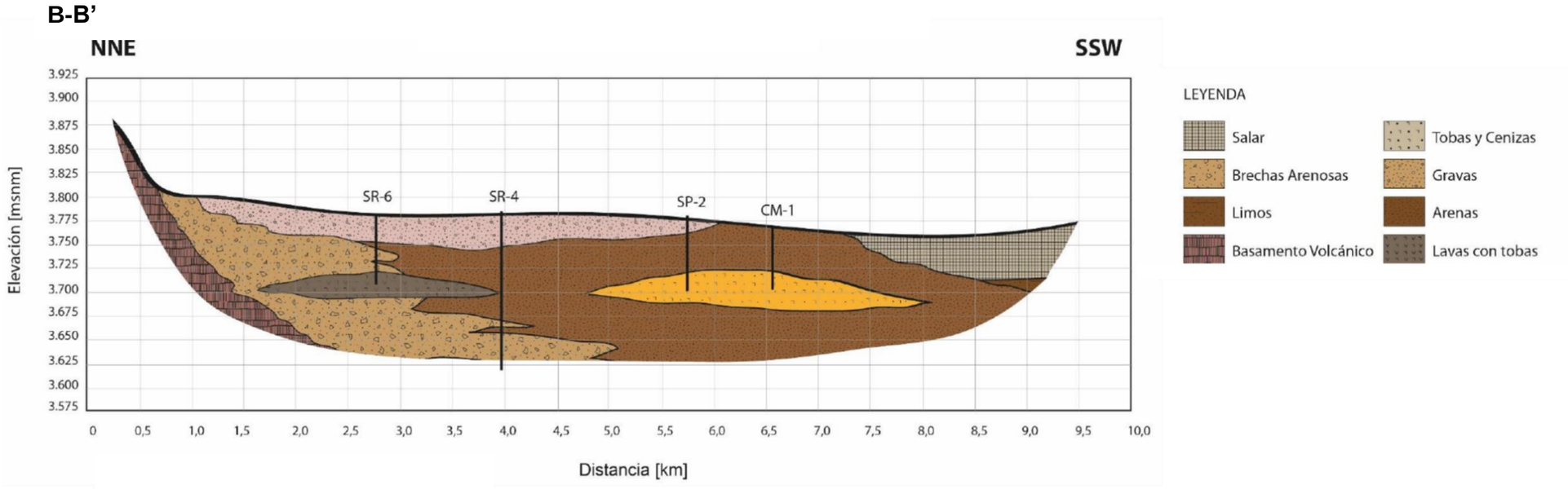


Figura 4-5: Sección geológica del extremo noroccidental del Salar de Maricunga.

Fuente: DGA, 2016 (M_REF.018).

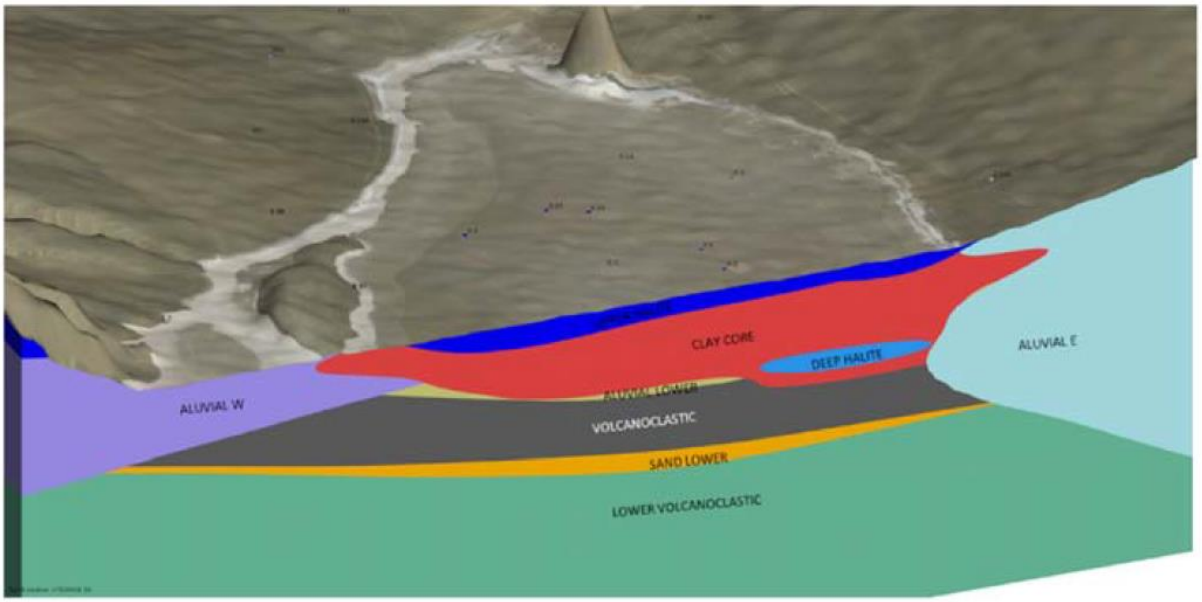


Figura 4-6: Modelo geológico 3D del Salar de Maricunga.

Fuente: Modificado de Li3Energy, 2012.

4.3 Geología Estructural

En la cuenca estudiada, se distinguen dos dominios estructurales claramente diferenciados:

- La zona del Salar de Maricunga, en la que domina un sistema de alzamientos y hundimientos tipo horst y graben, que forma el sistema de Fallas de Domeyko (franja de Maricunga) y el Salar de Maricunga.
- La zona cuenca Piedra Pómez, donde coexisten estructuras asociadas a fallas inversas de alto ángulo y compresivos, en la Cordillera de Claudio Gay y a sistemas de cuencas de *Pull-Apart*, en la zona correspondiente este de la cordillera Claudio Gay.

4.3.1 Geología estructural del Salar de Maricunga

Los sistemas de falla más importantes en la cuenca del Salar de Maricunga formarían parte de la porción más austral del sistema de Fallas de Domeyko. Regionalmente, el área se encuentra afectada por una sucesión de horst de zócalo, limitado por fallas inversas de elevado ángulo de buzamiento, que mantuvieron una importante actividad durante el Eoceno.

Al oeste y noroeste de la cuenca las estructuras que controlan la deformación consisten en fallas de orientación NNW, espaciadas de 3 a 10 km de distancia, y que se han interpretado como fallas siniestrales, en ocasiones, con importante componente de desplazamiento vertical. Algunos de los

bloques limitados por estas estructuras son el bloque de Vicuñitas, de rocas del Jurásico y Cretácico y el bloque de La Coipa y Portezuelo Codoceo, de rocas triásico-jurásicas, los que se encuentran definidos por las fallas San Emilio e Indagua.

Un segundo sistema de estructuras, de importancia en la disposición de las unidades que limitan el borde occidental y oriental del salar, se encuentra formado por juegos de fallas de rumbo principal NS – NNE. Estas fallas se interpretan como fallas inversas de alto ángulo y buzamiento tanto hacia el noroeste como al sureste. Al oeste del salar forman cabalgamientos que ponen en contacto rocas paleozoicas y triásicas, sobre rocas del Jurásico y Cretácico (Falla Portezuelo Codocedo y Falla Caballo Muerto, Figura 4-7). Hacia el este, el Llano de Caballo Muerto constituye la continuación norte de la depresión que forma el Salar de Maricunga.

Al lado este del salar, estas fallas controlan la distribución y contactos en la Cordillera de Claudio Gay, las que ponen en contacto rocas del Paleozoico superior con unidades del Eoceno (Estratos de Huidobro y Estratos de Claudio Gay).

La segmentación estructural de la cuenca del Salar de Maricunga, con la formación de una zona topográfica alzada al oeste, en la que afloran de rocas del Paleozoico y Mesozoico, y se emplazan cuerpos volcánicos del mioceno, llevan a suponer la existencia de una estructura mayor que limite el dominio topográfico alzado del relieve de llanura y depresión en la que se desarrolla el Salar (Cornejo et al. (1998).

4.3.2 Geología estructural de la cuenca de Piedra Pómez

De la misma manera, en la cuenca de Piedra Pómez, se encuentran dos dominios estructurales bien diferenciados a ambos lados de la cuenca:

El primero de ellos, corresponde al mismo que fuera descrito para el margen oriental de la cuenca de Salar de Maricunga, que se desarrolla a lo largo de la cordillera de Claudio Gay. Consiste en una serie de fallas inversas de orientación N-S, de pronunciado ángulo de buzamiento y edades comprendidas entre el Oligoceno superior y el Mioceno inferior, que pone en contacto rocas del Paleozoico superior con unidades del Eoceno (Estratos de Huidobro y Estratos de Claudio Gay).

El segundo, se extiende al este de la cordillera de Claudio Gay, y está formado por una serie de fallas de extensión, correspondientes a un tectonismo de deformación frágil, con fracturas de orientaciones NNW-SSE y E-W, que han favorecido el emplazamiento de centros de emisión volcánica en las diferentes intersecciones estructurales.

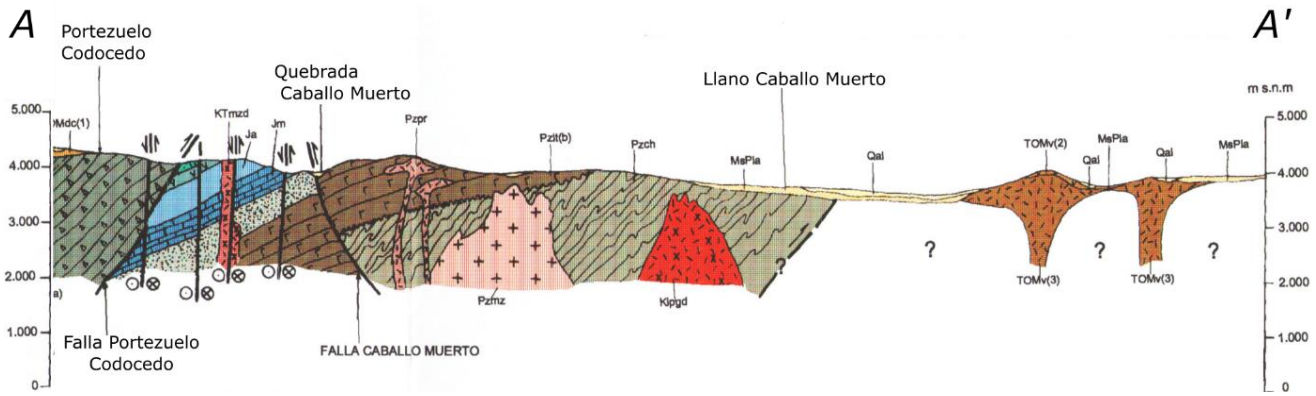


Figura 4-7. Esquema estructural del sector norte de la Cuenca del Salar de Maricunga.

Fuente: Modificado de Cornejo et al. (1998).

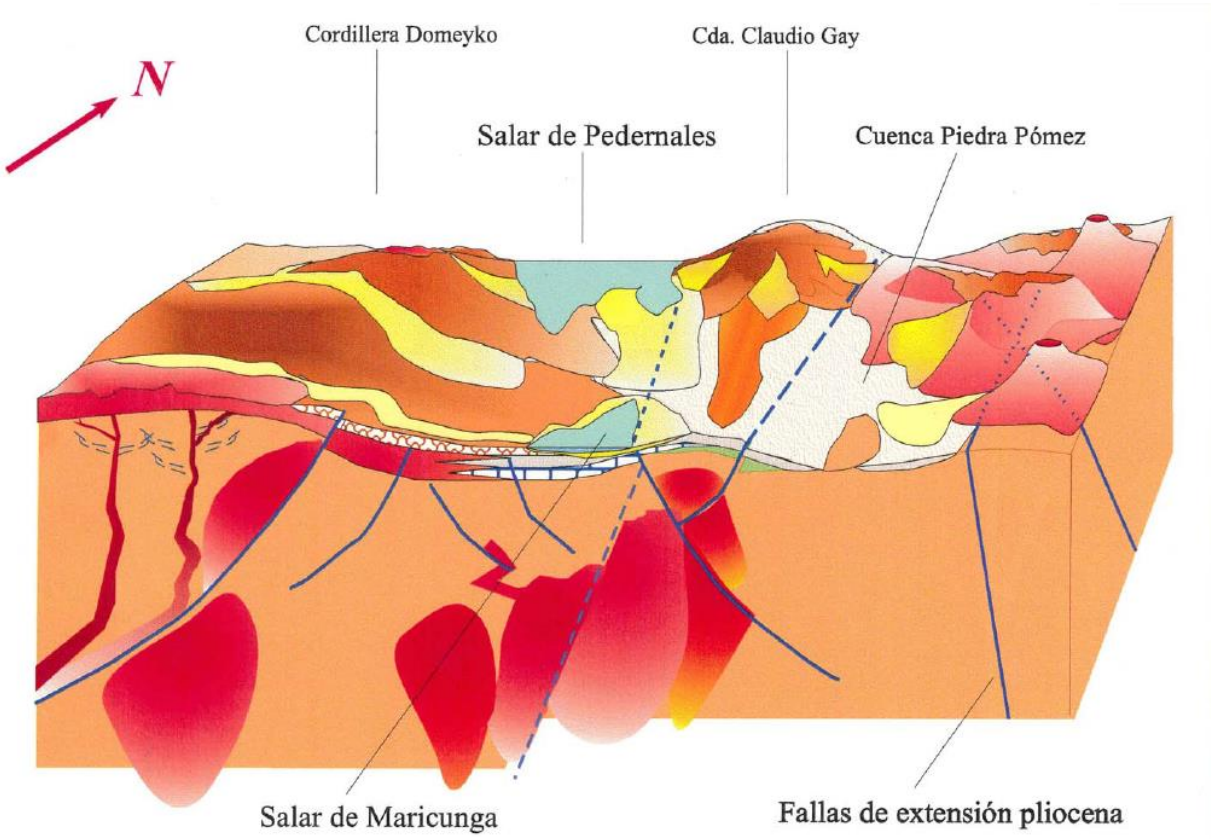


Figura 4-8. Esquema estructural y paleogeográfico del Plioceno-Cuaternario de la zona norte de Maricunga, sur de Pedernales.

Fuente: modificado Rivano, 1998.

4.4 Columnas Estratigráficas representativas

En el estudio hidrogeológico desarrollado, recientemente, en cuencas cerradas alto andinas, efectuado por DGA-Amphos 21 (2016; M_REF.018), se recopilaron, para el área de Salar de Maricunga, cerca de 100 columnas estratigráficas, principalmente desde los documentos del EIA Proyecto Lobo Marte (2011) y, en menor proporción del EIA Proyecto Volcán (2012), de los Mapas Hidrogeológicos del Sernageomin y del EIA Proyecto Cerro Casale (2011).

En el presente trabajo se presentan las columnas estratigráficas agrupadas en cinco sectores: (1) Salar de Maricunga sector norte, (2) Salar de Maricunga sector sur, (3) Llano Ciénaga Redonda, (4) Barros Negros-Pampa Pantanillo y (5) Río Lamas (Figura 4-9). A continuación, se presentan las columnas representativas de cada sector de la zona de estudio.

Sector 1: Salar de Maricunga Norte

La estratigrafía de los pozos ubicados en el NW del salar señala la presencia de un relleno sedimentario no consolidado de arenas y gravas, cuyo espesor es variable entre los 50-150 m de profundidad aumentando hacia el salar. Además, se identifican lentes de poca potencia de limos, arcillas y cenizas volcánicas intercalados con la secuencia detrítica anterior. En la parte norte del salar se reconoció en la base de los depósitos no consolidados, un nivel de roca volcánica (Figura 4-10).

Al E-NE del salar, se reconocen al menos 120 m de relleno con granulometría heterogénea, con arena y gravilla, junto a secuencias intercaladas de arcilla (pozo CAN-6). (Figura 4-10). Esta zona recibe los aportes del flanco occidental de la Cordillera Claudio Gay (quebradas Manantiales, Colorada, Cerro Colorado y La Guanaca).

Sector 2: Salar de Maricunga Sur

La estratigrafía de esta zona está definida por una secuencia de gravas y arenas con menores intercalaciones de limos y arcillas alcanzando potencias superiores a los 150 m de profundidad. En la base de los pozos más cercanos al salar (MDO-8 y MDO-10) se identifica un nivel de arcillas a partir de los 100 m hasta el final de estos.

Sector 3: Llano Ciénaga Redonda

Este sector es el que posee mayor densidad de pozos y, por tanto, de registro estratigráfico subsuperficial. En la Figura 4-12 y Figura 4-13 se muestran aquellos pozos que alcanzaran profundidades mayores a 100 m de modo de aprovechar al máximo el registro litológico.

Se reconoce una secuencia sedimentaria clástica, no consolidada, compuesta por gravas y arenas cuya matriz exhibe limitadas proporciones de finos hasta los 100 m de profundidad, aumentando su espesor hasta los 200 m, en las partes centrales del valle. Por debajo de este relleno detrítico se identifica una toba fracturada y alterada.

En el EIA del Proyecto Volcán (2012), se menciona que al menos los 30 m superiores de la roca basal se caracterizan por presentar una elevada fracturación y alteración, muy probablemente de origen hidrotermal.

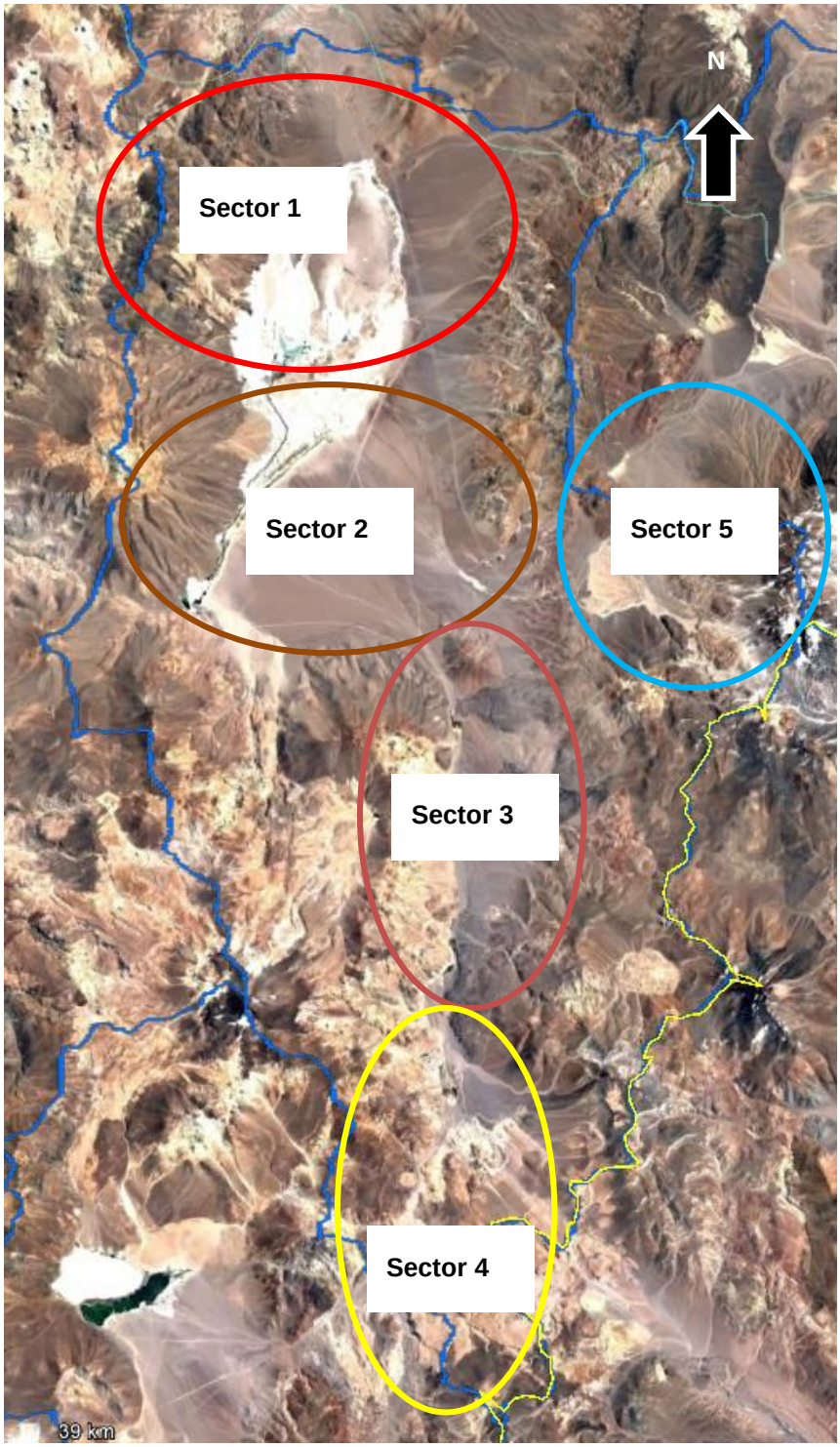


Figura 4-9: Sectorización de la cuenca Salar de Maricunga para descripción de columnas estratigráficas.

Fuente: elaboración propia.

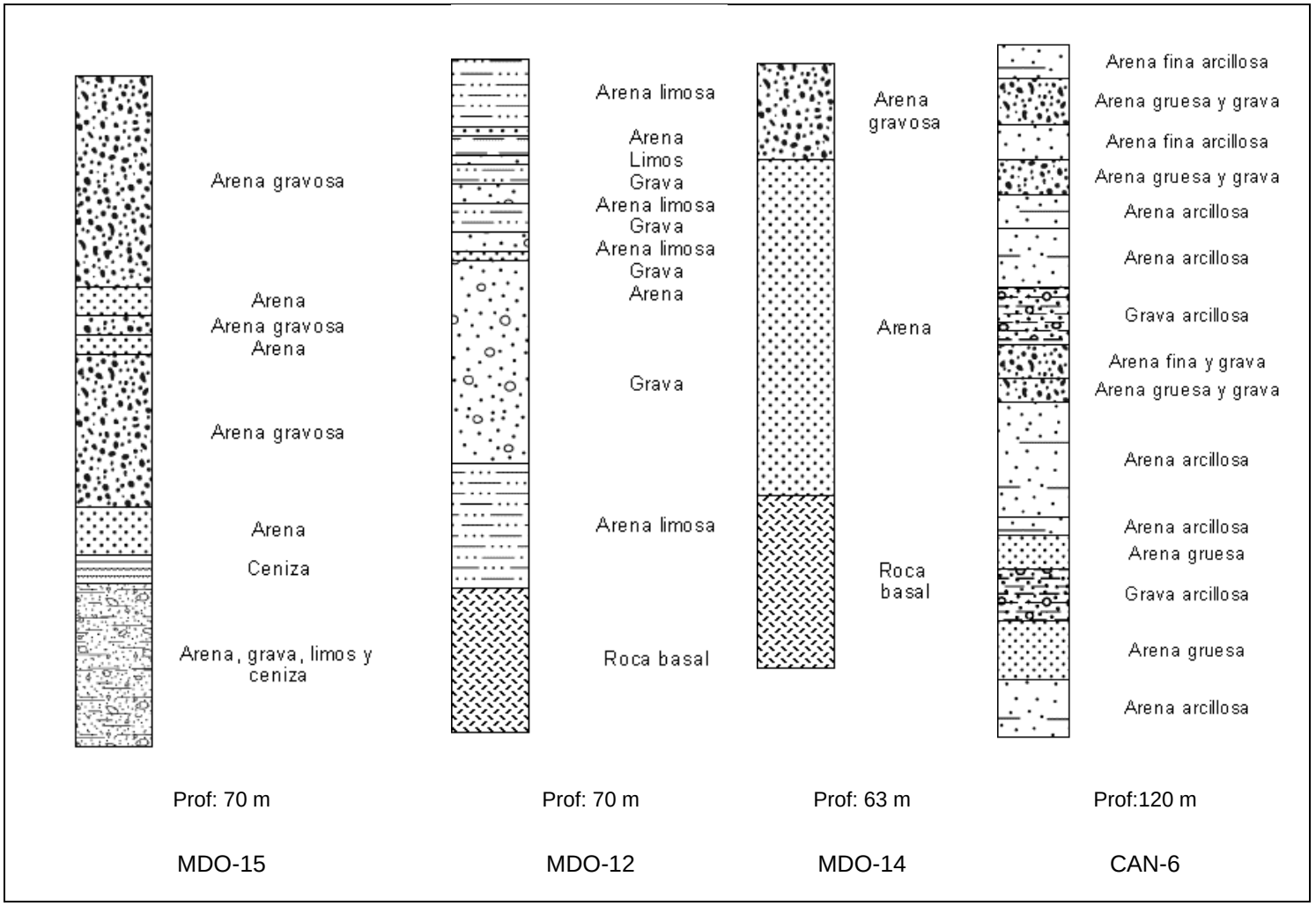


Figura 4-10: Columnas litológicas pozos MDO-15 (SP-2), MDO-12 (SR-3), MDO-14 (SR-6) y CAN-6. Sector 1: Salar de Maricunga Norte.

Fuente: elaboración propia.

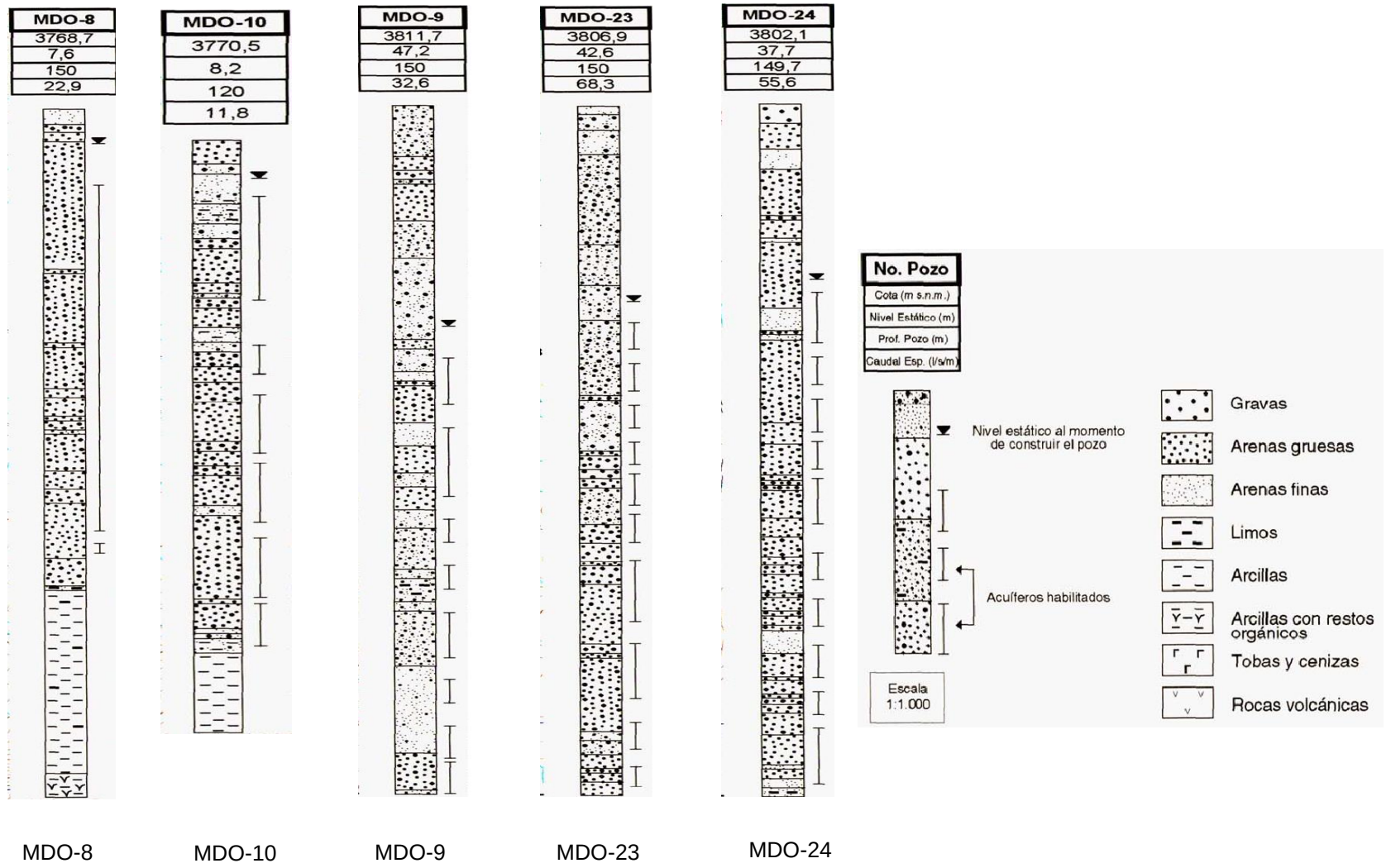


Figura 4-11: Columnas litológicas pozos MDO-8 (SR-1), MDO-10 (SP-1), MDO-9 (SR-2), MDO-23 (SP-3) y MDO-24 (SP-4). Sector 2: Salar de Maricunga Sur. Fuente: elaboración propia.

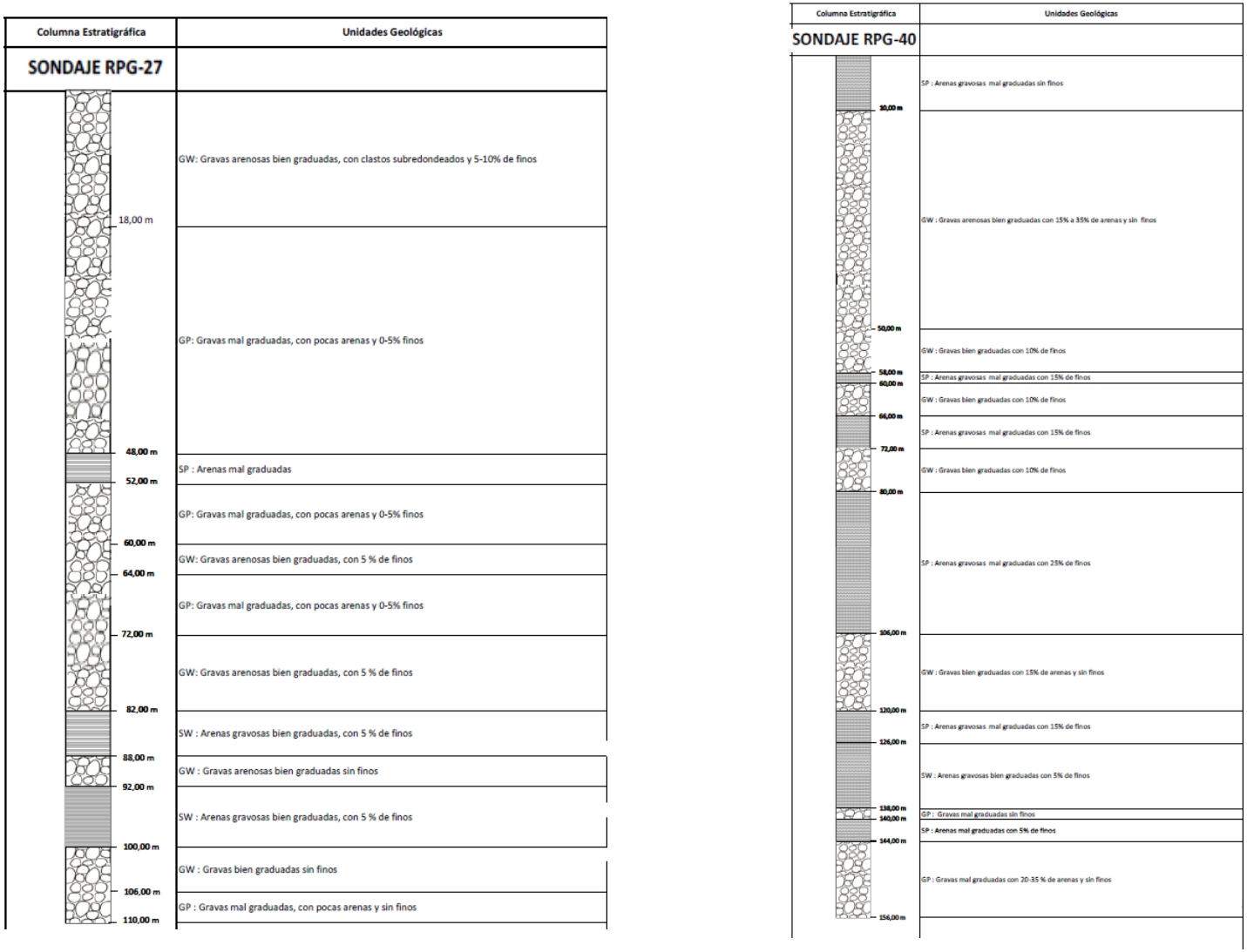


Figura 4-12: Columnas litológicas pozos RPG-27 y RPG-40. Sector 3: Llano Ciénaga Redonda.

Fuente: elaboración propia.

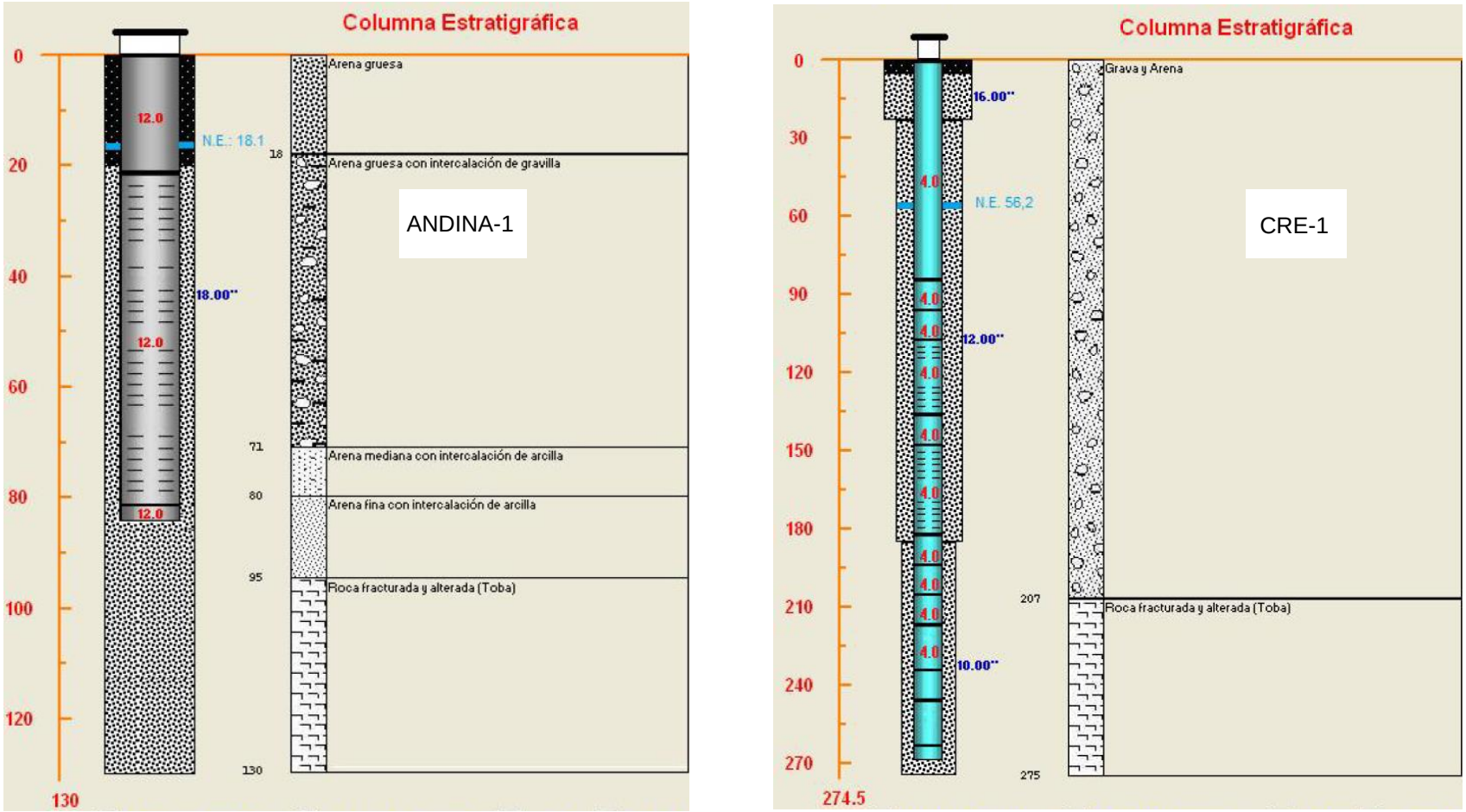


Figura 4-13: Columnas litológicas pozos ANDINA-1 y CRE-1. Sector 3: Llano Ciénaga Redonda.

Fuente: elaboración propia.

Sector 4: Sector vega Barros Negros hasta Pampa Pantanillo.

Se realiza la separación de este sector con el del llano Ciénaga Redonda debido a que en la vega de Barros Negros la quebrada principal se estrecha y el basamento fracturado/alterado se encuentra más superficial, dando paso a la formación de las vegas que se observan en este sector.

Como se advierte en los pozos (Figura 4-14 y Figura 4-15), el depósito sedimentario existente en este sector está conformado por gravas y arenas cuya fracción matricial exhibe proporciones menores de finos. El origen de estos rellenos es fluvio-aluvial y el espesor de estos sedimentos en el sector de la vega de Barros Negros, es relativamente pequeño (entre 15-40 m). Subyaciendo al relleno sedimentario se observa una toba fuertemente fracturada y alterada.

Hacia el sector de Pampa Pantanillo (zona más austral de la cuenca y límite con la cuenca de la Laguna del Negro Francisco) la estratigrafía de los pozos indica el mismo relleno sedimentario clástico no consolidado compuesto por gravas y arenas que se observa más al norte. Sin embargo, los espesores son mayores que en la vega Barros Negros, oscilando entre 70 y 90 m. Bajo este relleno detrítico se identifica un cuerpo intrusivo diorítico altamente argilizado en su techo y más fresco a medida que se profundiza en la columna. Cabe destacar que a unos 600 m aguas abajo del pozo RPG-21c, el registro estratigráfico del pozo RPG-21 valida el espesor del relleno clástico en 70 m; sin embargo, se identifica una toba fuertemente argilizada por lo que la presencia del instrusivo diorítico o bien, es muy puntual, o bien la descripción estratigráfica es errónea en alguno de los dos pozos.

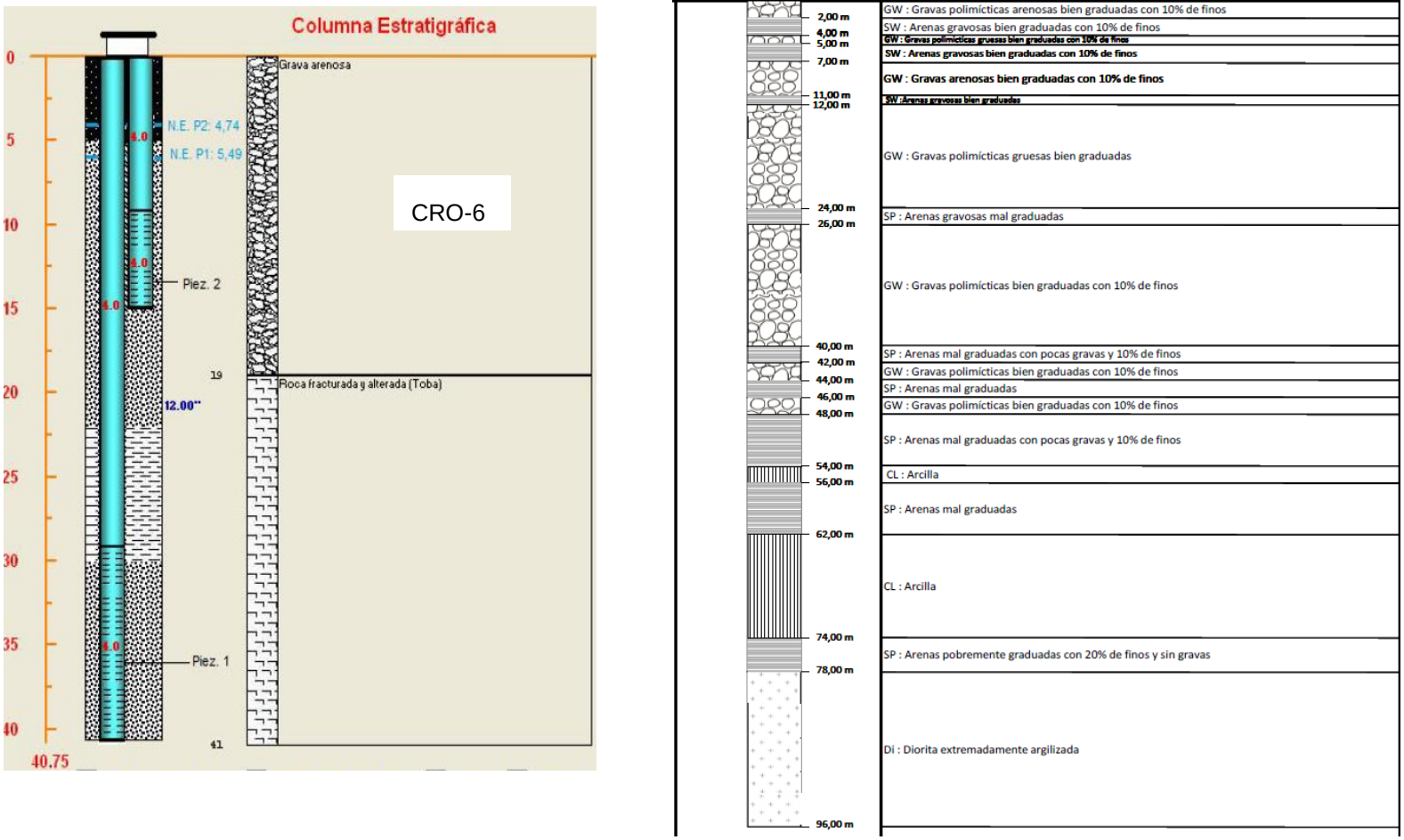


Figura 4-14: Columnas litológicas pozos CRO-6 y RPG-21c. Sector 4: Sector vega Barros Negros hasta Pampa Pantanillo.

Fuente: elaboración propia.

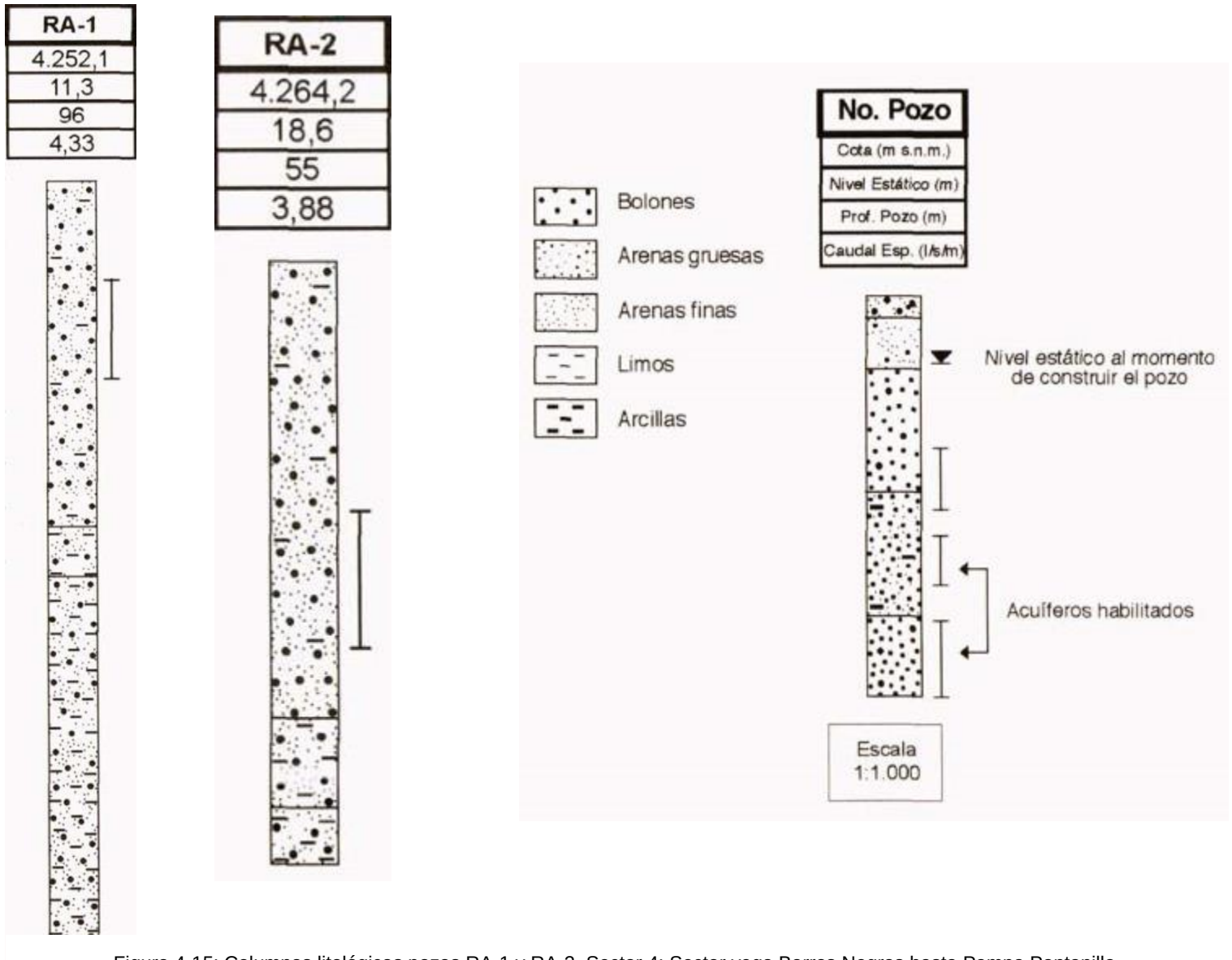


Figura 4-15: Columnas litológicas pozos RA-1 y RA-2. Sector 4: Sector vega Barros Negros hasta Pampa Pantanillo**.**

Fuente: elaboración propia.

Sector 5: Sector Río Lamas

Este sector corresponde al límite oriental de la cuenca Salar de Maricunga con Piedra Pómez, donde nace el Río Lamas.

Los pozos MWLR-1A y MWLR-2D (Figura 4-16), así como el pozo MWLR-3, muestran en superficie una secuencia de tobas y cenizas con intercalaciones de niveles de gravas y arenas que se relacionan con los depósitos poco consolidados de la Ignimbrita Tres Cruces de edad cuaternaria.

Subyaciendo esta unidad, se disponen rocas dacíticas porfíricas que afloran en el sector norte de la cuenca del Río Lamas, en el Cerro Los Portezuelos, en donde presentan un espesor de 260 m (pozo MWLR-3). Hacia el sur, en el sector de los pozos MWLR-1A y MWLR-2D, las dacitas son microporfíricas de espesor variable entre 20 m y 180 m, con un promedio de 150 m, y sobreyacen a andesitas microcristalinas. Estas rocas en su conjunto, por su similitud litológica y relativa cercanía a afloramientos de rocas dacíticas-andesíticas se relacionan con las rocas volcánicas del Plioceno Inferior que afloran en el borde sur de la cuenca de Río Lamas.

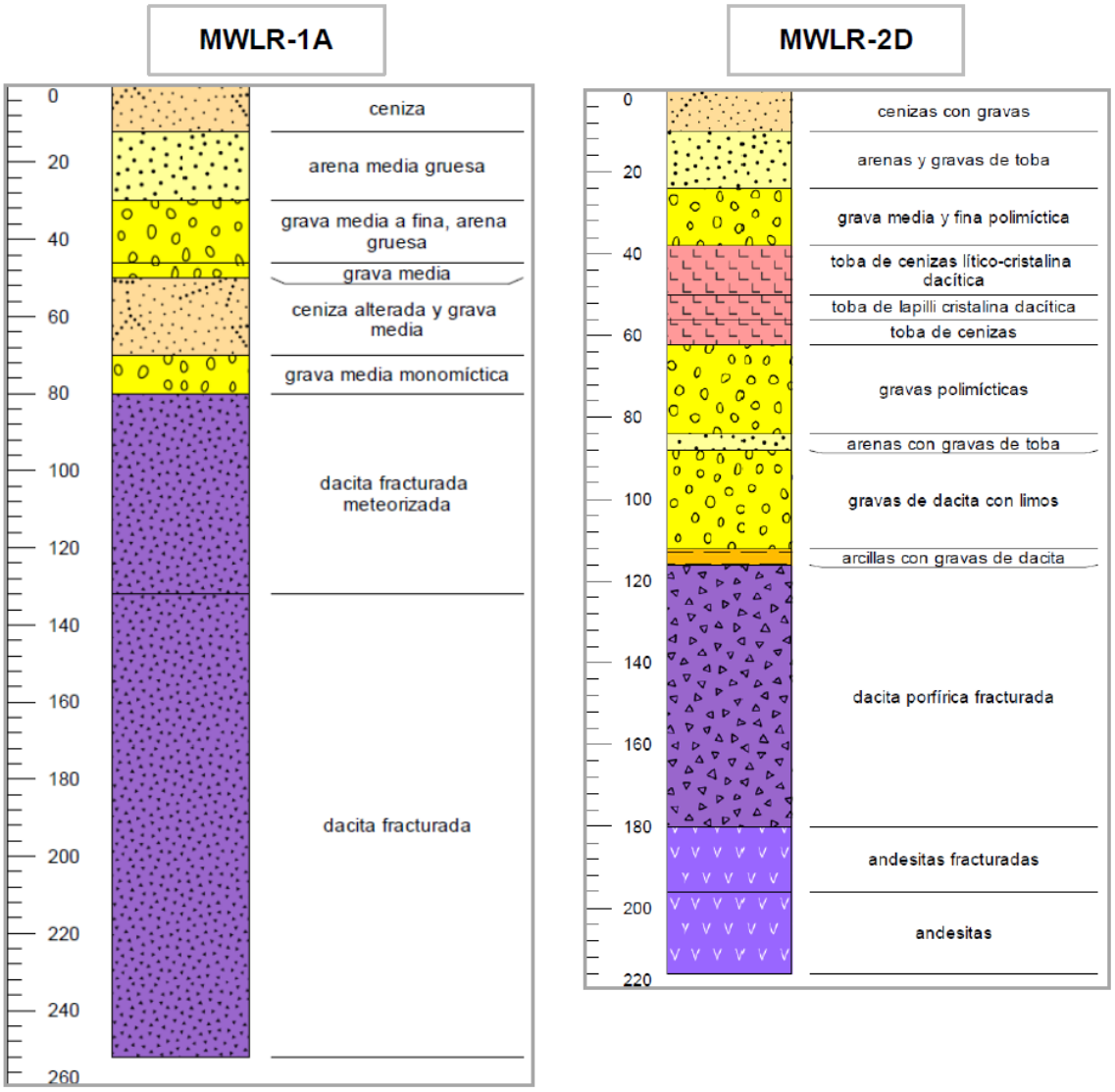


Figura 4-16: Columnas litológicas pozos MWLR-1A y MWLR-2D. Sector 5: Río Lamas.

Fuente: elaboración propia.

5. Caracterización hidrogeológica

5.1 Parámetros hidráulicos

5.1.1 Introducción

Para valorar el potencial de agua subterránea y evaluar el impacto del bombeo en el régimen hidrológico, es fundamental el conocimiento de los parámetros hidráulicos del acuífero. Estos son, por definición, los que determinan la viabilidad de explotación de un acuífero y corresponden, principalmente, a la transmisividad, conductividad hidráulica, y al coeficiente de almacenamiento.

La transmisividad corresponde a la facilidad del acuífero para la transmisión de agua. Se define como el producto entre la conductividad hidráulica del medio por su espesor saturado, lo que establece de forma directa la relación entre las dos variables.

La Tabla 5-1 muestra la relación de valores de conductividad hidráulica utilizada para la definición de unidades hidrogeológicas, utilizando como base la clasificación de Struckmeier & Margat (1995) (capítulo 5.2) y la clasificación del tipo de acuífero según Custodio & Llamas (2001).

K (m/día)	Calificación conductividad hidráulica	Unidad hidrogeológica	Calificación acuífero
10^4	Muy alta	UH-3	Acuíferos buenos a moderados
10^3		UH-3	
10^2		UH 3	
	Alta	UH-1 y UH-3	
10^1		UH-1 y UH-3	
	Media	UH-1, UH-2, UH-4	
1		UH-2 y UH-4	
	Baja	UH-4	Acuíferos pobres
10^{-1}		UH-4	
10^{-2}		UH-4 y UH-5	
	Muy baja	UH-5	
10^{-3}		UH-5	
10^{-4}		UH- 5 y UH-6	No acuífero
10^{-5}		UH-6	
10^{-6}		UH-6	

Tabla 5-1: Valores de conductividad hidráulica representativos en función de la calidad acuífera.

Fuente: elaboración propia.

El coeficiente de almacenamiento se define como la cantidad de agua que se necesita extraer de un acuífero para el abatimiento de un metro del nivel freático en una superficie de un metro cuadrado y corresponde al volumen de agua que se puede extraer de los materiales acuíferos. En la Tabla 5-2 se pueden consultar valores típicos de almacenamiento de diferentes materiales geológicos.

Tipo de acuífero	S
Acuíferos libres*	0,3 - 0,01
Acuíferos semiconfinados	0,001 - 0,0001
Acuíferos confinados	0,0001 - 0,00001

Tabla 5-2: Valores de coeficiente de almacenamiento (S) representativos en función del tipo de acuífero. Fuente: elaboración propia.

Actualmente, existen diferentes métodos para la obtención de los parámetros hidráulicos. En el caso del presente trabajo, para su obtención se han utilizado diferentes antecedentes que presentan datos obtenidos desde ensayos hidráulicos. En los siguientes capítulos, se expondrán los valores de los parámetros recopilados en la bibliografía previa a la realización del presente trabajo.

Los valores de transmisividad de las diferentes unidades geológicas han sido obtenidos principalmente de los siguientes informes:

- DGA-Amphos 21, 2016; M_REF.018.
- Sernageomin, 2000; M_REF.023.
- Sernageomin, 1999. M_REF.061.
- EIA Proyecto Volcán, 2012; M_REF.029.
- Technical Report on The Maricunga Lithium Project Region III, Chile, 2012; M_REF.060.
- EIA Cerro Casale, 2011; M_REF.062.
- EIA Proy Aldebarán; M_REF.064.

5.1.2 Transmisividad y conductividad hidráulica

Estos dos parámetros equivalentes (Transmisividad = Conductividad hidráulica x Espesor saturado), se pueden valorar a partir de diferentes interpretaciones, principalmente en función del tipo de acuífero ensayado (libre y confinado) y del tipo de ensayo (estacionario o transitorio).

A partir de los informes citados, se ha recopilado los valores de transmisividad y conductividad hidráulica de las diferentes unidades hidrogeológicas existentes en el terreno. Estos valores han sido calculados a partir de métodos clásicos de obtención de los parámetros, tales como Theis-Jacob (1935), Neumann (1987), Cooper-Jacob (1946), Hantush (1955), Lugeon (1933) y Papadopoulos (1962), a partir de la derivación de la ecuación de flujo en coordenadas cilíndricas y otros métodos cuya explicación excede el alcance del presente informe. Otros valores de transmisividad no calculados con anterioridad, han sido valorados según la formulación de Galofré, 1983:

$$T = \frac{Q}{s} 100$$

Donde:

T: Transmisividad en m^2/día

Q: Caudal en L/s

s: Descenso en m.

Esta fórmula corresponde a una primera valoración de la transmisividad, la cual proporciona un valor aproximado. Por su similitud, puede ser derivado desde caudal específico del pozo, que se define de la siguiente manera:

$$Q_e = \frac{Q}{s}$$

Donde

Q_e: Caudal específico (L/s/m)

Q: caudal de extracción (L/s)

s: Descenso (m)

Los parámetros fueron evaluados a partir de los diferentes ensayos de caracterización hidráulica realizados, los cuales incluyeron los siguientes tipos:

1. Ensayos de bombeo en pozos.
2. Ensayos de bombeo en calicatas.
3. Ensayos de Airlift.
4. Ensayos de Packer.

En los siguientes subcapítulos se detalla la evaluación de los parámetros en los diferentes tipos de ensayo.

5.1.2.1 Ensayos de bombeo en pozos

Se recopiló información de 48 pruebas de bombeo, que incluyeron un total de 91 pozos de observación. De ese total de pozos de observación, se midieron los descensos en los materiales aluviales modernos en 67 ocasiones; en 4 se midieron los descensos en pozos que atravesaban materiales aluviales y coluviales modernos, más 20 puntos en los que se midieron descensos en pozos que atravesaban materiales aluviales y volcánicos modernos. En la Tabla 5-3 se muestra el valor máximo, mínimo y la media aritmética de la conductividad hidráulica y de la transmisividad en función de los diferentes materiales atravesados. De la misma manera, en la Tabla 5-3, Tabla 5-4, Tabla 5-5, Tabla 5-6, se puede consultar el resumen de los ensayos de bombeo en los pozos.

Geología	**K (m/día)**			**T (m^2/día)**		
	Máx.	**Mín.**	**Med*.**	**Máx.**	**Mín.**	**Med*.**
Depósitos aluviales Modernos Qa	45	0,9	8,6	44.800	36	1.619
Depósitos aluviales y coluviales modernos Qa y Qc	3	0.07	0.695	450	6	97
Depósitos aluviales y volcánicos modernos Qa y Qv	--	--	--	2.080	127	387

Tabla 5-3: Permeabilidades obtenidas en ensayos de bombeo de pozos, según la litología perforada.

*Media geométrica de los ensayos.

Fuente: elaboración propia.

5.1.2.2 Ensayos de bombeo en calicatas

En total se realizaron 6 ensayos de bombeos en calicatas con observación del descenso producido en el mismo número de sondajes. En esos 6 ensayos, únicamente en 1 no registró variación del nivel de agua. En el siguiente cuadro se pueden observar el resumen de los resultados obtenidos.

Geología	**K (m/día)**		
	Máxima	**Mínima**	**Media**
Depósitos salinos Modernos Qs	208	15	70,24

Tabla 5-4: Permeabilidades obtenidas en ensayos de calicatas.

Fuente: elaboración propia.

Pozo de observación	X_UTM	Y_UTM	Elevación (msnm)_antecedentes	T_m2/d	K_m/d	S (coef. Almacenamiento)	Descensos_m (máx.)	Unidad geológica	L/s/m (Caudal específico)
ANDINA-3	500270	6985660	4060	1990	45		11,48	Qa	
ANDINA-1	500390	6985526	4060	928	15	4,50%	2,07	Qa	
ANDINA-2	500494	6986009	4055	1030	15	3,10%	1,02	Qa	
ANDINA-4	500293	6985995	4056	1160	17	3,20%	1,41	Qa	
CRO-1	500142	6985377	4077	1080	35	8,00%	2,24	Qa	
CRO-2	500087	6985044	4064	981	38	2,30%	9,56	Qa	
CRB-1	499942	6987554	4055	1710	8		15,85	Qa	
CRE-1	500030	6987642	4038	370	3	3,00%	2,05	Qa - MPla	
CAN-6	497868	7021417	3781	600-300	2	0,01%	32,19	Qa - MPla	1,24
CM-1	490880	7028274	3767	338			7,40	Qa	3,38
CR-1	500209	6985137	4085	1440	22		9,70	Qa	
CR-2	500311	6985629	4075	6	0,07		52,28	Qa - MPla	
CR-3	500134	6985282	4085	1520	26		11,39	Qa	14,04
CR-4	500129	6985577	4080	1590	22		11,23	Qa	0,14
HSC-23	499043	6991995	3995					Qa - MPla	
M-1	499373	6992947	3980	4082			2,45	Qa	40,82
M-2	499472	6992921	4020	1183			8,45	Qa	11,83
MDO-10	493814	7013898	3771	2327	21		5,70	Qa	8,77
MDO-12	493020	7032053	3759	654	11		14,25	Qa	1,75
MDO-13	491965	7031233	3781	468	4		2,50	Qa	12,00
MDO-14	491309	7032922	3792	36	1			Qa	
MDO-15	490947	7029481	3778	1020	22		9,10	Qa	3,30
MDO-23	491246	7007668	3807	5670			1,94	Qa	56,70
MDO-24	490466	7007348	3802	5490			2,55	Qa	54,90
MDO-8	494966	7016016	3774	5151	36		3,30	Qa	15,15
MDO-9	492113	7007953	3812	3158			1,90	Qa	31,58

Pozo de observación	X_UTM	Y_UTM	Elevación (msnm)_antecedentes	T_m2/d	K_m/d	S (coef. Almacenamiento)	Descensos_m (máx.)	Unidad geológica	L/s/m (Caudal específico)
PPB-1	520810	7021729	4423	135				Qa - Qv	1,35
PPB-1	520810	7021729	4423	204				Qa - Qv	
PPX-1	520795	7021712	4423	2380				Qa	
PPB-10	522240	7027259	4426	144				Qa-Qv	0,46
PPX-10	522225	7027242	4424	1020				Qa	
PPB-11	520444	7034590	4442	130				Qa-Qv-MPla	0,51
PPX-11	520631	7034944	4441	127				Qa - Qv	
PPB-12	528719	7024379	4523	3190				Qa	0,55
PPX-12	528687	7024366	4523	2310				Qa	
PPB-14	531372	7026386	4526	44800				Qa	2,24
PPB-18	532133	7024678	4557	880				Qa	0,82
PPB-19A	518203	7020353	4407	182				Qa - And	4,14
PPB-21	517955	7017980	4403	195				Qa-Qv	1,80
PPB-21	517955	7017980	4403	1505				Qa	
PPB-23	519980	7019945	4438	3750		5,00%	5,00	Qa	60,00
PPB-24	521924	7020016	4459	297				Qa	0,88
PPB-3	520886	7023584	4409	393				Qa - Qv	0,93
PPB-3	520886	7023584	4409	377				Qa - Qv	
PPB-4	517570	7020974	4408	414				Qa - Qv	3,00
PPX-4	517551	7020956	4408	2080				Qa - Qv	
PPB-5	516765	7018691	4416	707				Qa - Qv	2,00
PPX-5	516758	7018725	4417	676				Qa - Qv	
PPB-6	518860	7022574	4402	1370				Qa - Qv	1,47
PPX-6	518833	7022617	4402	1380				Qa - Qv	
PPB-6	518860	7022574	4402	880				Qa	
PPX-6	518833	7022617	4402	1480				Qa	

Pozo de observación	X_UTM	Y_UTM	Elevación (msnm)_antecedentes	T_m2/d	K_m/d	S (coef. Almacenamiento)	Descensos_m (máx.)	Unidad geológica	L/s/m (Caudal específico)
PPB-8	520143	7026901	4409	54				Qa	0,29
PPX-8	520125	7026931	4414	61			13,00	Qa	
PPX-9	520286	7030845	4408	47				Qa	0,14
PPX-9	520286	7030845	4408	127				Qa	
RA-1	496397	6965398	4266	1932			12,86	Qa	8,55
RA-2	495508	6963814	4284	6640			8,38	Qa	12,53
RA-3	496781	6966112	4252	614			22,42	Qa	2,01
PPB-1	520810	7021729	4423	2200		N/A	37,00	Qa	1,65
PPB-19A	518203	7020353	4407	5000		N/A	18,75	Qa	4,85
PPB-23	519980	7019945	4438	4500		N/A	19,00	Qa	4,58
PPX-1	520795	7021712	4423	1735		0,20%	10,00	Qa	
PPB-1	520810	7021729	4423	1735		0,20%	0,02	Qa	
PPX-3	520984	7024052	4406.93	1800		0,50%	0,02	Qa	
PPB-3	520886	7023584	4409	1800		0,50%	0,05	Qa	
PPX-4	517551	7020956	4408	1339		0,40%	0,40	Qa	
PPB-4	517570	7020974	4408	1339		0,40%	0,35	Qa	
PPX-5	516758	7018725	4417	1856		0,60%	0,20	Qa	
PPB-5	516765	7018691	4416	1856		0,60%	0,20	Qa	
PPX-6	518833	7022617	4402	617		0,50%	0,10	Qa - And	
PPB-6	518860	7022574	4402	617		0,50%	0,10	Qa - And	
PPB-21	517955	7017980	4403	1445		0,50%	0,07	Qa	
PPB-24	521924	7020016	4459	270		0,90%	0,05	Qa	
RPG-21	494532	6961973	4275	2928		N/A	15,73	Qa	
RPG-32	494519	6961979	4275	5270		8,2 x 10-8	1,38	Qa	
RPG-38	494598	6962292	4277	1437		0,03%	0,93	Qa	
RPG-21c	494895	6962445	4279	11293		0,00%	0,20	Qa	

Pozo de observación	X_UTM	Y_UTM	Elevación (msnm)_antecedentes	T_m2/d	K_m/d	S (coef. Almacenamiento)	Descensos_m (máx.)	Unidad geológica	L/s/m (Caudal específico)
RPG-22	496007	6964571	4257	N/A		N/A	0,00	Qa	
RPG-31	496743	6966540	4237	N/A		N/A	0,00	Qa - Qv	
RPG-30	499553	6998123	3931	8208			2,49	Qa	
RPG-26	499343	6998561	3927	3467	0,040		0,27	Qa	
RPG-27	499528,09	6998523	3928				0,04	Qa - Qv	
RPG-28	499541,41	6998131	3931	6801	0,006		0,86	Qa	
RPG-29	499189,47	6999457	3919				0,0	Qa - Qv	
M-1	497006	6993950	3980	10.506 / 11.856		N/A	3,05	Qa	
RPG-23	499541	6998131	3982	10.000 / 11.500		0,20%	0,50	Qa	
RPG-24	499364	6992737	3978	10.000 / 11.500		0,20%	0,50	Qa	
RPG-25	499528	6993109	3980	13295		0,20%	0,80	Qa	

Tabla 5-5: Parámetros hidráulicos obtenidos en los ensayos de bombeo en pozos.

Fuente: elaboración propia.

Pozo de observación	X_UTM	Y_UTM	Elevación (msnm)_antecedentes	T_m2/d	K_m/d	S (coef. Almacenamiento)	Descensos_m (máx.)	Unidad geológica	L/s/m (Caudal específico)
T1					208,00	24%	0,030	Qs	
T2					84,00	28%	0,050	Qs	
T3					145,00	24%	0,040	Qs	
T4							0,000	Qs	
T5					15,00	12%	0,450	Qs	
T6					45,00	4%	0,170	Qs	

Tabla 5-6: Parámetros hidráulicos obtenidos en los ensayos de bombeo en calicatas.

Fuente: elaboración propia.

5.1.2.3 Ensayos de Airlift

En total se han evaluado 2 ensayos de *airlift* realizados en 2 pozos de bombeo. No se ha contemplado el total de los ensayos para la definición de parámetros ya que los ensayos de *airlift* se realizan durante la perforación del pozo y, normalmente, una vez acabada la construcción, se realiza un ensayo de bombeo, donde se obtienen datos más fiables que en los primeros. En la siguiente tabla se puede consultar los parámetros hidráulicos obtenidos a partir de los ensayos de airlift (Tabla 5-7). De la misma manera, en la Tabla 5-9 se puede consultar la totalidad de las pruebas revisadas.

Geología	**K (m/día)**			**T (m^2/día)**		
	Máxima	Mínima	Media	Máxima	Mínima	Media
Depósitos aluviales Modernos Qa	41	40	40,5	993	956	974,3

Tabla 5-7: Permeabilidades en los bombeos de las calicatas.

5.1.2.4 Ensayos de Packer

Otro ensayo característico en la valoración de parámetros hidráulicos es el ensayo de *Packer*, en el que, mediante el aislamiento de una zona en el interior de la perforación y la inyección de agua en la misma, se puede calcular la permeabilidad del medio. Este ensayo es característico de medios de baja permeabilidad, para evaluar las condiciones del terreno para el emplazamiento de presas u otro tipo de construcciones hidráulicas. En la Tabla 5-8 se puede consultar los valores de permeabilidad obtenidos mediante este método y en la Tabla 5-10 la totalidad de las pruebas revisadas.

Geología	**K (m/día)**		
	Máxima	Mínima	Media
Estratovolcanes del Mioceno Tmo	0,240	0,013	0,034

Tabla 5-8: Permeabilidades en los bombeos de las calicatas.

Pozo de observación	X_UTM	Y_UTM	Elevación (msnm)_antecedentes	T_m2/d	K_m/d	S (coef. Almacenamiento)	Descensos_m (máx.)	Unidad geológica	L/s/m (Caudal específico)
P1	494040	7025900	3758	993	41		0,08	Qa	52
P2	494040	7023400	3758	956	40		0,08	Qa	121

Tabla 5-9: Parámetros hidráulicos obtenidos en los ensayos de bombeo.

Pozo de observación	X_UTM	Y_UTM	Elevación (msnm)_antecedentes	T_m2/d	K_m/d	S (coef. Almacenamiento)	Descensos_m (máx.)	Unidad geológica	L/s/m (Caudal específico)
PTG-1A	497006	6993950	4233		0,019			TMo	
PTG-2A	497299	6993943	4255		0,100			TMo	
PTG-3A	497226	6994203	4269		0,092			TMo	
PTG-4A	496979	6994215	4328		0,016			TMo	
PTG-5B	497477	6994257	4225		0,014			TMo	
PTG-6A	497158	6994495	4377		0,240			TMo	
PTG-7A	496763	6993979	4341		0,140			TMo	
PTG-8A	496552	6987436	4159.02		0,036			TMo	
PTG-9A	496449	6987920	4233.95		0,027			TMo	
PTG-10A	496235	6987711	4212.22		0,036			TMo	
PTG-11A	496149	6987200	4375.82		0,013			TMo	
PTG-12A	496672	6986931	4194.92		0,015			TMo	
PTG-13A	497044	6987773	4259.49		0,018			TMo	
PTG-14A	496036	6987999	4308.53		0,018			TMo	

Tabla 5-10: Parámetros hidráulicos obtenidos en los ensayos de bombeo (continuación).

5.1.2.5 Cartografías de permeabilidad hidráulica y transmisividad

De forma adicional, para una mejor caracterización hidrogeológica de la zona, se ha realizado un mapa de valores de transmisividad (Figura 5-1) para observar la distribución de estos parámetros a lo largo de las localizaciones donde existan ensayos de bombeo. A grandes rasgos, de estas figuras se puede deducir lo siguiente:

- Las zonas donde se concentran la mayor cantidad de perforaciones corresponden a aquellas con mayor transmisividad y conductividad hidráulica, y a su vez a los materiales aluviales de los sectores quebrada y Llano de Ciénaga Redonda, Piedra Pómez y los materiales evaporíticos del salar.
- Los materiales geológicos de Ciénaga Redonda presentan alta conductividad hidráulica y transmisividad, a excepción de los pozos perforados al oeste de la quebrada.
- Los materiales salinos del salar presentan valores de transmisividad y conductividad hidráulica con rangos entre moderados a altos. Este material, además de presentar porosidad primaria, tiene una porosidad secundaria conferida por la disolución de la sal.
- En el sector de Piedra Pómez presenta transmisividades de medias a elevadas.

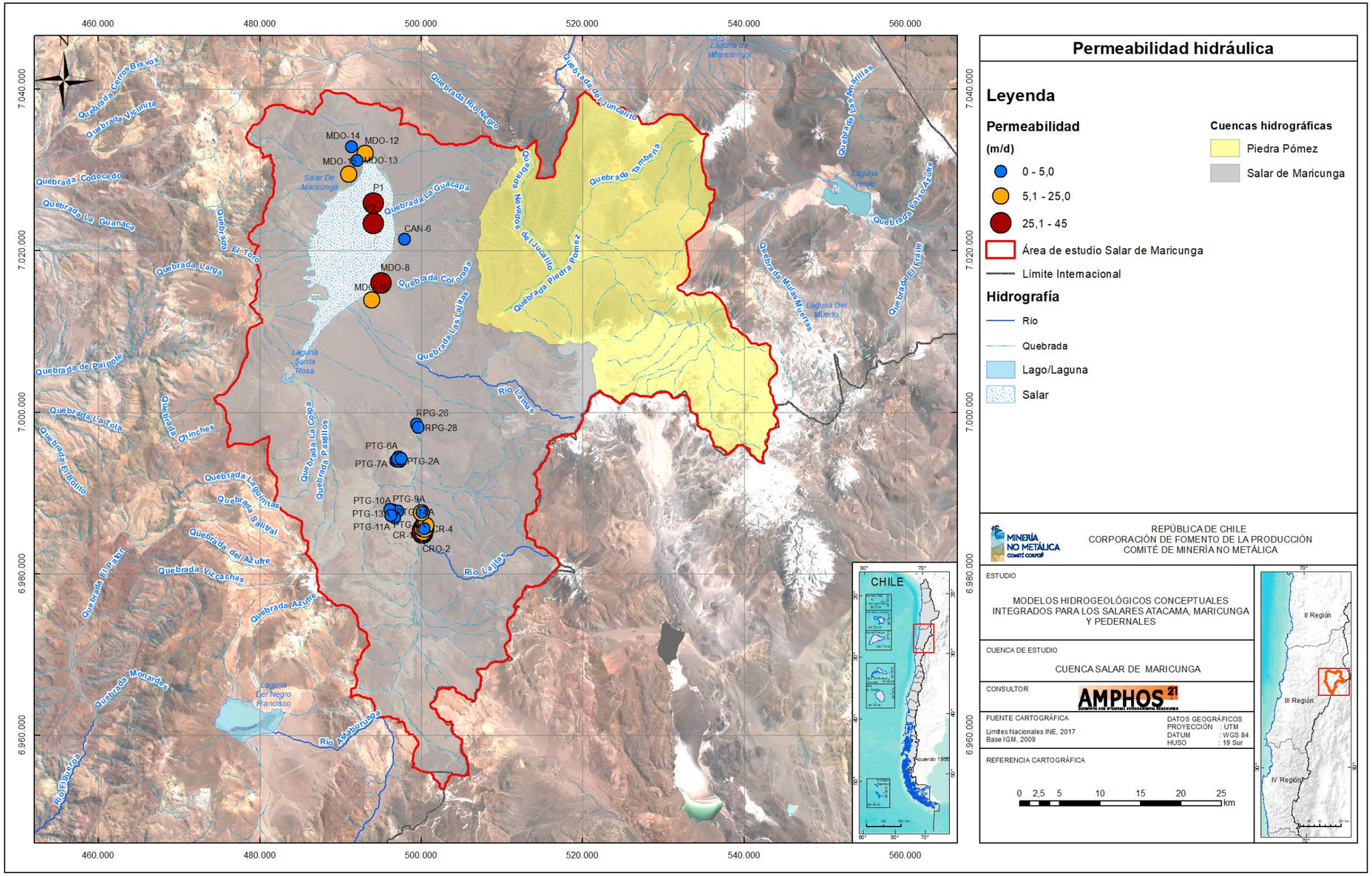


Figura 5-1: Mapa de distribución de transmisividad de la cuenca de Maricunga, a partir de los ensayos realizados.

Fuente: elaboración propia.

5.1.3 Porosidad Efectiva

En el año 2012, Li3ENERGY realizó un programa de exploración para estimar los recursos de litio y potasio contenidos en las salmueras. Mediante el análisis de laboratorio de 318 muestras, se estimó la porosidad efectiva de las principales litologías de la zona de estudio; principalmente secuencias de halita, finos y sedimentos arenosos. Los resultados de porosidad efectiva media se presentan en la Tabla 5-11.

Tipología de litologías dominante en el Salar	Porosidad efectiva (%) Fuente Li3ENERGY	
halita + limos	Mín.	0,2
	Máx.	20,3
	Prom.	3,1
sedimentos finos	Mín.	0,1
	Máx.	6,6
	Prom.	1
costra halita profunda	Mín.	4
	Máx.	
	Prom.	
Sedimentos detríticos profundos	Mín.	0,0005*
	Máx.	
	Prom.	
*Se considera que estos materiales se encuentran confinados por las arcillas/limos de base de la formación aluvial del Llano Ciénaga Redonda y de la Pampa Maricunga. Por ello se considerarán los rangos de porosidad efectiva/coeficiente de almacenamiento próximas de un acuífero confinado (0,001 a 0,0001).		

Tabla 5-11: Valores promedio de porosidad efectiva

5.1.4 Síntesis y conclusiones de los parámetros hidráulicos

En la zona de estudio se ha recopilado y revisado 111 pozos-piezómetros con ensayos de hidráulicos que afectan a varias de las litologías presentes en la zona de estudio. Las conclusiones parciales más relevantes con respecto a la parametrización hidráulica de los materiales, son las siguientes:

- A partir de los resultados recopilados y revisados se puede deducir que las zonas donde existen valores de transmisividad y conductividad hidráulica corresponden a aquellas con materiales aluviales de la quebrada y el llano de Ciénaga Redonda, Piedra Pómez y los materiales evaporíticos del salar.
- Debido a las características constructivas de las perforaciones, en otras ocasiones se ha evaluado la permeabilidad conjunta de las unidades de materiales aluviales y coluviales, y

volcánicos modernos. En estos ensayos, a pesar de obtenerse valores de K y T elevados, la presencia de capas menos permeables o transmisivas que las de materiales aluviales, limita el valor de los parámetros globales estimados.

- Adicionalmente, se ha podido valorar la permeabilidad de los depósitos salinos modernos, pudiendo clasificar esta unidad como UH 3.
- Se ha podido valorar la permeabilidad del material TMo (Estratovolcanes del Mioceno), obteniendo valores correspondientes a unidades de baja a muy baja productividad.
- Respecto al coeficiente de almacenamiento se han podido recuperar muy pocos valores. El rango de valores revisado presenta características similares al de un acuífero libre.
- En la Tabla 5-12 se presenta una tabla resumen de los diferentes valores de conductividad hidráulica y transmisividad, obtenida en las diferentes litologías ensayadas.

Unidad Geológica (UG)	K (m/día)			T (m^2/día)		
	Máx.	**Mín.**	**Med**	**Máx.**	**Mín.**	**Med**
Depósitos aluviales modernos Qa	45	0,9	8,6	44.800	36	1.619
Depósitos aluviales y coluviales modernos Qa y Qc	3	0,07	0,695	450	6	97
Depósitos aluviales y volcánicos modernos Qa y Qv	-	-	-	2.080	127	387
Depósitos salinos modernos Qs	208	15	70,24	-	-	-
Estratovolcanes del Mioceno TMo	0,24	0,013	0,034	-	-	-

Tabla 5-12: Cuadro resumen de valores de conductividad hidráulica y transmisividad en diferentes Unidades Geológicas de la zona de estudio.

5.2 Unidades hidrogeológicas

5.2.1 Unidades hidrogeológicas (UH)

Las Unidades Hidrogeológicas (UH) se han definido según la guía para la elaboración de mapas hidrogeológicos de Struckmeier & Margat (1995), publicada por el "International Association of Hydrogeologist". Esta metodología ha sido utilizada con anterioridad en los mapas hidrogeológicos publicados por SERNAGEOMIN.

De esta forma, la clasificación de las UH se ha efectuado en función de las características litológicas, espesores y extensión de las unidades geológicas, así como el potencial hidrogeológico que presentan, según los parámetros hidráulicos estudiados en el capítulo 5.1.

A continuación, se presenta un breve resumen de las características de cada UH definida en la cuenca, mientras que en la Figura 5-2 se muestra de forma esquemática las relaciones que presentan entre ellas. Dicha clasificación proporciona información sobre la ocurrencia de agua subterránea y el régimen de flujo.

- **UH 1**: las unidades de esta categoría conforman acuíferos cuyo flujo es principalmente intergranular. Constituyen unidades de espesor significativo y extensión relativamente importante y, además, son altamente productivos (presentan valores elevados de transmisividad). Están formados, sobre todo, por depósitos no consolidados, aunque también pueden representar depósitos consolidados. En general, se pueden considerar como unidades de alta importancia hidrogeológica.
- **UH 2**: conforman acuíferos cuyo flujo es principalmente intergranular. Constituyen unidades que conforman acuíferos altamente productivos y discontinuos o de carácter local. Por otro lado, pueden ser moderadamente productivos (presentan valores medios de transmisividad) y formar acuíferos de espesor y extensión relativamente importante. Están formados, sobre todo, por depósitos no consolidados, aunque también pueden representar depósitos consolidados. En general, se pueden considerar como unidades de media a baja importancia hidrogeológica.
- **UH 3:** conforman acuíferos fisurados o kársticos, cuyo flujo subterráneo se transmite principalmente en un medio poroso de fracturas y/o diaclasas. Constituyen unidades de espesor significativo y extensión relativamente importante y además, son altamente productivos (presentan valores elevados de transmisividad). Generalmente, están formados por rocas fracturadas. Se pueden considerar como unidades de alta importancia hidrogeológica.

- **UH 4:** conforman acuíferos fisurados o kársticos, cuyo flujo subterráneo se transmite principalmente fallas y/o diaclasas. Constituyen unidades que conforman acuíferos altamente productivos y discontinuos o de carácter local. Por otro lado, pueden ser moderadamente productivos (presentan valores medios de transmisividad) y formar acuíferos de espesor y extensión relativamente importante. Se consideran unidades de media a baja importancia hidrogeológica.
- **UH 5:** constituyen acuíferos menores que contienen recursos limitados y locales de agua subterránea. Las formaciones que se agrupan en dicha unidad pueden ser rocas y/o depósitos no consolidados con muy baja importancia hidrogeológica (presentan valores muy bajos de transmisividad). Se consideran unidades de muy baja importancia hidrogeológica.
- **UH 6**: constituyen formaciones esencialmente sin recursos de agua subterránea (impermeables).

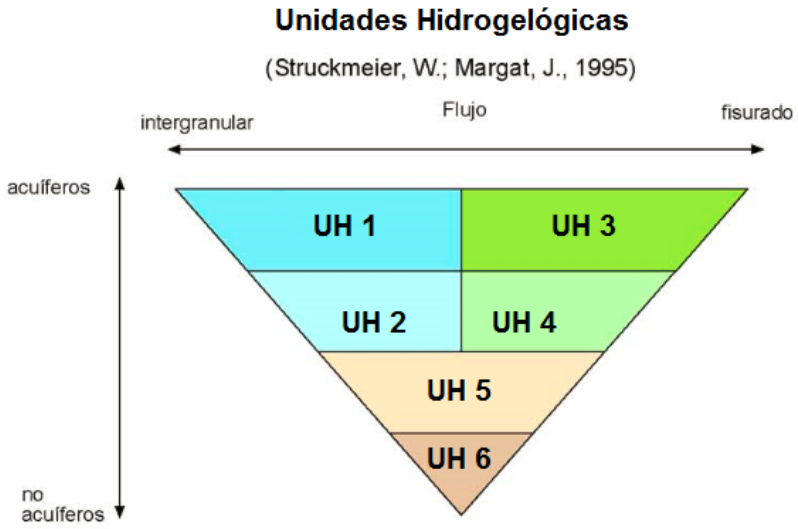


Figura 5-2. Clasificación de las Unidades Hidrogeológicas en la cuenca.

A continuación, se describen con detalle las unidades hidrogeológicas identificadas en la cuenca de estudio.

5.2.2 Descripción Unidades Hidrogeológicas

5.2.2.1 Unidad hidrogeológica 1

Esta unidad se encuentra constituida por depósitos no consolidados de elevada importancia hidrogeológica. En este caso, los materiales corresponden a depósitos cuaternarios y terciarios de origen aluvial y, en menor medida, fluvial formados por variaciones de contenido en la proporción de gravas, arenas, limos e incluso granulometría tamaño bloque. Las unidades geológicas que corresponden a esta unidad son las siguientes:

- Qa: Depósitos aluviales
- MsPa: Depósitos aluviales antiguos

Morfología, relaciones estratigráficas, distribución en planta y espesores

La unidad se encuentra emplazada a lo largo de los llanos de Ciénaga Redonda, llano de Salar de Maricunga, llano de quebrada Caballo Muerto y en los diferentes valles aluviales principales que alimentan la cuenca Salar de Maricunga. Por el NE, en la cuenca Piedra Pómez, la unidad se emplaza en los valles, en el propio campo de Piedra Pómez y en la Pampa de Barrancas Blancas, esencialmente. La unidad presenta un desarrollo máximo en el llano de Ciénaga Redonda y en la quebrada homónima, con potencias que alcanzan hasta los 150 m (pozos MDO-24, MDO-23, MDO-9). Respecto al llano quebrada Caballo Muerto, ubicado al noroeste del Salar, se estima una potencia cercana a los 50 m (pozos MDO-14, MDO-12), mientras que en el llano Salar de Maricunga, ubicado al noreste del Salar; espesores que no superan los 100 m (pozo CAN-6).

A pesar de que, en otros emplazamientos, tales como los sectores centrales del campo de Piedra Pómez y de la pampa Barrancas Blancas se pueden alcanzar valores similares, los espesores más comunes se reducen sustancialmente (la potencia promedio del cuaternario aluvial en Piedra Pómez es de 60 m).

Las litologías de la unidad presentan morfologías de canales y abanicos aluviales, repartidos por las dos cuencas hidrográficas.

Características como acuífero y propiedades hidráulicas

En estos materiales se desarrollan buenos niveles acuíferos con grandes potenciales de productividad hidrogeológica. Estos niveles presentan en general transmisividades muy altas (que pueden llegar a ser superiores a 10.000 m^2/día) y buenos coeficientes de almacenamiento (entre el 5 y el 25%).

Recarga y descarga

Los materiales con buenas tasas de recarga se distribuyen, principalmente, en las cabeceras de los ríos y en las zonas apicales de los abanicos aluviales en las épocas de deshielo. Otros procesos que contribuyen a la recarga, en menor orden de magnitud, son las nevadas, lluvia y la recarga fluvial. Las descargas de esta unidad se producen por las extracciones en los pozos de bombeo y por la descarga hacia otras unidades hidrogeológicas, principalmente la UH 3 en el centro del salar.

5.2.2.2 Unidad hidrogeológica 2

Esta unidad se encuentra formada por depósitos no consolidados de media a baja importancia hidrogeológica. Se encuentra formada por depósitos antiguos y actuales de origen coluvial, depósitos de remociones en masa y glaciares, todos ellos compuestos por proporciones variables de gravas, arenas, limos y, localmente, arcillas. También, se encuentra formado por depósitos piroclásticos no consolidados asociados al volcán Tres Cruces. Dentro de esta unidad hidrogeológica, se encuentran las siguientes unidades geológicas:

- Mga: Gravas de Atacama
- Qv (e): Derrubios del macizo Tres Cruces.
- Qc: Depósitos coluviales.
- Qac: Depósitos coluviales y aluviales.
- Qrm: Remociones en masa.
- Qitc: Ignimbrita Tres Cruces.
- Qp: Depósitos piroclásticos pumíceos.
- Qg: Depósitos glaciares.
- Qh: Vegas y humedales.
- Plsv(c): Derrubios
- Tac: Depósitos coluviales antiguos (Triásico)
- MsPls: Depósitos antiguos del Salar de Maricunga.

Debido a la heterogeneidad de los depósitos antiguos del Salar de Maricunga, formados por capas de halita y rodeados de materiales arcillosos, estos materiales se clasifican tanto en la UH2 (material arcilloso) como en la UH3 (material salino).

Morfología, relaciones estratigráficas, distribución en planta y espesores

Unidad formada principalmente por depósitos coluviales, aluviales antiguos, materiales piroclásticos e ignimbríticos. Los materiales coluviales se posicionan en sectores con alta pendiente, alcanzando baja potencia, lo que provoca el escaso desarrollo de las unidades para el almacenamiento de agua. A su vez, los materiales volcánicos presentan un mayor desarrollo, aunque debido a la presencia de finos (ceniza), se reduce la permeabilidad de estos. También forman parte de esta unidad los depósitos antiguos arcillosos del Salar de Maricunga, en los que se han desarrollado numerosos ensayos de bombeo obteniendo valores medios de permeabilidad y transmisividad.

Características como acuífero y propiedades hidráulicas

Corresponden a materiales de transmisividad moderada a baja. Los depósitos coluviales presentan un gran espectro de granulometrías, mientras que los volcánicos pueden tener incrementos o reducción de la permeabilidad debido a la presencia (o ausencia) de piedra pómez o ceniza. A pesar de tener

permeabilidades mayores, el hecho del emplazamiento de los coluviales en las vertientes de los cerros, limitan la capacidad de almacenaje de agua.

Recarga y descarga

La recarga de estos materiales se produce asociada, principalmente, al derretimiento de la nieve en la época de deshielo. Estos materiales constituyen acuíferos en tránsito debido a su baja capacidad de almacenamiento. Localmente, pueden encontrarse constituyendo acuíferos colgados o alimentar las diferentes surgencias presentes en la zona. En la base de estos depósitos se pueden generar vertientes, debido al rápido vaciado de los mismos. Es destacable la descarga en el salar, causada por la evapotranspiración producida en los depósitos tipo vega.

5.2.2.3 Unidad hidrogeológica 3

La unidad se encuentra constituida por rocas fracturadas o por permeabilidad generada por disolución química, de elevada importancia hidrogeológica. Se encuentra formada por depósitos salinos, modernos y antiguos, de origen evaporítico. También forman parte de la unidad, los depósitos de precipitados carbonáticos del río Lamas y el Llano Tres Cruces. Las siguientes unidades geológicas son las que conforman la unidad hidrogeológica definida:

- Qca: Depósitos Carbonatados
- Qs: Depósitos salinos del Salar de Maricunga.
- Qs(a): Costra de halita en bloques.
- Qs (b): Costra plana de halita.
- Qs(c): Lámina de halita.
- MsPls: Depósitos antiguos del Salar de Maricunga.

Morfología, relaciones estratigráficas, distribución en planta y espesores

Corresponden a depósitos, esencialmente, superficiales, los que constituyen una plataforma de forma elíptica de 17 x 10 km de extensión. Los depósitos evaporíticos peneplanizan el centro de la cuenca y se encuentran interrelacionados con los depósitos aluviales que los rodean. Los depósitos antiguos del salar en profundidad pueden acabar gradando una unidad hidrogeológica diferente (UH2), debido a la gran presencia de arcillas.

Características como acuífero y propiedades hidráulicas

Presentan materiales de alta permeabilidad. Ésta es, principalmente, mixta debido a la fracturación y disolución de los depósitos, la cual se puede producir por interacción con agua de menor salinidad. Estos materiales presentan un elevado potencial hidrogeológico por su alta porosidad y su elevada permeabilidad.

Recarga y descarga

La unidad constituye la principal zona de descarga de la cuenca debido a las altas tasas de evaporación que se producen en el salar, por el efecto de la cercanía del nivel freático respecto a la superficie. Estos materiales se recargan lateralmente por los materiales aluviales de la unidad hidrogeológica 1.

5.2.2.4 Unidad hidrogeológica 4

Se encuentra constituida por rocas fracturadas o con porosidad por disolución, de media a baja importancia hidrogeológica. Los principales materiales que la conforman son depósitos coluviales, volcanoclásticos antiguos y evaporíticos fracturados, materiales volcánicos modernos y las formaciones sedimentarias del Jurásico y el Cretácico. Dentro de esta unidad hidrogeológica se encuentran englobadas las siguientes unidades geológicas:

- EOh: Facies volcanoclástica y evaporítica, Fm Huidobro.
- Ja: Formación Asientos
- JKp: Formación Pedernales
- Jm: Formación Montandón
- Jqv: Formación Quebrada Vicuñita.
- Kle: Estratos El Leoncito
- Kqm: Formación Quebrada Monardes
- Mipp: Estratos de Piedra Pómez
- Mmrl: Estratos del Río Lamas.
- Msqm: Gravas de la Quebrada Manantiales
- Omcg: Estratos Claudio Gay
- Pliv: Conjunto de volcanes del Plioceno Inferior
- TrJem: Estratos El Mono

Morfología, relaciones estratigráficas, distribución en planta y espesores

Los materiales sedimentarios Oligoceno Mioceno ocupan grandes extensiones en superficie en los márgenes del Salar de Maricunga. Estos presentan espesores relativamente constantes de aproximadamente 50 m en la zona de Piedra Pómez y Maricunga. En Piedra Pómez, presentan continuidad lateral con los materiales de la UH 1, aunque quedan ligeramente desconectados de los materiales del salar debido a su aislamiento por rocas de la UH 5.

Otros materiales que conforman la UH 4 presentan, en general, menor desarrollo superficial, aunque también tienen potencias de roca y espesores saturados relativamente interesantes. Estos niveles corresponden a las formaciones sedimentarias del Mesozoico y a las lavas del Jurásico Cretácico.

Características como acuífero y propiedades hidráulicas

Los materiales más desarrollados presentan permeabilidades entre 0,05 y 0,0005 m/día, justo al límite de ser considerados como unidad hidrogeológica de calidad inferior.

Estos depósitos presentan porosidad debido a la fracturación, con una cierta variabilidad en densidad de fracturas, comprendida entre 1 hasta 10 facturas por metro, en las zonas tectónicamente más afectadas en los límites de la cuenca. De forma local se pueden encontrar formaciones con un ligero incremento de la permeabilidad que, al encontrarse limitadas por materiales más impermeables pierden parte de su potencial hidrogeológico. Estos materiales se encuentran formando acuíferos fracturados libres o semi-confinados, con un potencial hidrogeológico entre moderado y bajo.

Recarga y descarga

La recarga de estos acuíferos se produce, principalmente, debido a la recarga desde los acuíferos superiores a partir del deshielo, por el propio deshielo en los sectores más elevados y por los diferentes cursos superficiales presentes en la zona, como por ejemplo el río Lamas en el sector del salar.

5.2.2.5 Unidad hidrogeológica 5

Está constituida por rocas y depósitos no consolidados de baja importancia hidrogeológica. Esta unidad hidrogeológica se encuentra formada por unidades geológicas compuestas por diferentes productos volcánicos tales como tobas, lavas, ignimbritas y depósitos piroclásticos. Las unidades geológicas que se incluyen en la UH 5 son las siguientes:

- EOlv: Estratos la Vertiente
- Miilt: Ignimbrita Los Terneros
- Mipp: Estratos de Piedra Pómez
- Mit: Domos Torito y Toro Sal
- Miv: Lavas y Domos del Mioceno inferior
- Mmim: Ignimbrita Maricunga
- Mmiva: Ignimbrita de Valle Ancho
- Mmv: Conjunto de Volcanes del Mioceno superior
- Msisa: Ignimbrita san Andrés
- Msv(b): Depósitos de flujo piroclástico formados por bloques y ceniza
- Mv(a): Lavas andesíticas y/a dacíticas
- Omcg: Estratos Claudio Gay
- OMv: Lavas y domos del Oligoceno-Mioceno
- Pfp: Depósitos de flujo piroclástico
- Pliv(c): Cono adventicio y lava andesítico-basáltica asociada
- Plsv: Conjunto de volcanes del Plioceno Superior
- Plsv(d): Depósitos piroclásticos de caída proximal

- Qv(c): Escoria y conos de escoria
- Qv(d): Macizos, conos y coladas de lava predominantemente dacíticas
- Tlc: Tobas y brechas del Oligoceno-Mioceno
- Tls: Coladas de lava andesíticas y dacíticas
- TMdh: Lavas del volcán Dos Hermanos
- Tmo: Estratovolcanes del Mioceno medio al superior
- TMv: Lavas y materiales piroclásticos
- Tvca: Lavas del volcán Azufre
- Tvcc: Ignimbritas del volcán Copiapó
- Tvcs: Lavas dacíticas del cono Copiapó

La unidad se encuentra formada por materiales de baja permeabilidad, con limitado espesor y bajos coeficientes de almacenamiento, debido a la presencia de materiales tales como ceniza fina y arcillas, y a la alta pendiente de los depósitos más superficiales. Combinan la baja recarga con las bajas permeabilidades, por lo que tienen un bajo potencial hidrogeológico.

En algunos de los materiales la presencia de intercalaciones con limitada permeabilidad impide la conectividad hidráulica de la formación, como por ejemplo la existencia de cenizas volcánicas o rocas piroclásticas con mayor grado de soldadura.

5.2.2.6 Unidad hidrogeológica 6

Se encuentra constituida por rocas y depósitos no consolidados de nula importancia hidrogeológica, los cuales conforman el sustrato rocoso (basamento impermeable) y está formada por rocas intrusivas y pórfidos, de edades comprendidas entre el Paleozoico y el Mioceno, con composiciones principalmente dioríticas, gabroides y granodioríticas. También, se encuentra formada por potentes series sedimentarias de origen continental, marino y/o volcanosedimentario, de edades comprendidas entre el Paleozoico y el Cretácico, con intercalaciones de lavas basálticas. Estas series sedimentarias comprenden litologías tales como conglomerados, areniscas y sedimentos calcáreos. Las siguientes unidades geológicas son las que conforman la UH 6:

- DCch: Formación Chinches
- Kcc: Estratos Los Carneros
- KTgb: Monzogabros de Codoceo
- KTmzd: Monzodioritas y pórfidos
- KTp: Estratos de la Quebrada los Patos
- KTpgd: Pórfidos granodioríticos
- Mih: Intrusivos hipabisales andesíticos
- Mmh: Intrusivos hipabisales dacíticos
- Mv(b): Domos dacíticos – riodacíticos

- OMv: Lavas y domos del Oligoceno-Mioceno
- Pep: Formación Pantanoso
- PeTrg: Granitoides Pérmico-Triásico
- Pliv(e): Domos dacíticos
- Pzc: Intrusivos de Quebrada Caballo Muerto
- Pzlt: Formación La Tabla
- Pzmd: Monzodiorita cuarcífera de la Cuesta los Colorados
- Qv: Conjunto de Volcanes del Cuaternario
- TMv(c): Domos extrusivos dacíticos.
- Tvca: Lavas del volcán Azufre
- Tvcs: Lavas dacíticas del cono Copiapó
- Pep: Formación Pantanoso

Corresponden a materiales, prácticamente, impermeables debido al escaso fracturamiento y a la presencia de arcillas que pueden ser de origen hidrotermal. Estos materiales presentan casi una nula capacidad de almacenamiento y transmisión de agua. Se disponen en afloramientos de lugares topográficamente muy elevados y con fuertes pendientes, que provocan una gran limitación del almacenamiento y de la capacidad de recarga.

En el sector de Piedra Pómez se encuentran formando depósitos de pequeña envergadura, ya sea rodeando la cuenca o en cerros aislados repartidos en el interior de la misma. La unidad presenta un potencial hidrogeológico entre muy bajo a nulo.

Finalmente, en la Tabla 5-13 se puede observar un resumen de las unidades hidrogeológicas presentes en la zona de estudio, así como las unidades geológicas que incluyen y los parámetros hidráulicos representativos. De la misma manera, en la Figura 5-3, se presenta la distribución en superficie de las mismas.

Unidad Hidrogeológica		Descripción litológica	Unidades Geológicas asociadas	Parámetros hidráulicos	
				K [m/d]	T[m^2/d]
UH 1	Depósitos con elevada importancia hidrogeológica debido a la porosidad primaria	Materiales sedimentarios aluviales recientes.	MsPa y Qa.	1 - 45	36 - 44.800
UH 2	Depósitos con media a baja importancia hidrogeológica debido a la porosidad primaria	Materiales sedimentarios coluviales y piroclásticos.	Mga, Qv(e), Qc, Qac, Qrm, Qitc, Qp, Qg, Plsv(c), Tac y Qh.	1 - 3	6 - 450
UH 3	Rocas fracturadas con alta importancia hidrogeológica debido a porosidad secundaria	Depósitos evaporíticos y precipitados carbonáticos.	Qca, Qs, Qs(a), Qs(b), Qs(c) y MsPls.	15 - 208	-
UH 4	Rocas fracturadas con media a baja importancia hidrogeológica debido a porosidad secundaria	Materiales sedimentarios antiguos y volcánicos modernos, fracturados.	EOh, Ja, JKp, Jm, Jqv, Kle, Kqm, Mipp, Mmrl, Msqm, Omcg, Pliv y TrJem.	-	127 - 2080
UH 5	Rocas y depósitos no consolidados con muy baja importancia hidrogeológica	Tobas, lavas, ignimbritas y depósitos piroclásticos. Secuencias sedimentarias alteradas y tectonizadas.	EOlv, Miilt, Mipp, Mit, Miv, Mmim, Mmiva, Mmv, Msisa, Msv(b), Mv(a), Omcg, OMv, Pfp, Pliv(c), Plsv, Plsv(d), Qv(c), Qv(d), Tlc, Tls, TMdh, Tmo, TMv, Tvca, Tvcc y Tvcs:	0,05 - 0,5	-
UH 6	Sustrato rocoso	Rocas intrusivas y pórfidos. Series sedimentarias.	DCch, KTgb, KTmzd, KTp, KTpgd, Mih, Mmh, Mv(b), OMv, Pep, PeTrg, Pliv(e), Pzc, Pzlt, Pzmd, Qv, TMv(c), Tvca y Tvcs.	0,013 - 0,24	-

Tabla 5-13: Descripción y características de las unidades hidrogeológicas presentes en la zona de estudio.

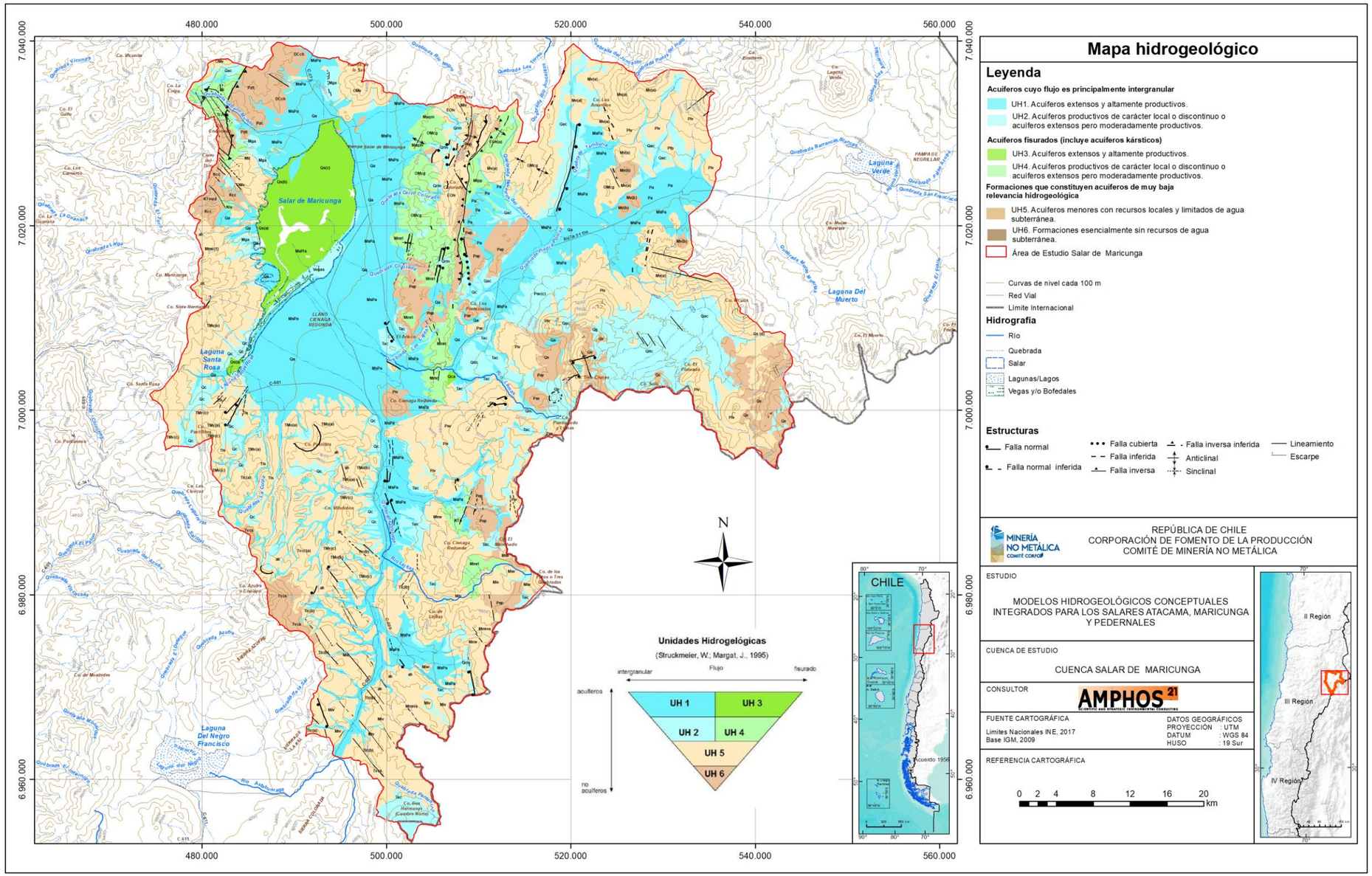


Figura 5-3: Mapa hidrogeológico de la cuenca de Maricunga.

Fuente: elaboración propia.

5.3 Geometría de los acuíferos (3D Leapfrog)

Los acuíferos de mayor desarrollo dentro de la cuenca de Salar de Maricunga se encuentran formados por materiales sedimentarios no consolidados (UH 1 y UH 2), acumulados en las distintas depresiones estructurales que albergan tanto al Salar de Maricunga, como a otras del área de la cuenca. Entre éstas se encuentran, además, el valle o quebrada de Ciénaga Redonda, el valle y el llano de Piedra Pómez. La morfología de las cuencas sedimentarias, la profundidad a la que se encuentran las rocas basales de la artesa sedimentaria, y la posible presencia de estratos impermeables o de baja permeabilidad, intercalados entre los anteriores, determinan en gran parte la distribución y segmentación horizontal y vertical de los acuíferos.

Al sur del Salar de Maricunga y en la cuenca de Piedra Pómez por debajo de los materiales sedimentarios no consolidados (UH 1 y UH 2) subyacen materiales fracturados que forman la Unidad Hidrogeológica 4.

Para la definición de la extensión y forma de los acuíferos, se han revisado los perfiles geológicos construidos en la zona, así como los resultados de distintas campañas de prospecciones geofísicas.

5.3.1 Prospecciones geofísicas

La cuenca del Salar de Maricunga ha sido objeto de diversas campañas de levantamiento geofísico que han permitido explorar tanto las zonas del entorno inmediato del salar así como las zonas periféricas, como el área de Ciénaga Redonda y sector de Campo Piedra Pómez. En la Figura 5-4 se presenta la distribución de los principales estudios geofísicos conocidos. Adicionalmente, en la Tabla 5-14 se muestra el detalle de las campañas ejecutadas en la zona y recopiladas para el presente estudio.

En este capítulo se presenta una síntesis de resultados de los estudios revisados, los que se agruparon en 3 sectores: Salar de Maricunga, Quebrada de Ciénaga Redonda y Campo Piedra Pómez – Río Lamas.

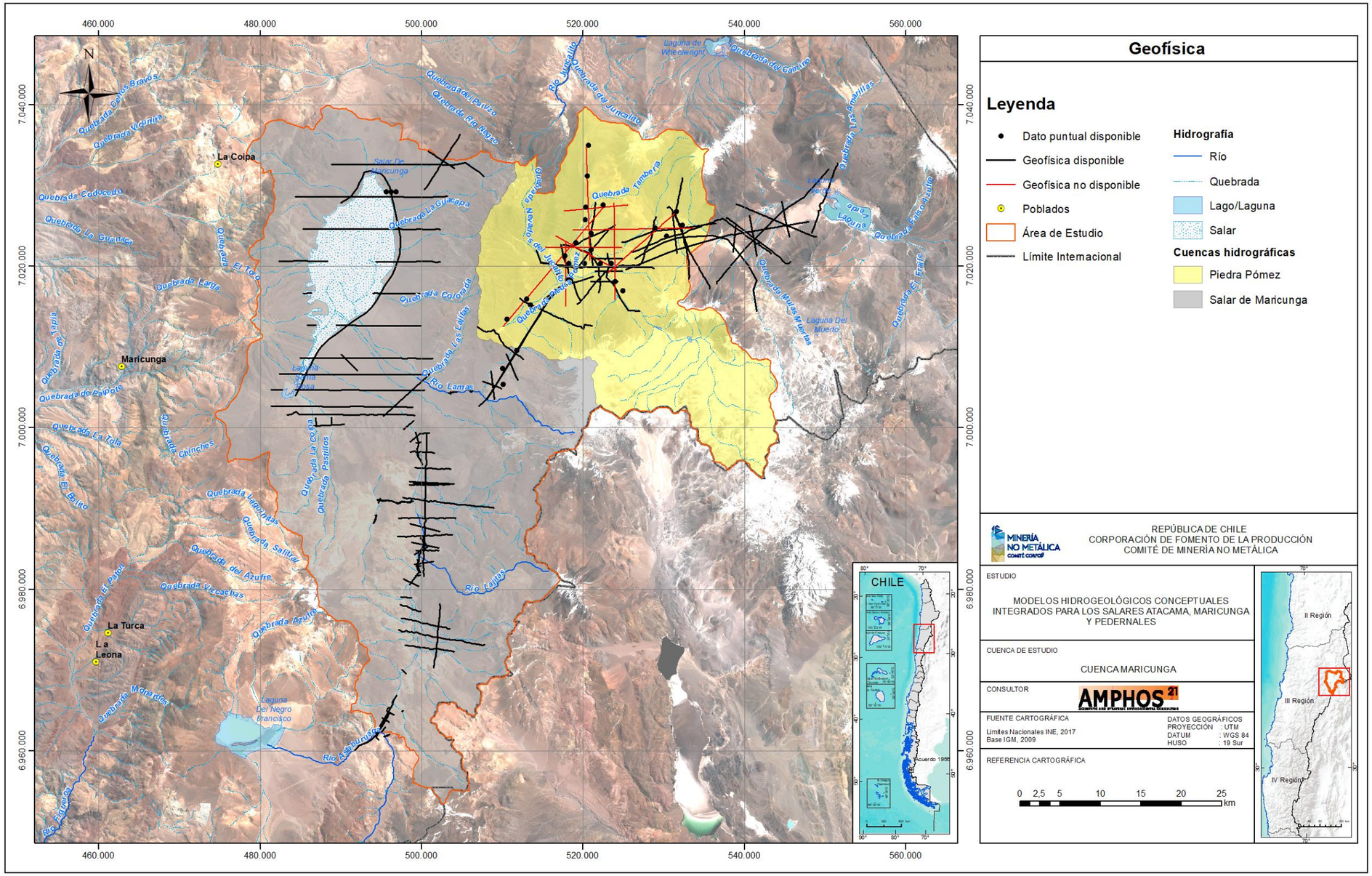


Figura 5-4. Cobertura de estudios y trazados de medición geofísica en la cuenca del Salar de Maricunga.

Fuente: elaboración propia a partir de datos citados en Tabla 5-14.

Año	Autor	Técnica	Longitud	Sector	Referencia
1999	Iriarte (SERNAGEOMIN)	GRAV	145 Km	Llano Salar de Maricunga	M_Ref.061
2000	Aguirre y Fonseca (SERNAGEOMIN)	GRAV Eléctrico	40 Km 40 Km	Ciénaga Redonda	M_Ref.070
2000	Venegas *et al*. (SERNAGEOMIN)	GRAV Eléctrico	40 Km 40 Km	Ciénaga Redonda	M_Ref.023
2006	Santibáñez *et al.* (SERNAGEOMIN)	GRAV	Desconocido	Cuenca de Campo Piedra Pómez	M_Ref.033
2008-2009	Minera Casale	TEM GRAV	Desconocido	Río Lamas, Quebrada Piedra Pómez y Campo Piedra Pómez	M_Ref.062
2009 - 2011	Andina Minerals	TEM	28 Km	Quebrada Ciénaga Redonda	M_Ref.029
2010	Kinross	TEM NanoTem	45 Km 11 Km	Llano Salar de Maricunga, Vegas Ciénaga Redonda Q. Villalobos, Barros Negros Pampa Pantanillo.	M_Ref.028
2012	Andina	TEM NanoTem	No conocido	Llano y Quebrada Ciénaga Redonda	M_Ref.029
2015	DGA	TEM	18 Km	Salar de Maricunga	M_Ref.066
2016	DGA	GRAV TEM	45 km	Salar de Maricunga, Ciénaga Redonda (Pampa Pantanillo).	M_Ref.018

Tabla 5-14. Resumen de prospecciones geofísicas históricas recopiladas en este trabajo.

Fuente: elaboración propia.

***Abreviaciones**: (1) **GRAV**: Gravimetría; (2) **TEM**: Transiente Electromagnético; (3) **NANOTEM**: Nano-Transiente Electromagnético.*

5.3.1.1 Síntesis de resultados, sector Salar de Maricunga

5.3.1.1.1 Estudio gravimétrico en el llano de Salar de Maricunga, Sernageomin (1999).

El estudio gravimétrico es de gran extensión y cubrió gran parte del área del Salar y su entorno inmediato. Los resultados del trabajo se encuentran integrados en el documento de Iriarte (1999: M_REF.061) y consisten en un mapa de anomalías residuales, sobre la que se interpretó la profundidad de la cuenca sedimentaria. Según esta interpretación (Iriarte, 1999), se señala la presencia de dos depocentros: el de mayor profundidad y extensión podría alcanzar una profundidad de 900 m en la parte centro oriental del Salar de Maricunga, y un segundo depocentro, menos extenso, al oriente del Llano de Ciénaga Redonda, que podría alcanzar una profundidad de hasta 800 m.

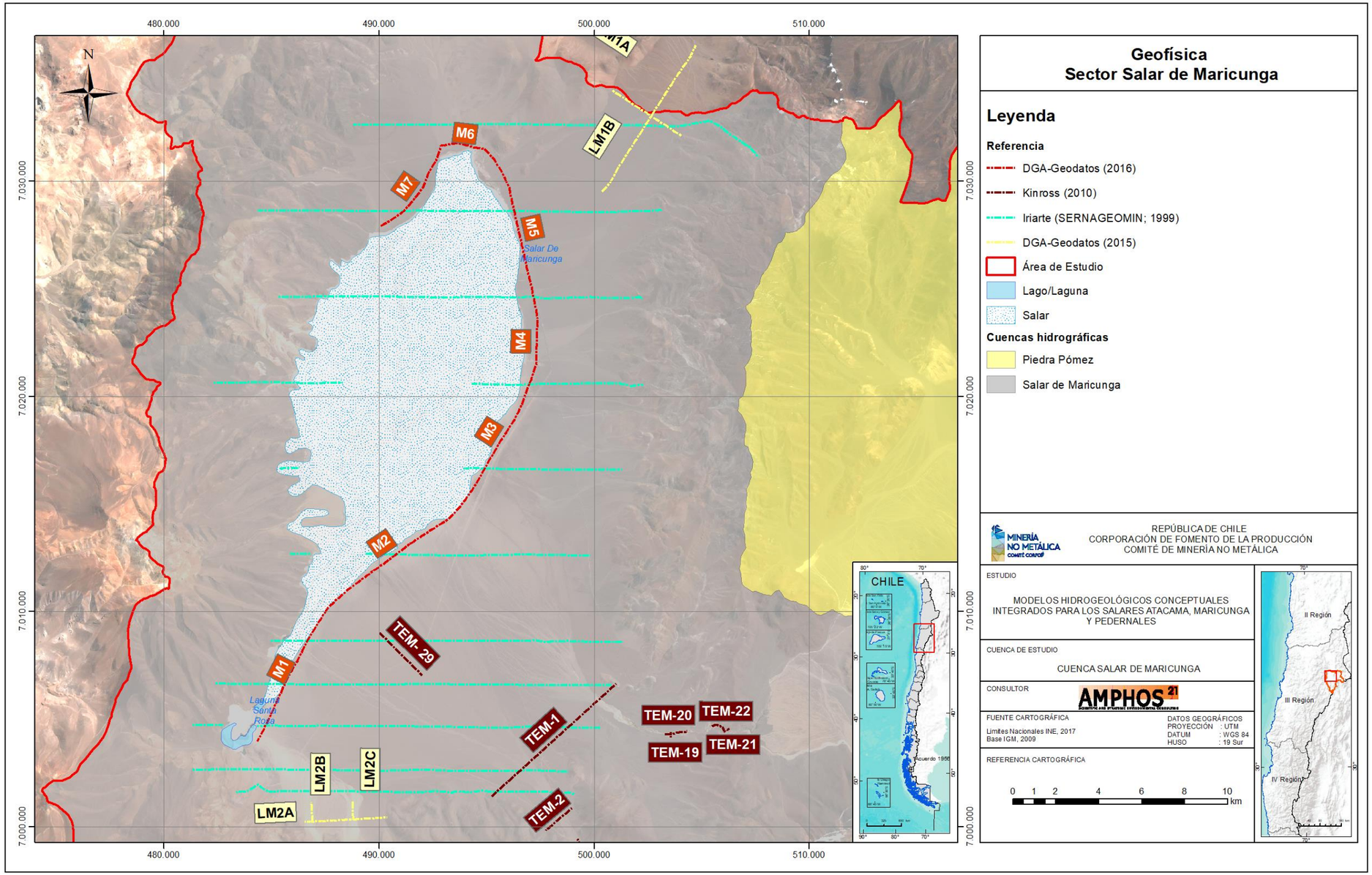


Figura 5-5: Cobertura de líneas de prospección geofísica de la Cuenca de Salar de Maricunga, sector Salar de Maricunga. Fuente: Elaboración propia.

Fuente: elaboración propia.

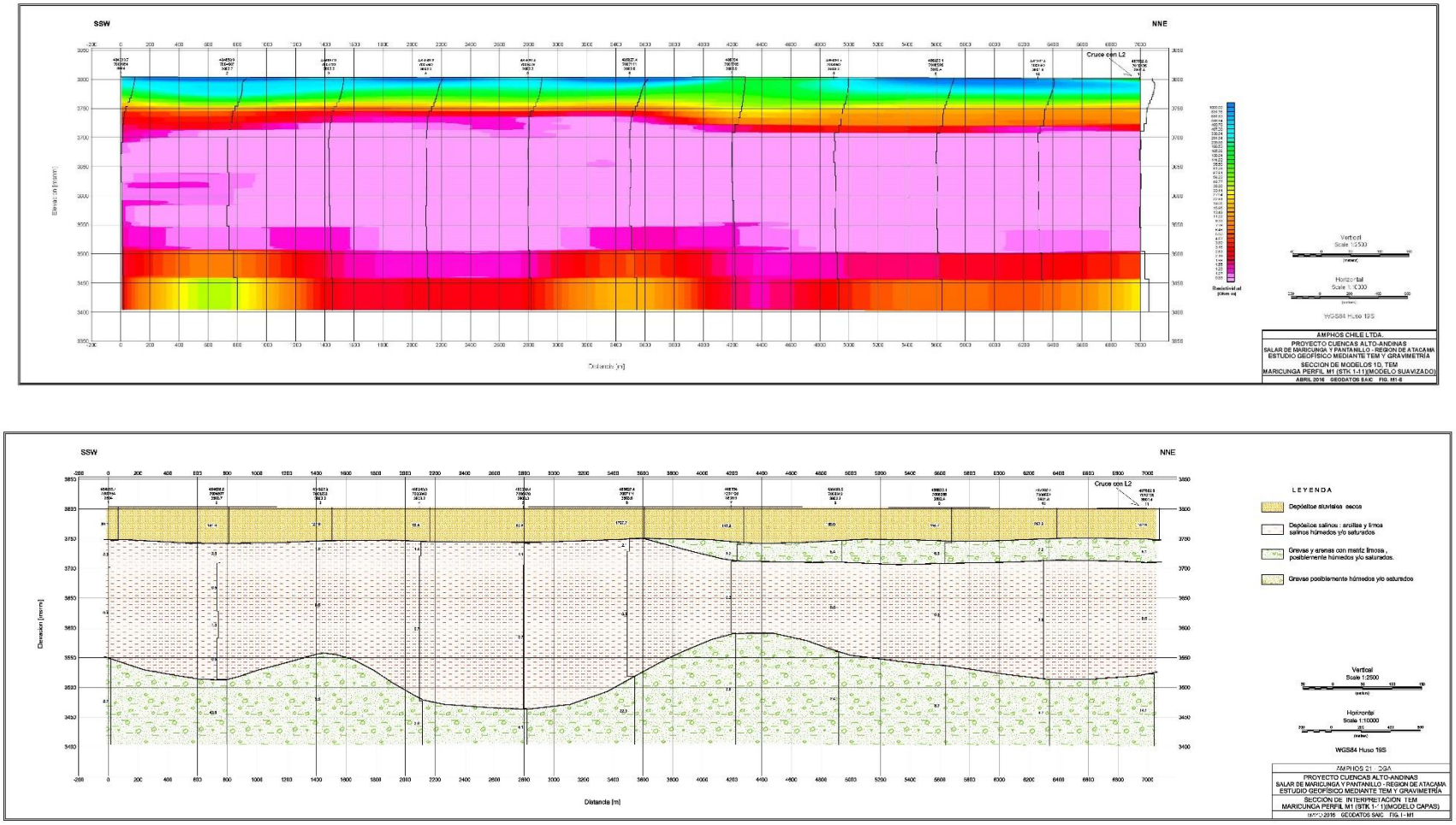


Figura 5-6: Perfil TEM M1 en el extremo Sur del Salar de Maricunga e interpretación (ubicación en Figura 5-5).

Fuente DGA, 2016.

5.3.1.1.2 Estudio TEM al sur de Salar de Maricunga, Kinross (2010)

Dentro del área de Salar de Maricunga, este estudio ejecutó 2 perfiles TEM, ubicados al sureste del Salar, los que suman una longitud aproximada de 10 km con puntos de medición cada 200 m. A cargo del estudio estuvo la empresa Geodatos. Los dos perfiles se sitúan en el sector del Llano de Ciénaga Redonda y del río Lamas (Perfiles TEM-1 y TEM-29, Figura 5-5). Las unidades geoeléctricas interpretadas en la serie de perfiles se han ajustado al siguiente grupo de litologías:

Sedimentos secos: Unidad asignada al estrato superficial de la cubierta de depósitos sedimentarios, en el Llano de Salar de Maricunga, que muestra resistividades entre 600 a 2000 Ohm-m, y que en el perfil TEM-1, alcanzaría entre 20 a 30 m de espesor, y en el perfil TEM-29 alcanzaría entre 25 a 50 m de espesor.

Gravas (saturados): Unidad asignada a la capa de resistividades intermedias a bajas, en el rango 80 a 200 Ohm-m, y que se encuentra bajo la capa de sedimentos secos, que en la parte central del perfil TEM-1 alcanza entre 50 a 80 m de espesor, y a lo largo de todo el perfil TEM-29, donde alcanza un espesor entre 25 a 50 m de espesor

Arenas (saturados): Se identifica en ambos perfiles bajo el estrato de Gravas, con resistividades en el rango de 10 a 60 Ohm-m, y un espesor que varía entre 100 y 130 m aproximados en el perfil TEM-1 (parte central del perfil), y entre 75 y 95 m el perfil TEM-29.

Sedimentos saturados con salmueras: Unidad de extremadamente baja resistividad eléctrica (<1 Ohm-m) identificada sólo en el perfil TEM-29, bajo el estrato interpretado como Arenas. El espesor de este horizonte, no puede ser bien estimado, debido a que la elevada conductividad eléctrica favorece una baja penetración del campo electromagnético aplicado en la unidad.

Basamento resistivo. Esta unidad se identificó en relación con las rocas que afloran en ambos extremos del perfil TEM-1, y que muestran una zona de resistividades, en el rango de 150 a 2500 Ohm-m.

Basamento Conductor. Identificado como una zona de forma irregular, de baja resistividad (10 a 80 Ohm-m), que se observa en el extremo noreste del perfil TEM-1, entre las unidades de roca que afloran en superficie, y que fueran asignadas a la unidad de rocas de basamento resistivo.

Basamento Muy Conductor. Unidad continua, que aparece en la base de la mayor parte del perfil TEM-1, de resistividad <5 Ohm-m, y que se sitúa a entre 200 y 250 m de profundidad. Se ha interpretado como roca altamente fracturada y/o alterada, ya que en el extremo SW del perfil se ubica bajo la unidad de alta resistividad, que fuera reconocida en superficie como unidades de roca (TMo (b) del capítulo Geología) y que fuera identificada como basamento resistivo. También se ha postulado, como interpretación alternativa de esta capa, la posibilidad que esté formada por sedimentos arcillosos posiblemente saturados de agua. No existen pozos que permitan la observación directa a esta profundidad, por lo que la condición de saturación de agua y la estratigrafía asociada no puede ser confirmada.

Según los datos observados y la interpretación alcanzada, este trabajo permite la descripción de una importante zona del extremo sur del Salar de Maricunga, con datos calibrados de afloramientos de superficie y con el pozo MDO-09. Además, aporta información de la posible existencia de una salmuera profunda, bajo los 200 a 250 m de profundidad, próximo al salar, y plantea la interrogante de interpretación, para la unidad geoeléctrica denominada 'Basamento muy conductor', observado en el perfil TEM-1, el cual podría corresponder a una unidad permeable con salmueras.

5.3.1.1.3 Estudio TEM en Salar de Maricunga, DGA (2015)

Consistió en una serie de 5 líneas de medición, dos de las cuales se ubican al extremo noreste del Salar (LM1A y LM1b, Figura 5-5), específicamente en el sector de Pampa Los Arroyos y Pampa Salar de Maricunga, y tres líneas situadas en el extremo sur del salar, en el sector de quebrada Pastillos (LM2A, LM2B, LM2C, Figura 5-5). Los trabajos geofísicos fueron ejecutados por la empresa Geodatos. Los resultados de este estudio se expresaron en unidades geoléctricas correlacionadas a materiales geológicos diversos:

Gravas y Arenas Secas: Unidad Superficial con Resistividades mayores que 100 ohm-m y espesor comprendido entre 30 y 140 m, presente en todos los perfiles del sector.

Gravas y Arenas Compactas (posiblemente saturados de agua): Unidad con Resistividad variable entre 27 a 90 ohm-m. En el Sector Noreste del Salar de Maricunga (Perfiles LM1A y LM1B), se observa principalmente bajo las gravas y arenas secas, con espesor variable entre 80 y 150 m. En el Sector Sur del Salar de Maricunga (perfiles LM2A a LM2C), en ambos perfiles se ubican al sur de horizontes interpretados como 'Gravas y Arenas con Finos', mostrando una posible transición en la granulometría de los estratos o en la salinidad del agua contenida.

Gravas y Arenas con Finos (posiblemente saturados de agua): Unidad Geoeléctrica con valores de Resistividad variable entre 10 y 25 ohm-m, que forma horizontes semi continuos, de espesor variable entre 50 m y más de 300 m de espesor. Su presencia se identifica en la mayor parte de los perfiles, encontrándose en la zona norte a profundidades variables de 100 a 200 m, mientras que, en la zona sur del salar, se encuentra a una profundidad aproximada a 80 m.

Sedimentos Finos y/o Salinos: Unidad Geoeléctrica conductora, de baja permeabilidad con resistividad menor que 10 ohm-m. En la línea LM2A se observa como un estrato discontinuo, con dos sectores de ensanchamiento. Mientras que en las líneas de orientación NS, se observa una tendencia de zonación en la orientación de los perfiles, donde la menor resistividad se concentra hacia el norte y grada a zonas menos resistivas hacia el sur.

Posibles Rocas Volcánicas: Unidad Geoeléctrica con alta resistividad (742 ohm-m) y 215 m de espesor, detectada desde la superficie en el sector sur de Salar de Maricunga, en extremo oriental del perfil L-M2A.

Salmueras: Unidad Geoeléctrica muy conductora, detectada en el extremo norte del perfil L-M2C, bajo las gravas y arenas superficiales y bajo de las gravas con finos a 146 m de profundidad. Posee una resistividad de 0.5 ohm-m y alcanza 50 m de espesor.

Los perfiles de la zona norte de este trabajo, exploran una zona limítrofe entre la cuenca de Salar de Maricunga con la cuenca del Salar de Pedernales. En el perfil LM1B se observa que las capas con mayor posibilidad de constituir acuíferos, se encuentran desde una profundidad de 50 a 80 m en la mitad sur del perfil (Cuenca del Salar de Maricunga), mientras que, en la mitad norte, esta profundidad aumenta entre 100 y 140 m. Además, en la mitad sur, para las mismas capas, se observan valores de menor resistividad eléctrica, lo que podría indicar una presencia de aguas de mayor contenido salino, o una variación granulométrica de los sedimentos (mayor contenido de finos). En este perfil se observa, además, la presencia de un estrato o nivel semi continuo, de muy baja resistividad, que se encontraría bajo los 300 m de profundidad, en la mayor parte del perfil, aunque sólo unos 150 m de profundidad, en el extremo sur del perfil. Esta unidad geoeléctrica se ha interpretados como materiales arcillosos o salinos. Este nivel, debería se explorado por medio directos (sondajes) para conocer su origen.

Los perfiles de orientación NS, de la zona sur del Salar de Maricunga (líneas LM2B y LM2C), aunque más cortos, muestran algunas características similares a los observados en el perfil LM1B, en el sentido de mostrar que tanto las capas de resistividades moderadas-bajas y aquellas de muy baja resistividad (<10 ohm-m) aumentan de espesor y disminuyen su resistividad a medida que se aproximan al Salar.

En ninguno de los perfiles se observa la presencia de un basamento resistivo.

5.3.1.1.4 Estudio TEM en Salar de Maricunga, DGA (2016)

En el sector del Salar de Maricunga se ejecutaron 7 perfiles TEM (Figura 5-5), representando en aproximadamente 40 km lineales de exploración, los cuales se ubicaron paralelos al margen oriental y norte del salar, comenzando en el sector de la Laguna Santa Rosa y extendiéndose en dirección NE, sobre material sedimentario seco. El estudio geofísico fue ejecutado por la empresa Geodatos, bajo la supervisión de la empresa Amphos 21. Consistió en 64 estaciones TEM, distanciadas aproximadamente 700 m entre sí.

A partir de la información recolectada y la revisión de antecedentes disponibles, se definieron 4 unidades geoeléctricas:

- **Unidad resistiva superficial (UG1)**: Valores de resistividad > 100 [Ohm-m]. Presenta continuidad horizontal y se orienta paralela a la superficie, con mayor desarrollo hacia el sur del salar, donde se registran las mayores potencias. Su espesor registrado varía entre 3 y 7 m. Se asocia a depósitos aluviales secos, compuestos por material aluvial y coluvial de diversa granulometría.
- **Unidad de media conductividad (UG2):** Valores de resistividad entre 15 y 80 [Ohm-m], subyace a la UG1. La potencia de la UG2 se encuentra entre 20 y 100 m, siendo de mayor relevancia

hacia el sur del salar. Se interpreta como gravas de granulometría gruesa, posiblemente húmedas y/o saturadas. Los valores de resistividad mayores, dentro del rango de la unidad, se asocian con predominancia de material granular sobre la matriz, y presencia de aguas dulces a salobres.

- **Unidad conductora (UG3):** Valores de resistividad menores a 1 [Ohm-m]. Subyace a la UG2. Presenta continuidad lateral entre todos los perfiles. Su potencia varía entre 107 y 270 m, siendo más somero hacia el norte del Salar. Se interpreta como depósitos constituidos por arcillas y limos salinos húmedos y/o sedimentos de granulometría variable saturados con aguas salinas o salmueras.
- **Unidad de media conductividad (UG4):** Valores de resistividad entre 15 y 80 [Ohm-m]. Subyace a la UG-3. Por el marcado contraste de resistividad con la unidad precedente, se identifica como un contacto litológico que puede estar representado por rocas de distintas unidades, que forman la base de la artesa sedimentaria.

Los resultados de este trabajo permiten la caracterización del sector perimetral del Salar de Maricunga aportando información de la posible configuración subsuperficial del sector. Una de las particularidades de este estudio resulta en la delimitación de la unidad geoelécrica UG3, interpretada como la unidad más probable de contener salmuera en estado de saturación.

5.3.1.2 Síntesis de resultados, sector Piedra Pómez y Río Lamas

5.3.1.2.1 Gravimetría del sector Piedra Pómez, Minera Casale (2010).

En el sector Piedra Pómez se midieron 3 líneas durante campañas de año 2009 (L1N, L2N y L3E;

Figura 5-8), y una línea durante una campaña de abril del año 2010 (**L8N**). El estudio geofísico lo ejecutó la empresa Geodatos. Para la calibración de los datos y establecimiento de límites entre unidades gravimétricas, se utilizaron numerosos pozos con estratigrafía conocida:

Línea L1N y L2N, se extienden por sobre los depósitos volcánico-sedimentarios atravesando la quebrada de Piedra Pómez, con una orientación NO-SE y E-O, respectivamente, Identifica dos subcuencas, la primera con una interfase relleno volcánico-sedimentarios y roca basal que alcanza hasta 250 m de profundidad, próximo al eje de la quebrada Piedra Pómez. La segunda, con una interface más irregular, alcanzaría una profundidad máxima de 200 m, en la porción oriental del perfil que asciende hacia la vertiente norte del Macizo Tres Cruces. La menor densidad de este extremo se interpretó como resultado del mayor predominio de Pómez.

En la Línea L2N se identifican tres subcuencas (artesas de materiales de baja densidad), más tres bloques de basamento rocoso que afloran o ascienden muy próximo a superficie. Los espesores máximos observados para estas subcuencas son de 420, 370 y 260 m, para las sub-cuencas oeste, central y este, respectivamente. Un bloque de roca andesita aflora en la parte centro oeste del perfil, el cual se proyectó en profundidad entre las estaciones 13 y 20 del perfil, limitando a las dos

primeras subcuencas. De manera similar ocurre entre las estaciones 38 y 43, y posteriormente, desde la estación 56 aproximadamente. El último bloque rocoso, se describe como un cuerpo de densidad inferior al basamento, en el sector de Cerro Barrancas Blancas. No se incluye mayor descripción de esta unidad.

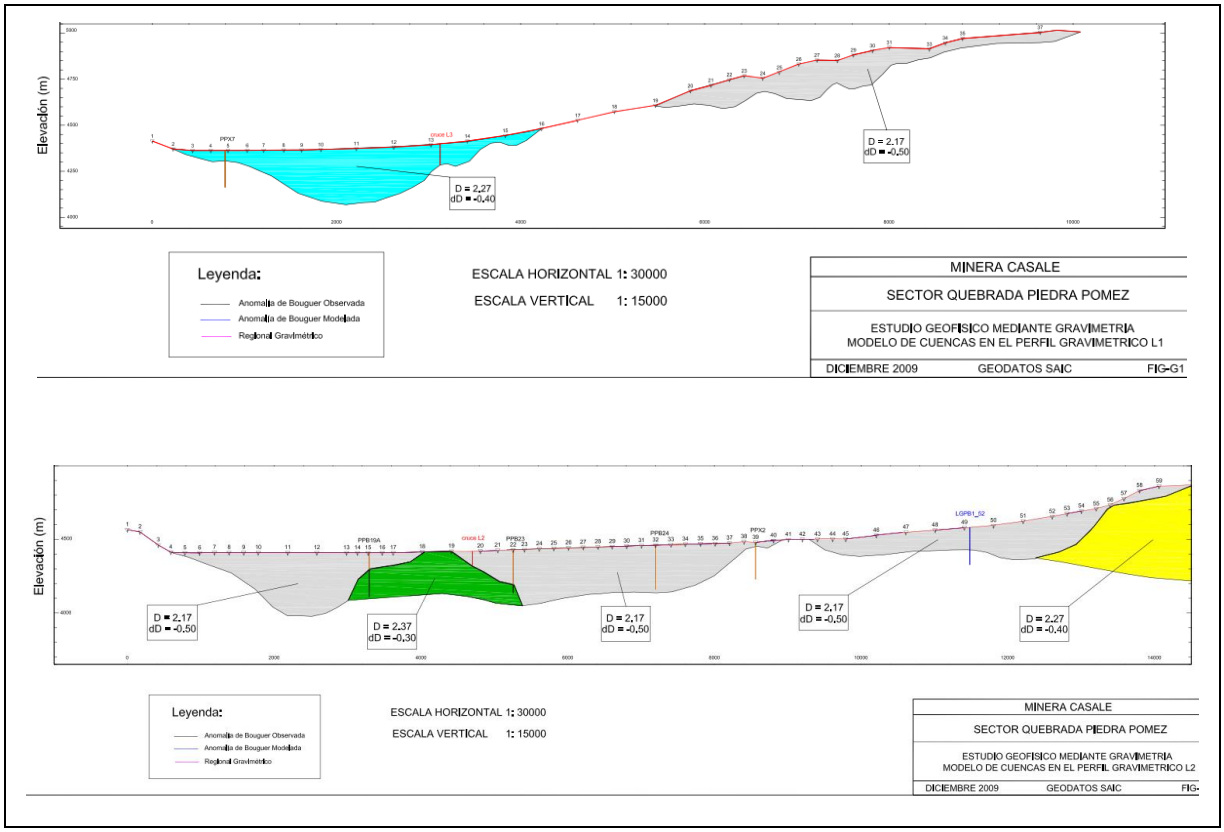


Figura 5-7: Perfiles gravimétricos L1N (superior) y L2N (inferior) realizados en el sector Piedra Pómez.

Fuente: DGA, 2016.

Línea L3E, se extiende paralela a la quebrada de Piedra Pómez, con orientación NE-SW. En el perfil modelado se identifican tres subcuencas (artesas de materiales de baja densidad), cuyos espesores máximos se estimaron en 220, 250 y 400 m para las subcuencas norte, centro y sur, a lo largo del perfil. Se distinguió una diferencia de densidad, siendo la cuenca de más al norte la de menor densidad (2,17 gr/cc), la del centro con una densidad media (2,27 gr/cm) y la del sur con la mayor densidad (2,37 gr/cc) lo que se interpreta como una diferenciación en la calidad de los materiales de relleno, predominando las pómez y cenizas en la parte norte del perfil, y rocas volcánicas intercaladas en los rellenos de la parte sur de la línea.

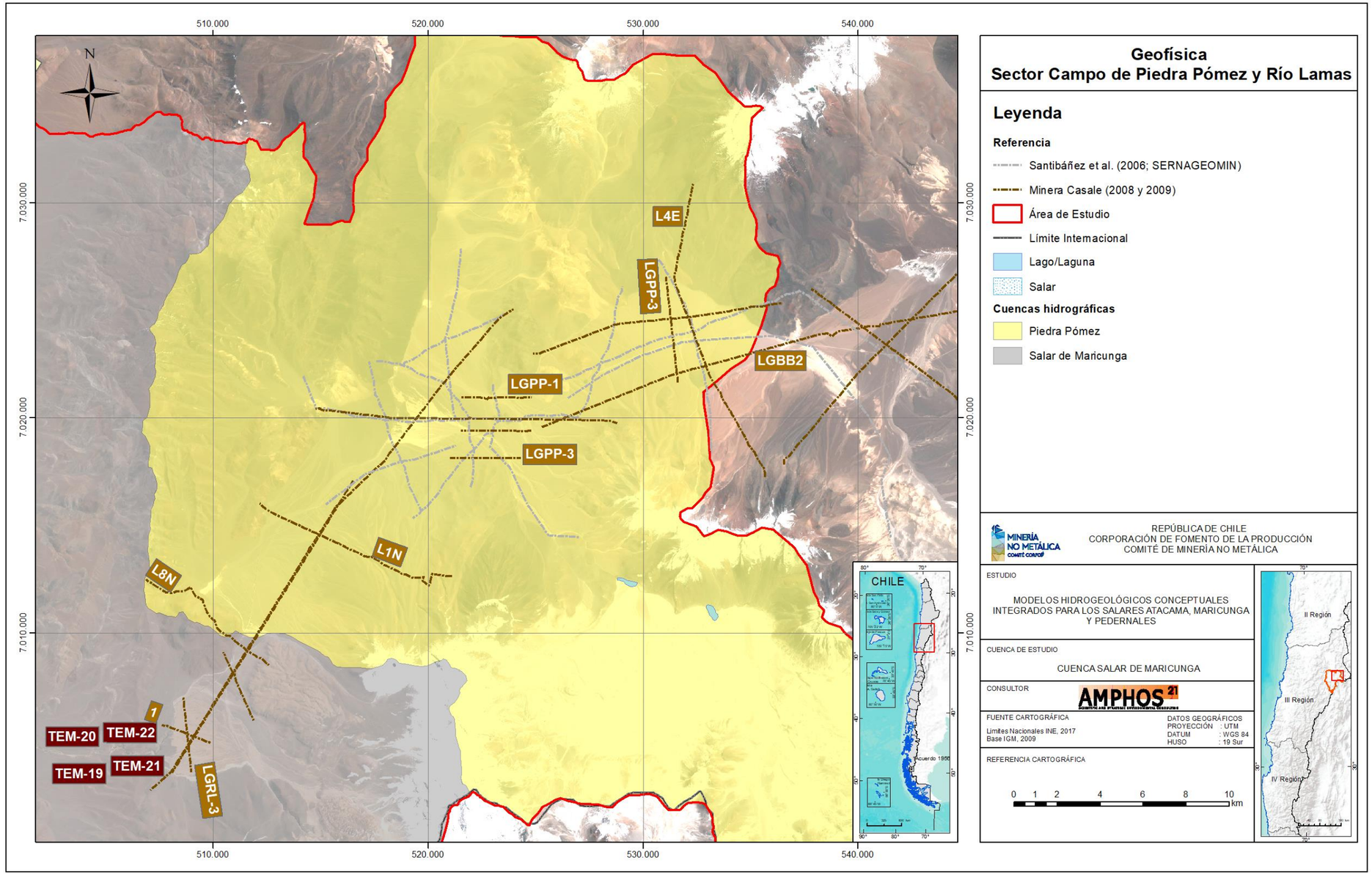


Figura 5-8. Distribución de trazados de mediciones geofísicas en el sector de sub-cuenca Piedra Pómez y Río Lamas.

Fuente: elaboración propia.

Línea L8N, se ubica en el extremo sur oeste del sector de Campo Piedra Pómez, atravesando las hondonadas de Portezuelo tres Cruces y Portezuelo El Colorado. El perfil modelado presenta una interfase de relleno-roca de forma irregular en la mitad norte del perfil, con tramos de profundidad acusada, que alcanzan hasta 500 m. En la mitad sureste, la forma de la base rocosa posee forma de artesa, con profundidad máxima de 400 m.

5.3.1.2.2 Estudio TEM en el sector Piedra Pómez, Minera Casale (2009).

Se realizaron 6 líneas de mediciones TEM, las que se distribuyeron en dos sectores. Tres líneas de orientación EO, ubicadas en el extremo este de la cuenca (

Figura 5-8), Líneas LGPP-1, LGPP-2 y LGPP3), más tres líneas situadas dentro de la Quebrada Piedra Pómez y del valle del Río Lamas (LGRL1, LGRL-2, LGRL-3). El estudio TEM estuvo a cargo de la empresa Geodatos.

El informe al que se tuvo acceso cuenta con los modelos de perfiles geoeléctricos (modelos de capas y smooth), pero no incluye definición de unidades geoelécricas, ni correlación de espesores o profundidad con unidades geológica.

De los perfiles de resistividad eléctrica se puede resumir:

Perfiles LGPP-1, LGPP-2 y LGPP-3: Los perfiles de resistividad eléctrica resultantes de estas líneas de medición TEM muestran un patrón estratificado de gran similitud entre sí, con cuatro capas distintivas, que pueden ser correlacionados con la estratigrafía y piezometría observada en el pozo PPB-24. Las capas geoeléctricas corresponden, a una capa superficial de 100 a 180 m de espesor, que en gran parte de su extensión presenta resistividades entre 100 a 200 ohm*m, más algunas discontinuidades laterales con aumento de resistividad, hasta valores del orden de 400 a 500 m. Esta capa se identifica con la capa de sedimentos tipo gravas y arenas secas. Bajo este estrato, se observa una capa de resistividades entre 15 a 30 omh-m, seguida por otra de resistividades entre 3 y 15 ohm-m, que suman entre ambas, un espesor de 200 a 300 m. El techo de esta capa coincide con la profundidad a la que se encuentra el nivel estático en el pozo de control PPB-24, por lo que en todo su espesor, o al menos, la capa superior se identifica como sedimentos de gravas y arenas saturadas de agua. La graduación de resistividad en profundidad puede corresponder a una variación en el contenido de salinidad del agua o a una capa basal con mayor contenido de arcillas. Otra señal distintiva de esta capa, es que su techo muestra un abombamiento en la zona de divisoria de cuenca, lo que señalaría la coincidencia de esta zona con la divisoria de cuenca hidrogeológica. El horizonte saturado interpretado, tendría una base a una profundidad entre 400 y 500 m.

Perfile LGRL-2: el perfil longitudinal a las quebradas P. Pómez y río Lamas, y tiene como punto de control, la estratigrafía y niveles conocidos en el pozo MWLR-4 y MWLR-4A (80 y 210 m de profundidad). El perfil muestra una distribución de capas continuas, de las cuales entre los 150 a

200 m superficiales corresponden a materiales de resistividad entre 100 a 800 ohm-m. Según el estudio geofísico, dentro de este nivel habría sedimentos posiblemente saturados que conformarían acuíferos, pero por el amplio rango de resistividades, es de esperar que esta característica no sea extrapolable a todo el horizonte. En los pozos de citados el nivel estático se ubica aproximadamente a 70 m de profundidad, lo cual no es posible identificar en el perfil. Bajo el horizonte anterior, se observa también de manera continua un estrato geoeléctrico de resistividad entre 10 a 30 ohm-m aproximados, según la estratigrafía del pozo MWLR-4A, correspondería a una intercalación de rocas volcánicas y areniscas, que se observan hasta la base de pozo. La secuencia geoeléctrica, continua en profundidad, con la presencia de un horizonte muy conductor, que varía entre 2 y 5 ohm-m, en la mitad norte del perfil, y entre 1 y 2 ohm-m en la mitad sur, que se encuentra bajo los 300 m de profundidad. Las posibilidades de interpretación que sugiere el autor, son variadas y van desde horizontes de arcillas, hasta la posibilidad de rocas fracturadas con agua salina o de alta temperatura. En la mitad norte del perfil, bajo la unidad anterior, se observa un cabio en la calidad geoléctrica, que podría responder a la presencia de un cambio litológico. Los perfiles LGRL-1 y LGRL-3 muestran una disposición similar de respuesta resistiva de los materiales atravesados por la sección.

En el caso de las líneas LGPP-1 a la LGPP-3, los resultados se pueden correlacionar de buena manera con la estratigrafía y presencia de niveles saturados mostrados en el pozo PPB-24. Según esta interpretación se podría delimitar la superficie freática del sector, pudiendo ser observado el límite de cuenca hidrogeológica.

En las líneas de Quebrada Piedra Pómez y Río Lamas (LGRL-2 y LGRL-3), no se identifica con claridad el horizonte saturado conocido en los pozos de observación cercanos. Es probable que distintas rocas volcánicas intercaladas dificulten una interpretación homogénea para todo el perfil. Cabe resaltar que el estudio identifica estratos profundos con posibilidades de constituir acuíferos con aguas salinas o termales, especialmente en la mitad sur de la quebrada Piedra Pómez y sector de Río Lamas, que no poseen registros de observación directa mediante pozos.

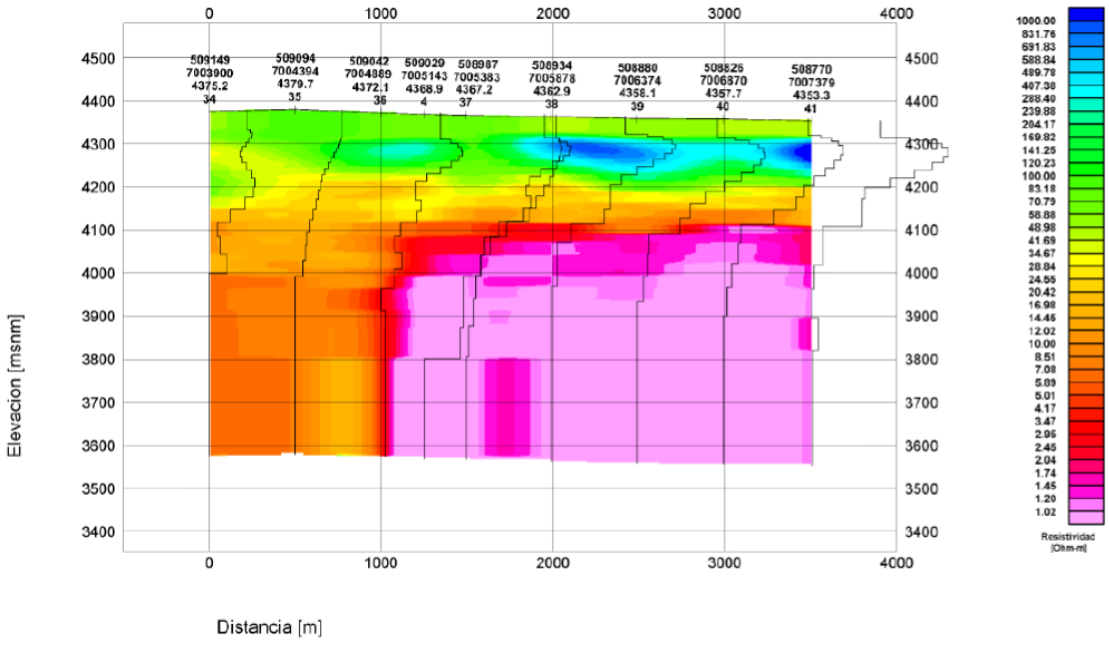


Figura 5-9: Sección de resistividad del perfil LGRL 3.

Fuente: DGA, 2016.

5.3.1.2.3 Estudio TEM en sector Río Lamas, Kinross (2010)

Consisten en 4 líneas de corta extensión, que se extienden paralela y perpendicular al Río Lamas, dentro de la sub-cuenca de Salar de Maricunga (TEM-19, TEM-20, TEM-21 y TEM-22). Los perfiles muestran una estratificación que permite interpretar la presencia de un relleno sedimentario compuesto por sedimentos secos hasta una profundidad de aproximadamente 40 metros en promedio y luego un estrato de sedimentos finos saturados de pequeño espesor. Bajo esta estratificación se observa una unidad conductora que fue interpretada por el autor del estudio como Basamento conductor. Subyaciendo esta unidad conductora se observa una unidad de muy alta conductividad, con valores de resistividad menores que 5.0 Ohm-m, que se ha interpretado como Basamento muy conductor. Esta unidad es consistente con los perfiles cercanos ejecutados por minera Casale (2009), en los que se ha previsto la posibilidad de constituir acuíferos con aguas salinas o termales.

5.3.1.3 Síntesis de resultados geofísicos, sector Ciénaga Redonda.

5.3.1.3.1 Estudio gravimétrico y geoeléctrico en Ciénaga Redonda, Sernageomin (2000).

En el estudio de 2000, la geofísica realizada mostró la continuidad lateral de los depósitos no consolidados que rellenan el valle, el cual estaría diferenciado estructuralmente en dos secciones, una en el sector de Valle Ancho con profundidad máxima de 250 m y la otra en el llano Ciénaga Redonda con profundidad máxima de 450 m.

En la Figura 5-11 se muestra el perfil que integra la interpretación de datos de gravimetría, SEV y TEM a lo largo de la Quebrada de Ciénaga Redonda. En ella se observa en el extremo norte del perfil, una secuencia de dos niveles con propiedades eléctricas distintivas.

- El primero, superior, indicado por resistividades eléctricas por sobre 30 ohm-m, que representaría sedimentos saturados con aguas dulces.
- El segundo nivel, se identifica bajo el anterior, con resistividades eléctricas que han sido separadas en dos rangos (10 a 25 y 2 a 10 ohm-m), lo que podría corresponder a dos condiciones: un nivel saturado con aguas salinas o, un nivel rico en arcillas y de baja permeabilidad.

En la figura, el nivel de baja resistividad eléctrica sobrepasa en profundidad al límite definido como basamento gravimétrico, que comúnmente se interpreta como el límite entre sedimentos no consolidados y un límite basal rocoso. Esta diferencia, probablemente se debe a la falta de calibración con pozos que atraviesen hasta esta interfase.

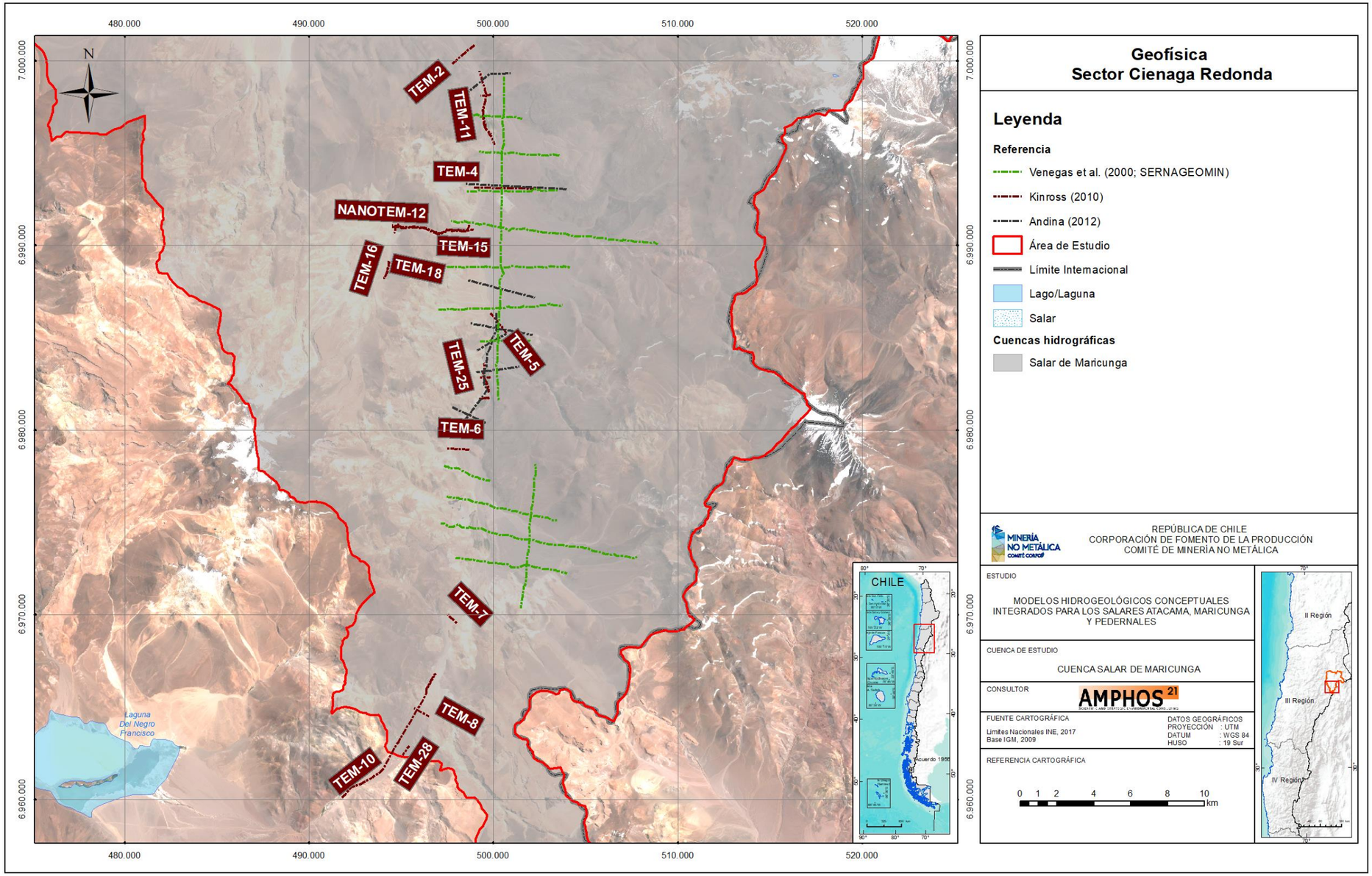


Figura 5-10. Ubicación de líneas geofísicas en el sector de Ciénaga Redonda.

Fuente: elaboración propia.

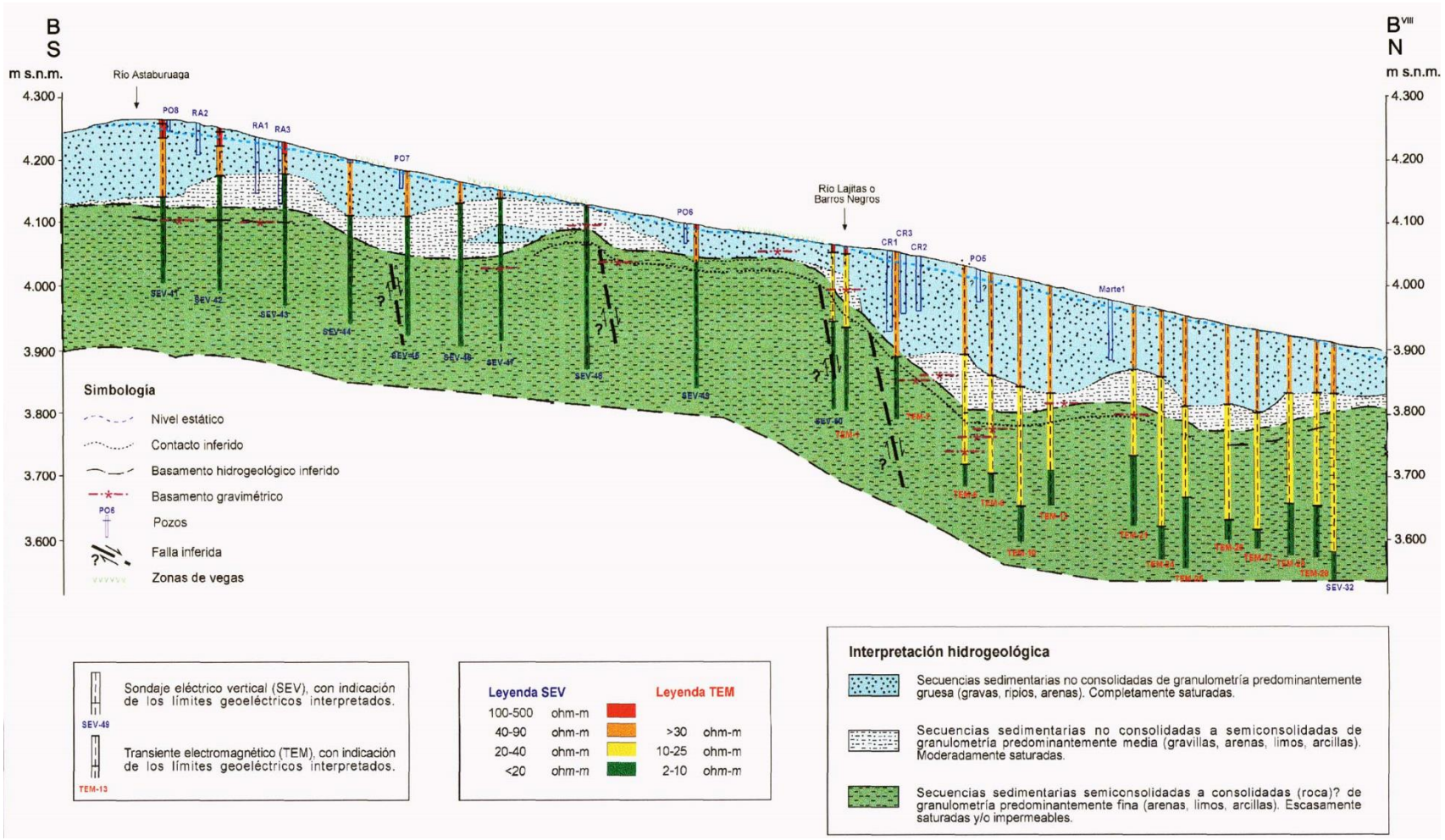


Figura 5-11: Perfil geofísico sector Ciénaga Redonda.

Fuente: Venegas et al., 2000 (M_REF.023)

5.3.1.3.2 Estudio gravimétrico y TEM en Pampa Pantanillo, DGA (2016)

El sector de Pampa Pantanillo representa el extremo sur de la cuenca de Salar de Maricunga y posee interés relevante ya que se ubica muy próximo a la divisoria de aguas superficiales, con la cuenca de Laguna del Negro Francisco (Figura 5-12). Además, en el sector existen numerosos pozos con información hidrogeológica de diversos temas, que sirven para la correlación y proyección de los resultados geofísicos. La campaña consistió en 40 estaciones TEM, dispuestas en 6 perfiles longitudinales que en conjunto suman 4,8 km lineales; más 60 estaciones gravimétricas distribuidas en 6 perfiles. Los perfiles ubicados dentro de la cuenca Salar de Maricunga se identifican como P3, P5, P6 y P7 (Figura 5-12).

El estudio geofísico fue ejecutado por la empresa Geodatos, con supervisión de la empresa Amphos 21.

Según la interpretación de resultados se definieron las siguientes unidades geoeléctricas (UG):

- **Unidad resistiva superficial (UG1):** Presenta valores de resistividad entre 180 y 2769 [Ohm-m]. Desarrolla continuidad horizontal y se orienta paralela a la superficie, con pequeñas ondulaciones asociadas al horizonte de la siguiente unidad. Potencia de 20 a 30 m. Se asocia a depósitos sedimentarios secos o de baja humedad, compuestos por material aluvial y coluvial de diversa granulometría.
- **Unidad de media conductividad (UG2):** Presenta valores de resistividad entre 30 y 140 [Ohm-m]. Desarrolla continuidad horizontal y su potencia varía entre 40 y 60 m. La información litológica disponible de diversos sondajes existentes, tales como EA-1, EA-2 y EA-6 (Sernageomin, 1998), y RPG-21, RPG-32, RPG-38 (EIA Proyecto Lobo Marte, 2011), permite correlacionar esta unidad con gravas y arenas saturadas, que conforman la unidad acuífera principal, donde el nivel piezométrico se ha registrado entre 8 y 30 m de profundidad.
- **Unidad resistiva (UG3):** Presenta valores de resistividad entre 200 y 786 [Ohm-m]. Su potencia varía entre 35 y 155 m. Se interpreta como rocas volcánicas con distintos grados de meteorización. Se observa que podrían corresponder a la continuación de rocas volcánicas visibles en superficie (lavas volcánicas posiblemente del OMmv), que forman el manto superficial de las rocas del basamento de la cubeta sedimentaria. En ocasiones se presentan de forma somera conformando singularidades en la hidrogeología local, generando por ejemplo la divisoria de aguas subterráneas visible en el perfil P7.
- **Unidad conductora (UG4):** Presenta valores de resistividad de 2 a 23 [Ohm-m]. Subyace a la UG2 y en algunos perfiles se encuentra intercalada con la UG3. Su potencia varía entre 60 y 200 m. Se interpreta como tobas arcillosas, donde los valores de resistividad más bajos indicarían mayor contenido de arcillas. Este material conforma el basamento o bien depósitos muy poco permeables asociados a ignimbritas del Oligoceno Mioceno.

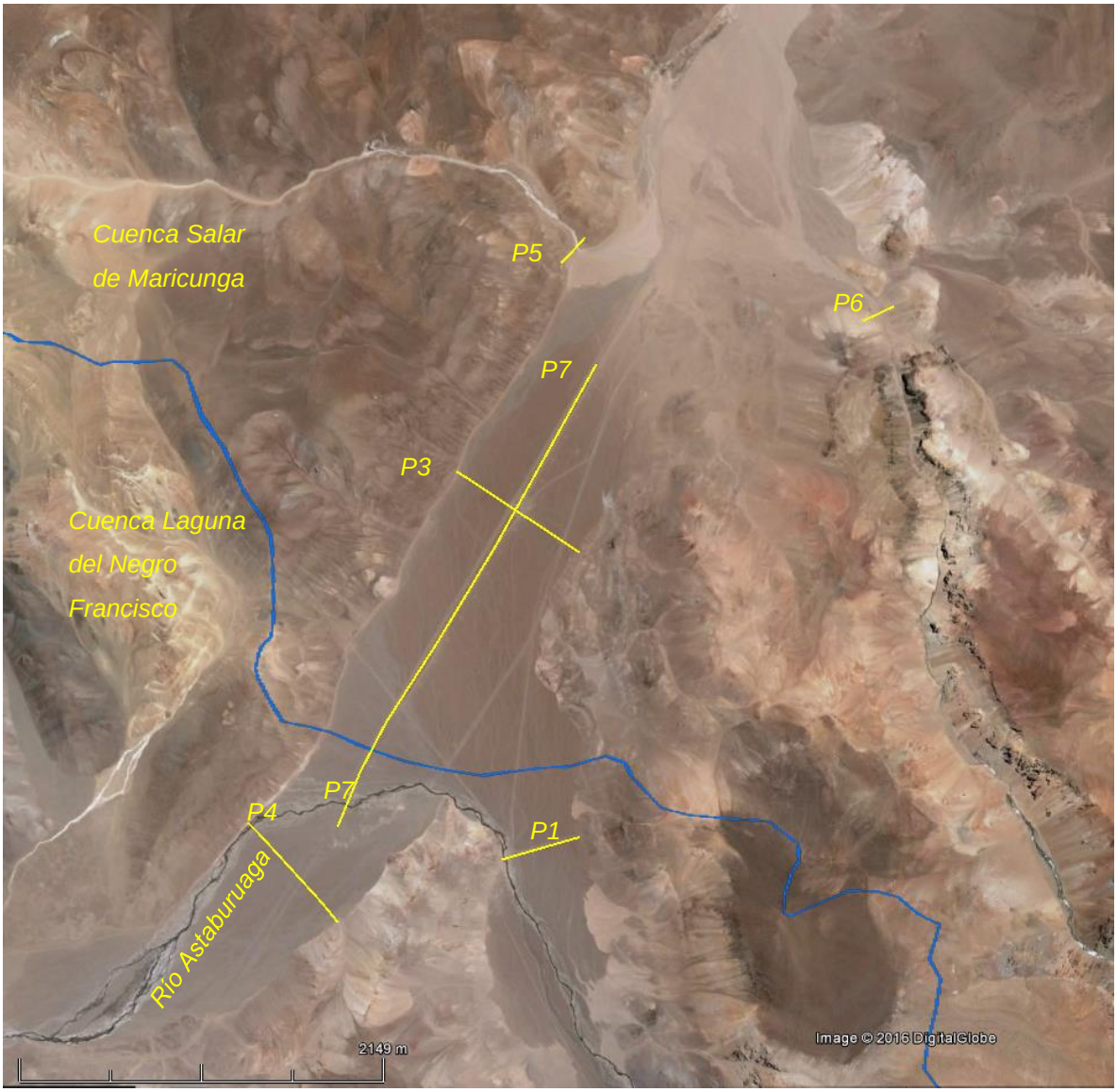


Figura 5-12. Ubicación de perfiles TEM y gravimétricos realizados en el sector Pampa Pantanillo.

Fuente: DGA, 2016 (estudio ejecutado por Amphos 21).

5.3.2 Identificación de áreas de cuñas salinas

El Salar de Maricunga se encuentra emplazado en el sector noroccidental de la cuenca homónima. En superficie, el depósito presenta una forma aproximadamente ovalada, con unos ejes de dimensiones de 10 km de ancho en su parte norte, estrechándose abruptamente hacia el sur y 29 km de largo, considerando a la Laguna Santa Rosa, alcanzando alrededor de 146 km^2.

Respecto a las características del Salar y acerca de la extensión del área de cuña salina es posible señalar lo siguiente (Figura 5-13):

- Se ha podido reconocer el núcleo del salar, correspondiente a una capa de halita perteneciente a los depósitos antiguos del salar (unidad geológica MsPls) a partir de la gravimetría y los sondajes realizados en el estudio M_REF.069. Si bien ha sido necesario complementar el alcance de la unidad hacia el sur, el núcleo ha sido interpretado a partir de la gravimetría del SERNAGEOMIN (1999) realizada para el mapa geológico.
- El nivel evaporítico moderno presenta espesores de hasta 30 m, aunque los depósitos antiguos, pueden alcanzar potencias superiores a los 200 m, con un núcleo muy localizado de halita.
- A partir del perfil TEM M1 de la DGA (2016) y de los perfiles TEM 1 y TEM 29 de Kinross (2010) y en base a los valores resistividad similares y continuos entre estos perfiles (<1 ohm·m), se ha detectado un probable nivel de finos saturados en aguas salinas bajo la costra evaporítica. Posee un espesor inferior a 200 m y las cotas aproximadas a las cuales aparece el nivel recién descrito corresponden a 3.700 msnm en el perfil M1 y 3.600 en los TEM1 y TEM 29, corroborando un acuñamiento hacia el exterior del salar. Se extiende a lo largo de todo el perfil TEM 29 y, al menos, hasta perfil TEM 1.
- Por otra parte, se ha verificado un alto contenido en sales en las muestras de agua extraídas del salar, con CE que llegan a superar los 250.000 μS/cm, rodeando el salar en superficie. No obstante, en los pozos ubicados al sureste del salar (MDO-08 y MDO-09) las muestras de agua presentaron conductividades eléctricas por debajo de 10.000 μS/cm. Esta observación sugiere que las aguas someras interceptadas por estos pozos (150 m de profundidad), son dulces a salobres y flotan por encima de la cuña de alta salinidad más profunda identificada mediante la geofísica.
- Sobre los materiales finos saturados de aguas salinas, se desarrolla un nivel detrítico permeable que aflora en superficie, correspondientes a la UH1 (80-120 m). Destacar que hacia el este y sur presentan su mayor desarrollo constituyendo las Pampa o Llano del Salar de Maricunga y el Llano de Ciénaga y Redonda.
- A partir de la información disponible se ha interpretado, de forma preliminar, el alcance de la cuña salina del Salar de Maricunga. La proyección de la posible extensión de la cuña salina en profundidad se representa en la Figura 5-13.

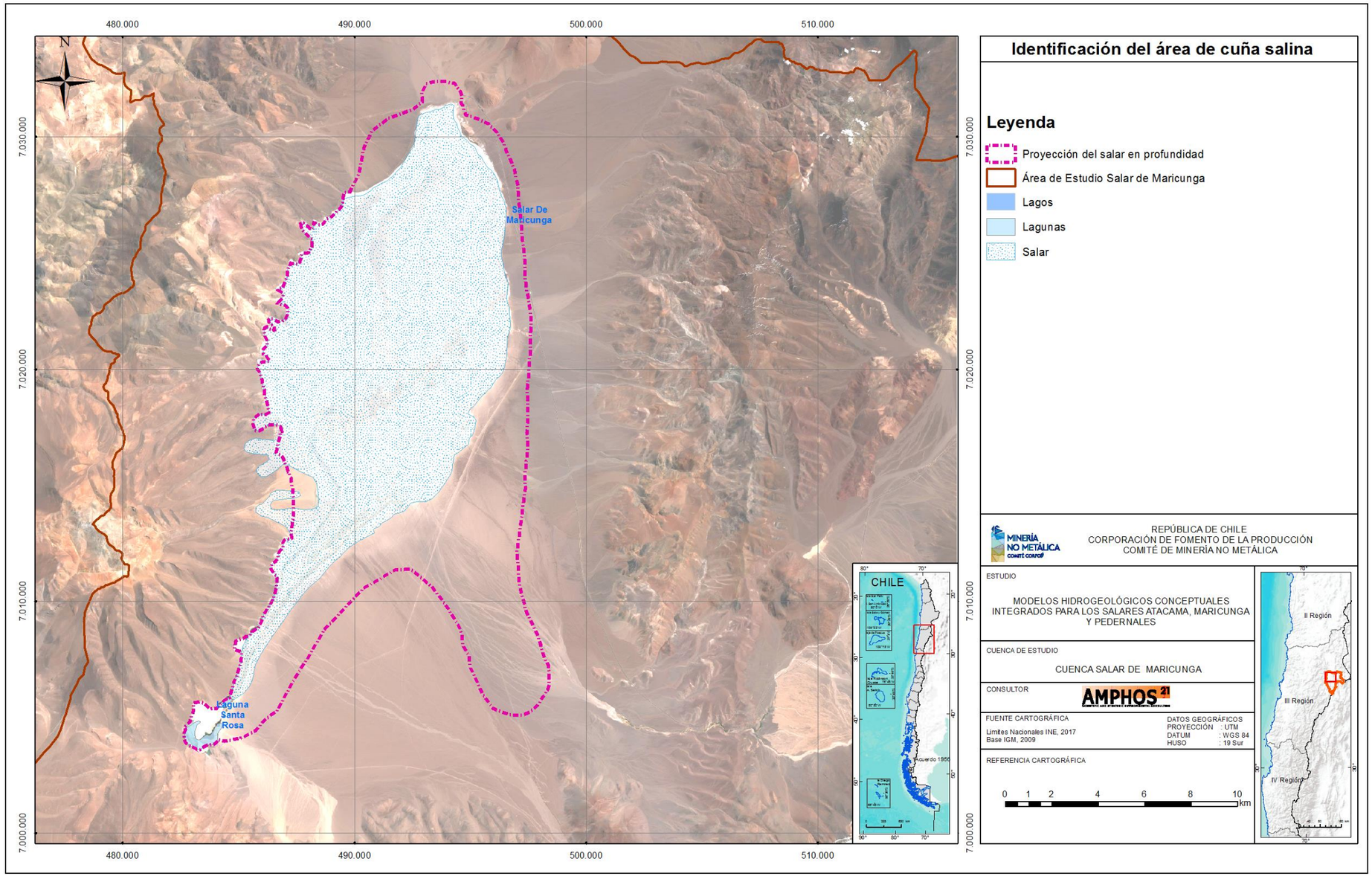


Figura 5-13. Proyección preliminar en profundidad de la cuña salina.

Fuente: elaboración propia.

5.3.3 Geometría del sistema acuífero y del basamento

A partir del análisis de los perfiles geofísicos disponibles, de la información geológica (sondajes, estructuras y cartografía en superficie) y de la interpretación hidrogeológica realizada, se ha construido un modelo 3D en el software Leapfrog Hydro (v 2.7.2) que muestra la geometría de los acuíferos. En el mismo, se han modelado los 3 volúmenes de control (acuíferos y basamento) que se describen a continuación y tienen las siguientes características:

- **Volumen 1, acuífero no consolidado:** este acuífero se encuentra ubicado a lo largo de toda la cuenca en estudio y su volumen, calculado mediante el *Leapfrog*, es de 182.340 hm^3 (siendo el volumen saturado de 135.430 hm^3). Está formado principalmente por sedimentos detríticos aluviales y coluviales y evaporitas que corresponden a las Unidades Hidrogeológicas 1 y 2. En la zona del salar es donde se observa más espesor de acuífero no consolidado, con espesores máximos de 600 m en el depocentro. Hacia el margen occidental, salvando el escalonamiento del basamento, el acuífero se acuña desde un espesor máximo de 200 m, mientras que el acuñamiento del margen oriental presenta un espesor máximo de unos 300m (Figura 5-16).

  Al este de la cuenca, en la subcuenca de Piedra Pómez, los espesores varían en función a si se consideran en el eje de la quebrada o en los márgenes. Las irregularidades del basamento en el eje generan una variación de espesor del acuífero no consolidado con mínimos de decenas de metros y máximos de 150 – 200 m.

  En el sur de la cuenca hidrográfica de Maricunga, en Ciénaga Redonda, los espesores son variables. A lo largo de la quebrada se encuentran espesores medios que oscilan entre los 30 y los 60 m; sin embargo, existen dos ensanchamientos en el acuífero: uno al norte, en el Llano Ciénaga Redonda (Figura 5-17), con espesores máximos de 200 m, y otro al sur en la Pampa de Valle Ancho con un espesor medio de 40 m.
- **Volumen 2, acuífero fracturado:** este acuífero engloba las Unidades Hidrogeológicas 3 y 4 representadas por materiales consolidados fracturados tales como ignimbritas y tobas cuyo espesor oscila entre 60 y 150 m en Piedra Pómez (Figura 5-16), siendo que en la zona limítrofe entre Maricunga y Piedra Pómez presenta un espesor medio de 250 m, acuñándose desde la parte central hacia los cuatro puntos cardinales.

  En Ciénaga Redonda, nuevamente cabe distinguir la quebrada de los ensanchamientos indicados. A lo largo de la quebrada se registran espesores intermitentes con un espesor medio de 20 m, mientras que en el ensanchamiento del Llano de Ciénaga Redonda presenta espesores máximos de 300 m en la vertiente oeste y de 100 m en la vertiente este. El ensanchamiento de la Pampa de Valle Ancho presenta mayores espesores en su vertiente oeste (espesor medio de 80 m) que en el llano de su vertiente este (con espesores de 40 a 60 m) (Figura 5-17).

Cabe destacar que en la zona del Salar de Maricunga no hay información que nos permita determinar la presencia de este acuífero fracturado. El volumen total de acuífero fracturado calculado a partir del *Leapfrog* es de 32.544 hm^3 (siendo el volumen saturado de 17.165 hm^3).

- **Volumen 3, basamento:** conforma la base poco permeable de la cuenca, está constituido por las Unidades Hidrogeológica 5 y 6 y sobre él se disponen los dos acuíferos descritos con anterioridad.

  En la zona del Salar de Maricunga es dónde el basamento alcanza la máxima profundidad con dos depocentros de hasta 550 m (Figura 5-16). Hacia los márgenes occidental (Cordillera Domeyko), meridional y oriental (Piedra Pómez), a poca distancia del afloramiento en superficie del basamento, éste alcanza profundidades de 200 m, lo cual indica que la cuenca se encaja de forma abrupta. Los datos aquí presentados son, sin embargo, interpretaciones orientativas de la realidad del salar, esto se debe a la escasa información disponible que permita situar el basamento de forma precisa.

  En Piedra Pómez se dispone de información litológica que, si bien no es abundante, sí presenta buena distribución y permite respaldar la geofísica existente. Mientras que el margen noroccidental se encaja más profundamente con espesores de 100 a 300 m, en el eje longitudinal de la subcuenca (NE-SW), el basamento presenta una profundidad variable entre 100 y 200 m, aflorando suavemente hacia la vertiente suroriental.

  El basamento en Ciénaga Redonda conforma una estrecha quebrada con 50 - 80 m de espesor promedio. Existen asimismo dos ensanchamientos en la quebrada, uno situado al norte de la misma (denominado Llano de Ciénaga Redonda) de espesores máximos de 400 m que se acuñan hacia los márgenes, y otro situado al sur (la Pampa de Valle Ancho) de espesor promedio de 50 m.

  El volumen del basamento es próximo a 7.520.500 hm^3, sin embargo, dicho volumen es un valor sin impacto real en el modelo puesto que para definir su límite inferior (la cota mínima de interpolación) el único criterio fue que no afectase al lecho de los volúmenes acuífero; de este modo podría definirse un límite inferior distinto y el volumen del basamento cambiaría en consecuencia.

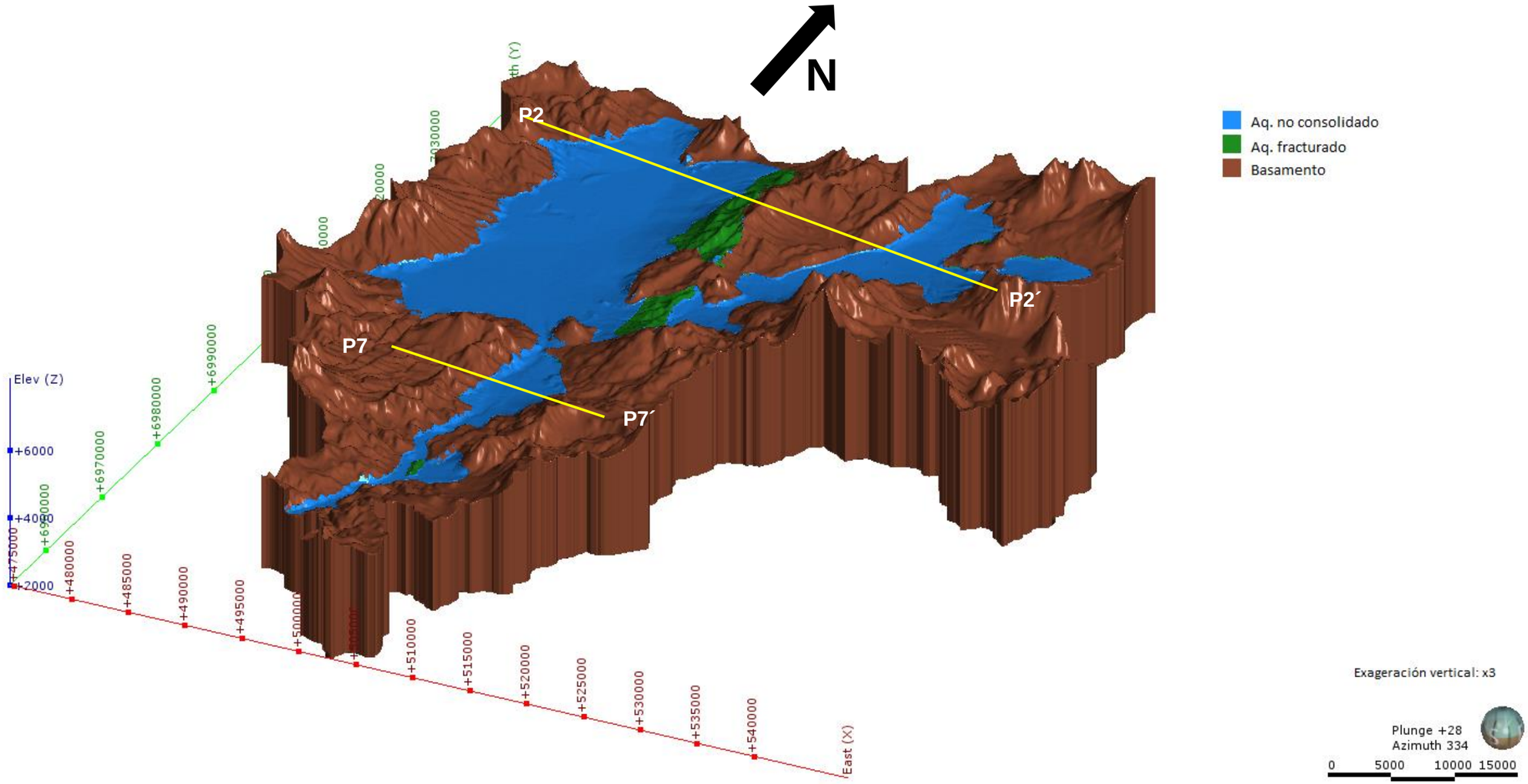


Figura 5-14. Vista 3D de los volúmenes de la cuenca incluyendo el basamento

Fuente: elaboración propia.

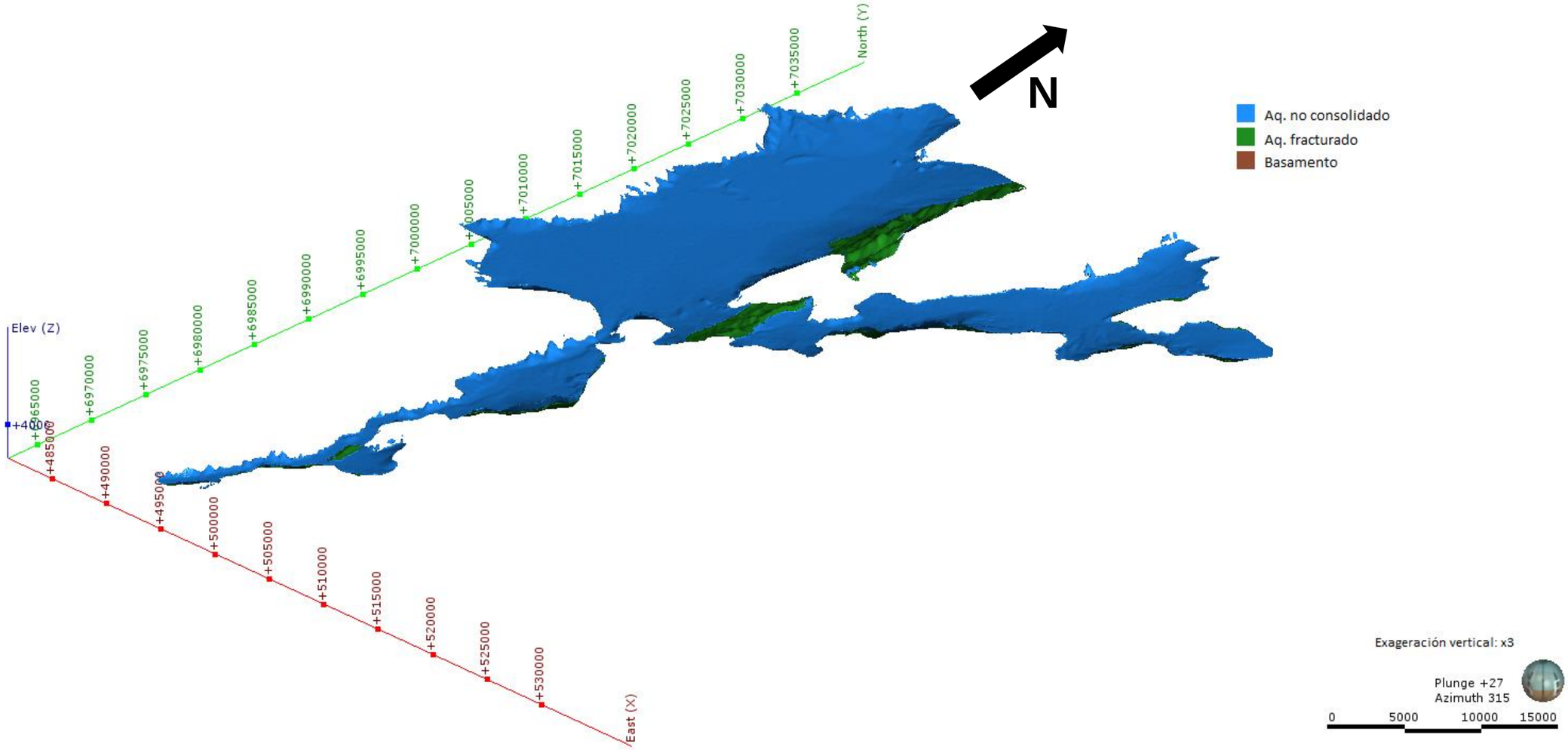


Figura 5-15. Vista 3D de los volúmenes acuíferos de la cuenca sin el basamento

Fuente: elaboración propia

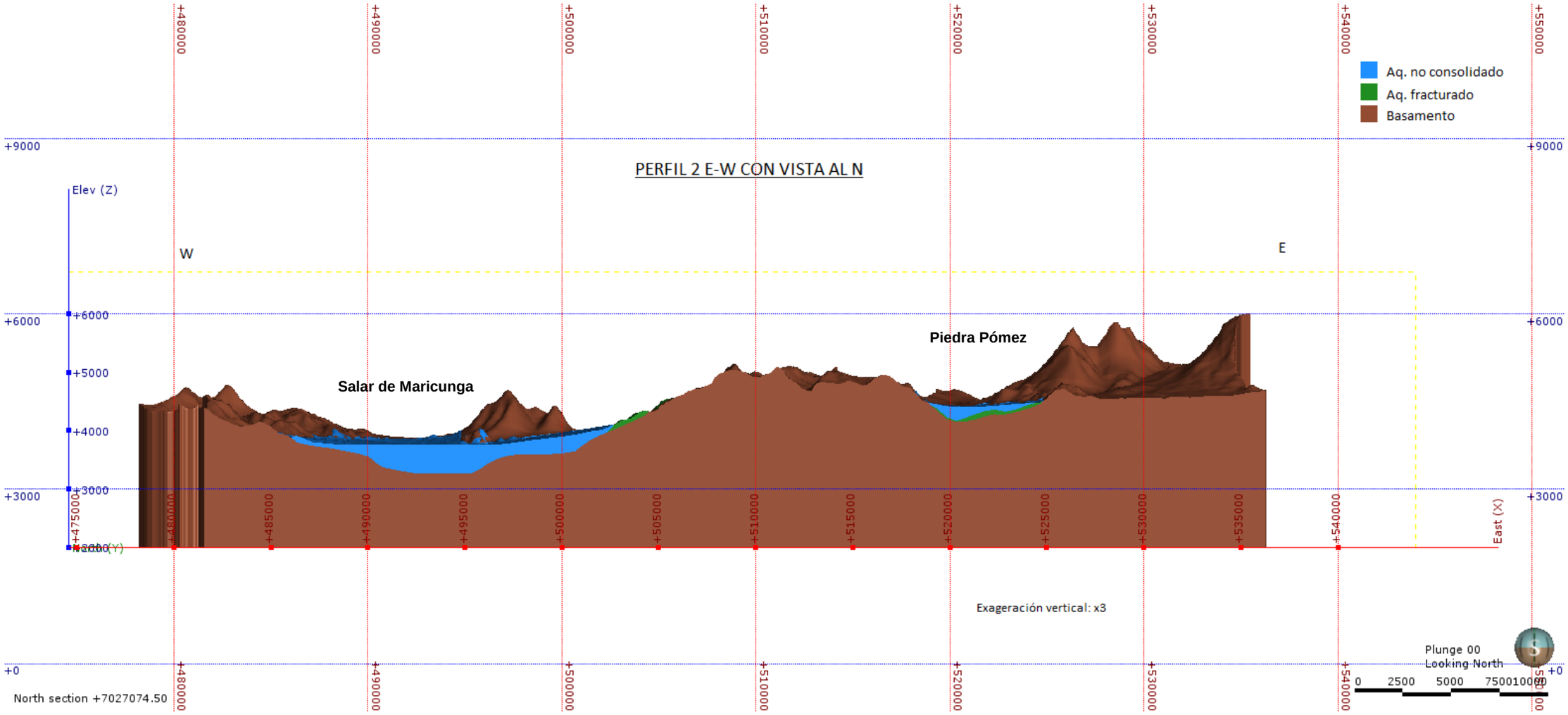


Figura 5-16. Corte Leapfrog Salar de Maricunga – Piedra Pómez con exageración vertical x3.

Fuente: elaboración propia..

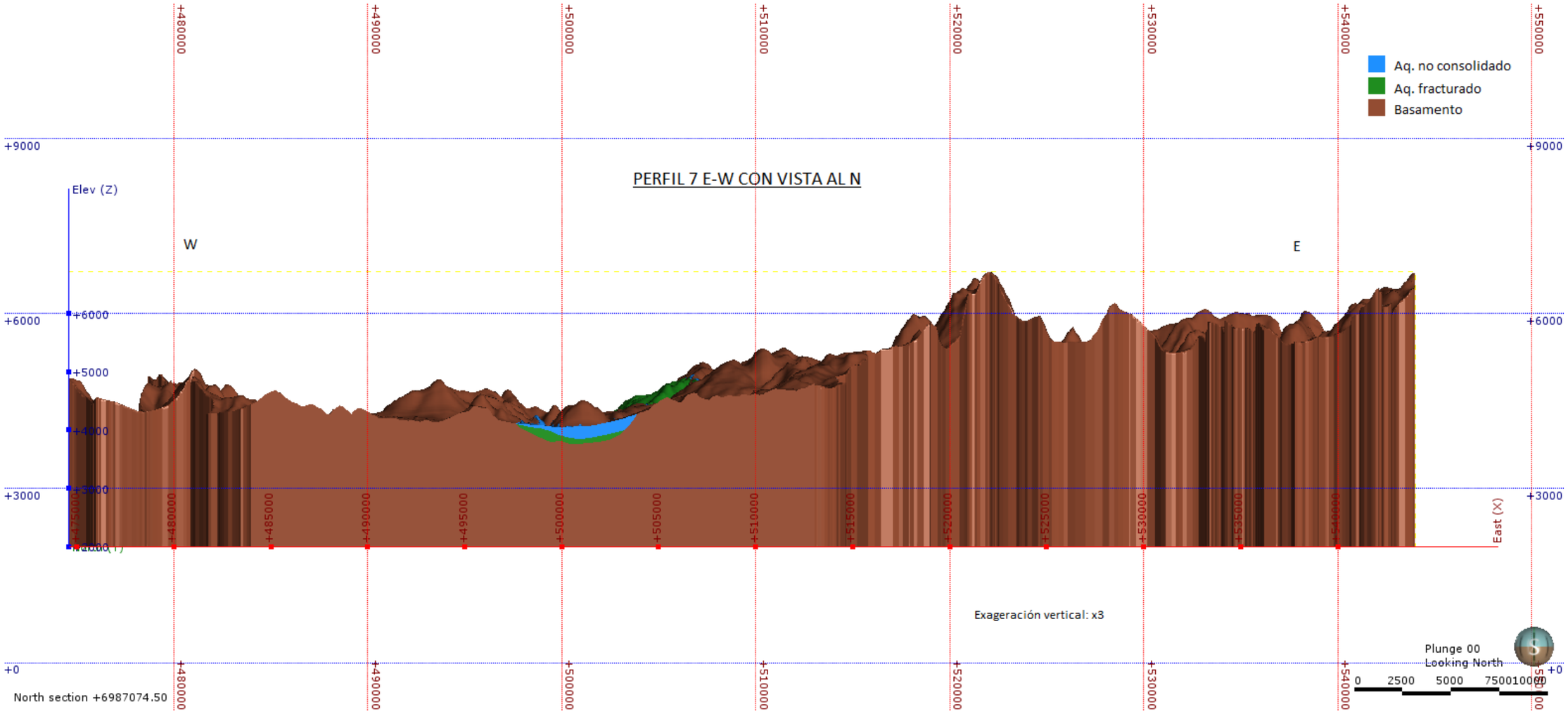


Figura 5-17. Corte Quebrada de Ciénaga Redonda (ensanche Llano de Ciénaga Redonda) con exageración vertical x3.

Fuente: elaboración propia

5.4 Piezometría

5.4.1 Inventario de puntos de agua

En la elaboración del inventario de puntos de agua (pozos, punteras, piezómetros, etc.) se han incluido todos aquellos puntos recopilados a partir de antecedentes históricos (EIA o DIA de proyectos mineros, expedientes otorgados por la DGA, informes previos), así como los más actuales, catastrados en la campaña de terreno de la Fase 3 del proyecto DGA-Amphos 21 (2016).

Las principales referencias utilizadas para la realización de la piezometría fueron las siguientes:

- M_REF.009. Estudio donde se presentan unos 58 registros de datos de nivel correspondientes a la cuenca de Maricunga y a niveles medidos en Piedra Pómez, correspondientes a mediciones realizadas entre agosto de 1988 y a marzo de 1999. Todos los registros son recopilados de estudios previos.
- M_REF.018. Extenso estudio donde se presentan un total de 170 registros de niveles en pozos o piezómetros, de los que un total de 153 presentan medidas del nivel freático. La mayoría de los datos, un total de 110 medidas, corresponden a los datos tomados para estudios previos, entre 1988 y 2015, aunque 62 de los niveles medidos, lo fueron para el estudio referenciado, entre febrero-marzo y septiembre-octubre de 2016.
- M_REF.023. Proyecto en el que se presentan 19 medidas de nivel tomadas a lo largo del año 2000.
- M_REF.028. Completo trabajo en el que se presentan gran cantidad de medidas del nivel freático. En total, durante el estudio, se perforaron 48 sondajes, de monitoreo y de bombeo, en los que se tomaron medidas de nivel a lo largo del 2010. Por el contrario, en un total de 60 puntos de monitoreo, se recopilaron las medidas históricas desde 1989 hasta el 2011, fecha de realización del tal estudio.
- M_REF.029. Proyecto en el que se recopilan 9 datos de nivel de trabajos anteriores y 17 de nueva construcción (2011).
- M_REF.034. Se registran datos de nivel de 5 perforaciones en campañas correspondientes a los años 1998 y 1999.
- M_REF.061. Se registran 12 datos de nivel de aguas subterráneas de estudios anteriores.
- M_REF.062. Completo trabajo ubicado en la zona del salar de Piedra Pómez, en el que se registran datos de 32 pozos de bombeo y observación ya construidos con anterioridad, durante abril del 1999 y noviembre de 2010, además de 15 nuevas perforaciones, de las que se presenta el registro entre enero y noviembre de 2010.

- M_REF.064. Estudio en el que se presentan las medidas de nivel realizadas en 33 puntos de muestreo subterráneo, realizadas entre 1997 y 1999.
- M_REF.067. En el presente estudio quedan registradas un total de 28 mediciones de agua subterránea, correspondientes a excavaciones superficiales realizadas en el Salar de Maricunga, durante el trabajo de terreno realizado en 1982.
- M_REF.069. En este proyecto se registran 16 datos de nivel de agua subterránea correspondientes a 2011 y 17 mediciones correspondientes a la campaña de perforación realizada en tal estudio.

El inventario de niveles de agua existentes en la zona de estudio está conformado por un total de 214 puntos distribuidos de la siguiente forma:

- Un total de 184 puntos corresponden a datos de niveles subterráneos, de los cuales 114 corresponden a pozos de producción, y 70 a piezómetros.
- 27 puntos corresponden a excavaciones realizadas con maquinaria pesada.
- Se han utilizado 3 puntos, identificados mediante imágenes satelitales, de humedales y/o manantiales (surgencias).

En la Tabla 5-15 se presentan los puntos de agua con nivel en la presente cuenca y su distribución espacial se muestra en la Figura 5-18. Adicionalmente, en la base de datos de los niveles (Anexo I) se han añadido diversos puntos de humedales (alimentados por agua subterránea) identificados mediante imágenes satelitales.

CÓDIGO POZO	COORDENADAS WGS84			CONTROL PIEZOMÉTRICO		
	NORTE	ESTE	COTA (msnm)	Tipo de punto	Número de datos	Rango de fechas
ANDINA-1	500.390	6.985.526	4.060,0	Subterráneo	1	
ANDINA-2	500.494	6.986.009	4.065,1	Subterráneo	1	
ANDINA-3	500.270	6.985.660	4.060,4	Subterráneo	1	
ANDINA-4	500.293	6.985.995	4.057,0	Subterráneo	1	
CAN-6	497.868	7.021.417	3.785,1	Subterráneo	1	
CM-1	490.880	7.028.274	3.761,9	Subterráneo	1	
CR-1	500.209	6.985.137	4.067,0	Subterráneo	1	
CR-2	500.311	6.985.629	4.060,0	Subterráneo	1	
CR-3	500.134	6.985.282	4.064,8	Subterráneo	1	
CR-4	500.129	6.985.577	4.063,0	Subterráneo	1	
CRB-1	499.942	6.987.554	4.041,0	Subterráneo	1	
CRE-1	500.030	6.987.642	4.040,0	Subterráneo	1	
CRE-2	501.012	6.987.218	4.068,4	Subterráneo	1	
CRO-1	500.142	6.985.377	4.064,0	Subterráneo	1	
CRO-2	500.087	6.985.044	4.070,0	Subterráneo	1	
CRO-3	499.917	6.984.589	4.074,0	Subterráneo	1	
CRO-4	499.650	6.984.028	4.083,5	Subterráneo	1	
CRO-5	499.685	6.983.522	4.086,0	Subterráneo	1	
CRO-6	499.391	6.981.035	4.101,9	Subterráneo	1	
EA-10	498.707	6.980.384	4.107,1	Subterráneo	1	
EA-11	499.915	6.995.858	3.960,5	Subterráneo	1	
EA-3	494.516	6.962.597	4.279,0	Subterráneo	1	
EA-4	495.707	6.964.192	4.266,3	Subterráneo	1	
EA-5	496.529	6.966.030	4.248,8	Subterráneo	1	
M-1	499.373	6.992.947	3.985,5	Subterráneo	1	
M-2	499.472	6.992.921	3.985,0	Subterráneo	1	
MAR-1	493.553	7.025.908	3.753,0	Subterráneo	1	
MAR-2	488.284	7.014.961	3.757,0	Subterráneo	1	
MAR-3	494.017	7.016.014	3.762,5	Subterráneo	1	
MAR-4	484.748	7.004.723	3.768,0	Subterráneo	1	
M01	483.815	7.003.274	3.771,3	Subterráneo	1	
M02	484.288	7.004.376	3.767,0	Subterráneo	1	
M03	484.789	7.005.534	3.766,0	Subterráneo	1	
M04	485.384	7.006.873	3.766,0	Subterráneo	1	
M07	485.504	7.006.753	3.764,1	Subterráneo	1	
M08	486.122	7.008.223	3.766,9	Subterráneo	1	
MDO-10	493.814	7.013.898	3.772,3	Subterráneo	Evolución niveles	Principios de 1989 hasta 2017
MDO-12	493.020	7.032.053	3.762,0	Subterráneo	Evolución niveles	Entre junio de 1989 y septiembre de 1996
MDO-13	491.965	7.031.233	3.774,8	Subterráneo	Evolución niveles	Entre junio de 1989 y septiembre de 1996
MDO-14	491.309	7.032.922	3.781,0	Subterráneo	Evolución niveles	Entre junio de 1989 y septiembre de 1996
MDO-15	490.947	7.029.481	3.778,5	Subterráneo	Evolución niveles	Entre junio de 1989 y septiembre de 1996

CÓDIGO POZO	COORDENADAS WGS84			CONTROL PIEZOMÉTRICO		
	NORTE	ESTE	COTA (msnm)	Tipo de punto	Número de datos	Rango de fechas
MDO-23	491.246	7.007.668	3.808,3	Subterráneo	Evolución niveles	Principios de 1989 hasta 2017
MDO-24	490.466	7.007.348	3.806,1	Subterráneo	Evolución niveles	Principios de 1989 hasta 2017
MDO-8	494.966	7.016.016	3.772,4	Subterráneo	Evolución niveles	Principios de 1989 hasta 2015
MDO-9	492.113	7.007.953	3.812,1	Subterráneo	Evolución niveles	Principios de 1989 hasta 2016
MWLR-1	510.072	7.005.360	4.406,3	Subterráneo	Evolución niveles	Entre 18/04/1999 y 30/11/2010
MWLR-2B	510.003	7.007.328	4.382,5	Subterráneo	Evolución niveles	Entre 18/04/1999 y 30/11/2010
MWLR-2D	509.993	7.007.359	4.382,0	Subterráneo	Evolución niveles	Entre 18/04/1999 y 30/11/2010
MWLR-4	513.349	7.012.140	4.406,7	Subterráneo	Evolución niveles	Entre 18/04/1999 y 30/11/2010
MWLR-4A	513.312	7.012.162	4.406,5	Subterráneo	Evolución niveles	Entre 18/04/1999 y 30/11/2010
MX-1	484.283	7.003.986	3.769,0	Subterráneo	1	
NJ-1	514.555	7.020.925	4.420,6	Subterráneo	Evolución niveles	Entre el 12/01/1998 y 18/06/1999, y durante el 2009
PO-6	498.113	6.978.954	4.120,0	Subterráneo	Evolución niveles	Marzo 1997 - Julio 1998
PO-7	497.957	6.969.918	4.202,9	Subterráneo	Evolución niveles	Mayo 1997 - Marzo 1998
PO-MW	496.402	6.966.151	4.245,0	Subterráneo	1	
PPB-1	520.810	7.021.729	4.429,9	Subterráneo	Evolución niveles	Entre 1998 y 2010
PPB-10	522.240	7.027.259	4.430,7	Subterráneo	Evolución niveles	Entre 1998 y 2010
PPB-11	520.444	7.034.590	4.448,0	Subterráneo	Evolución niveles	Entre 1998 y 2010
PPB-12	528.719	7.024.379	4.529,1	Subterráneo	Evolución niveles	Entre 1998 y 2010
PPB-14	531.372	7.026.386	4.532,2	Subterráneo	Evolución niveles	Entre 1998 y 2010
PPB-18	532.133	7.024.678	4.564,0	Subterráneo	Evolución niveles	Entre 1998 y 2010
PPB-19	518.016	7.019.961	4.416,3	Subterráneo	Evolución niveles	Entre 1998 y 2010
PPB-21	517.955	7.017.980	4.412,0	Subterráneo	Evolución niveles	Entre 1998 y 2010
PPB-23	519.980	7.019.945	4.432,0	Subterráneo	Evolución niveles	Entre 1998 y 2010
PPB-24	521.924	7.020.016	4.467,6	Subterráneo	Evolución niveles	Entre 1998 y 2010
PPB-3	520.886	7.023.584	4.415,1	Subterráneo	Evolución niveles	Entre 1998 y 2010
PPB-4	517.570	7.020.974	4.414,0	Subterráneo	Evolución niveles	Entre 1998 y 2010
PPB-5	516.765	7.018.691	4.409,2	Subterráneo	Evolución niveles	Entre 1998 y 2010
PPB-6	518.860	7.022.574	4.412,9	Subterráneo	Evolución niveles	Entre 1998 y 2010
PPB-8	520.143	7.026.901	4.409,0	Subterráneo	Evolución niveles	Entre 1998 y 2010
PPB-9	520.276	7.030.845	4.413,0	Subterráneo	Evolución niveles	Entre 1998 y 2010
PPX-1	520.795	7.021.712	4.430,3	Subterráneo	Evolución niveles	Entre 1998 y 2010
PPX-10	522.225	7.027.242	4.430,6	Subterráneo	Evolución niveles	Entre 1998 y 2010
PPX-11	520.445	7.034.625	4.449,0	Subterráneo	Evolución niveles	Entre 1998 y 2010
PPX-12	528.687	7.024.366	4.529,0	Subterráneo	Evolución niveles	Entre 1998 y 2010
PPX-14	531.351	7.026.430	4.533,0	Subterráneo	Evolución niveles	Entre 1998 y 2010
PPX-15	510.315	7.013.117	4.358,8	Subterráneo	Evolución niveles	Entre 1998 y 2010
PPX-15 A	510.325	7.013.044	4.357,4	Subterráneo	Evolución niveles	Entre 18/04/1999 y 30/11/2010

CÓDIGO POZO	COORDENADAS WGS84			CONTROL PIEZOMÉTRICO		
	NORTE	ESTE	COTA (msnm)	Tipo de punto	Número de datos	Rango de fechas
PPX-16	523.720	7.017.766	4.535,0	Subterráneo	Evolución niveles	Entre 1998 y 2010
PPX-18	532.113	7.024.691	4.564,0	Subterráneo	Evolución niveles	Entre 1998 y 2010
PPX-2	523.258	7.019.979	4.486,9	Subterráneo	Evolución niveles	Entre 1998 y 2010
PPX-3	520.777	7.023.711	4.414,4	Subterráneo	Evolución niveles	Entre 1998 y 2010
PPX-4	517.551	7.020.956	4.414,4	Subterráneo	Evolución niveles	Entre 1998 y 2010
PPX-5	516.758	7.018.725	4.409,9	Subterráneo	Evolución niveles	Entre 1998 y 2010
PPX-6	518.833	7.022.617	4.414,7	Subterráneo	Evolución niveles	Entre 1998 y 2010
PPX-7	512.735	7.015.617	4.371,3	Subterráneo	Evolución niveles	Entre 1998 y 2010
PPX-8	520.125	7.026.931	4.409,0	Subterráneo	Evolución niveles	Entre 1998 y 2010
PPX-9	520.286	7.030.845	4.413,0	Subterráneo	Evolución niveles	Entre 1998 y 2010
PTG-10A	496.235	6.987.711	4.224,6	Subterráneo	Evolución niveles	Entre noviembre de 2010 y enero de 2011
PTG-11A	496.149	6.987.200	4.372,0	Subterráneo	1	
PTG-12A	496.672	6.986.931	4.210,1	Subterráneo	1	
PTG-13A	497.044	6.987.773	4.269,5	Subterráneo	1	
PTG-14A	496.036	6.987.999	4.319,2	Subterráneo	1	
PTG-1A	497.006	6.993.950	4.249,6	Subterráneo	Evolución niveles	Entre noviembre de 2010 y enero de 2011
PTG-2A	497.299	6.993.943	4.265,4	Subterráneo	1	
PTG-3A	497.226	6.994.203	4.281,1	Subterráneo	1	
PTG-4A	496.979	6.994.215	4.349,8	Subterráneo	1	
PTG-5B	497.477	6.994.257	4.273,8	Subterráneo	1	
PTG-6A	497.158	6.994.495	4.366,3	Subterráneo	1	
PTG-7A	496.763	6.993.979	4.345,1	Subterráneo	1	
PTG-8A	496.552	6.987.436	4.181,0	Subterráneo	1	
PTG-9A	496.449	6.987.920	4.252,2	Subterráneo	1	
RA-1	496.397	6.965.398	4.255,5	Subterráneo	Evolución niveles	Entre julio del 1998 y enero de 2015
RA-2	495.508	6.963.814	4.270,0	Subterráneo	Evolución niveles	Entre julio del 1998 y enero de 2015
RA-2d50	495.505	6.963.827	4.270,0	Subterráneo	1	
RA-3	496.781	6.966.112	4.252,6	Subterráneo	Evolución niveles	Entre julio del 1998 y enero de 2015
RPG-01	500.292	6.986.068	4.056,0	Subterráneo	Evolución niveles	Durante 2010
RPG-02	499.511	6.986.376	4.063,9	Subterráneo	Evolución niveles	Durante 2010
RPG-03A	497.703	6.986.817	4.106,6	Subterráneo	Evolución niveles	Durante 2010
RPG-04A	499.392	6.986.911	4.061,1	Subterráneo	Evolución niveles	Durante 2010
RPG-04B	499.403	6.986.910	4.061,3	Subterráneo	Evolución niveles	Durante 2010
RPG-05B	499.330	6.987.498	4.052,2	Subterráneo	Evolución niveles	Durante 2010
RPG-06	497.984	6.987.480	4.100,0	Subterráneo	Evolución niveles	Durante 2010
RPG-07	497.105	6.987.171	4.134,7	Subterráneo	Evolución niveles	Durante 2010
RPG-08	499.238	6.988.316	4.041,4	Subterráneo	Evolución niveles	Durante 2010
RPG-09A	498.979	6.989.044	4.036,5	Subterráneo	Evolución niveles	Durante 2010
RPG-10	498.738	6.989.466	4.025,1	Subterráneo	Evolución niveles	Durante 2010
RPG-11	498.658	6.991.127	4.007,2	Subterráneo	Evolución niveles	Finales 2009 y durante 2010

CÓDIGO POZO	COORDENADAS WGS84			CONTROL PIEZOMÉTRICO		
	NORTE	ESTE	COTA (msnm)	Tipo de punto	Número de datos	Rango de fechas
RPG-12A	498.414	6.993.389	4.054,4	Subterráneo	Evolución niveles	Finales 2009 y durante 2010
RPG-12B	498.419	6.993.392	4.054,2	Subterráneo	Evolución niveles	Finales 2009 y durante 2010
RPG-13	497.060	6.993.797	4.223,8	Subterráneo	Evolución niveles	Finales 2009 y durante 2010
RPG-14	498.857	6.993.699	4.011,3	Subterráneo	Evolución niveles	Finales 2009 y durante 2010
RPG-15	499.180	6.995.399	4.001,2	Subterráneo	Evolución niveles	Finales 2009 y durante 2010
RPG-16	499.970	6.995.446	3.961,3	Subterráneo	Evolución niveles	Finales 2009 y durante 2010
RPG-17	500.179	6.992.755	4.010,6	Subterráneo	Evolución niveles	Finales 2009 y durante 2010
RPG-18B	500.499	6.993.115	4.006,4	Subterráneo	Evolución niveles	Finales 2009 y durante 2010
RPG-19	500.880	6.992.641	4.021,9	Subterráneo	Evolución niveles	Finales 2009 y durante 2010
RPG-20	501.136	6.991.837	4.041,1	Subterráneo	Evolución niveles	Finales 2009 y durante 2010
RPG-21C	494.895	6.962.445	4.283,4	Subterráneo	Evolución niveles	Desde enero de 2010 hasta enero de 2015
RPG-22	496.007	6.964.571	4.261,3	Subterráneo	Evolución niveles	Durante 2010
RPG-23	499.364	6.992.737	3.984,3	Subterráneo	Evolución niveles	Finales 2009 y durante 2010
RPG-24	499.528	6.993.110	3.983,9	Subterráneo	Evolución niveles	Finales 2009 y durante 2010
RPG-25	499.427	6.992.941	3.984,0	Subterráneo	Evolución niveles	Finales 2009 y durante 2010
RPG-26	499.343	6.998.561	3.934,3	Subterráneo	Evolución niveles	Segunda mitad de 2010
RPG-27	499.528	6.998.523	3.934,0	Subterráneo	Evolución niveles	Segunda mitad de 2010
RPG-28	499.541	6.998.131	3.935,7	Subterráneo	Evolución niveles	Segunda mitad de 2010
RPG-29	499.190	6.999.427	3.927,0	Subterráneo	Evolución niveles	Segunda mitad de 2010
RPG-30	499.553	6.998.123	3.935,4	Subterráneo	Evolución niveles	Segunda mitad de 2010
RPG-31	496.743	6.966.540	4.243,4	Subterráneo	Evolución niveles	Desde enero de 2010 hasta enero de 2015
RPG-33	499.344	6.988.523	4.036,2	Subterráneo	Evolución niveles	Durante 2010
RPG-34	496.961	6.993.813	4.246,6	Subterráneo	Evolución niveles	Durante 2010
RPG-35	498.077	6.988.961	4.064,1	Subterráneo	Evolución niveles	Finales 2009 y durante 2010
RPG-39	498.586	6.992.298	4.034,8	Subterráneo	Evolución niveles	Finales 2009 y durante 2010
RPG-40	502.057	6.991.129	4.073,8	Subterráneo	Evolución niveles	Segunda mitad de 2010
RPG-41	500.928	6.990.553	4.046,7	Subterráneo	Evolución niveles	Segunda mitad de 2010
RPG-42	500.196	6.991.154	4.024,5	Subterráneo	Evolución niveles	Segunda mitad de 2010
RPG-43	499.278	6.992.137	3.992,4	Subterráneo	Evolución niveles	Segunda mitad de 2010
RPG-44	498.632	6.990.994	4.008,9	Subterráneo	Evolución niveles	Segunda mitad de 2010
RPG-45A	499.404	6.997.100	3.949,9	Subterráneo	1	
RPG-45B	499.404	6.997.100	3.949,9	Subterráneo	Evolución niveles	Entre noviembre y diciembre de 2010
SR-5	489.491	7.029.966	3.806,4	Subterráneo	1	
C2	493.041	7.025.899	3.747,4	Subterráneo	1	
C3	495.056	7.024.895	3.746,9	Subterráneo	1	

CÓDIGO POZO	COORDENADAS WGS84			CONTROL PIEZOMÉTRICO		
	NORTE	ESTE	COTA (msnm)	Tipo de punto	Número de datos	Rango de fechas
C4	493.058	7.024.400	3.747,4	Subterráneo	1	
C5	495.045	7.022.900	3.746,6	Subterráneo	1	
C6	493.039	7.022.918	3.746,8	Subterráneo	1	
P1	494.043	7.025.904	3.747,3	Subterráneo	1	
P1.1	494.032	7.025.891	3.747,6	Subterráneo	1	
P1.2	494.061	7.025.894	3.747,3	Subterráneo	1	
P1.3	494.032	7.025.905	3.747,7	Subterráneo	1	
P1.4	494.032	7.025.915	3.747,7	Subterráneo	1	
P2.1	494.035	7.023.393	3.746,4	Subterráneo	1	
P2.3	494.030	7.023.410	3.746,4	Subterráneo	1	
P2.4	494.034	7.023.403	3.746,4	Subterráneo	1	
P2.5	494.061	7.023.397	3.746,6	Subterráneo	1	
P3	494.052	7.025.380	3.747,6	Subterráneo	1	
P2	494.030	7.023.422	3.746,2	Subterráneo	1	
S1A	494.220	7.028.201	3.749,0	Subterráneo	1	
S2	492.143	7.027.141	3.748,8	Subterráneo	1	
S-5	488.590	7.026.366	3.750,2	Subterráneo	1	
S-6	489.964	7.023.913	3.749,1	Subterráneo	1	
S-8	491.753	7.020.871	3.748,7	Subterráneo	1	
S-11	490.569	7.028.215	3.757,6	Subterráneo	1	
S-13	492.213	7.029.964	3.755,9	Subterráneo	1	
S-15	496.104	7.030.533	3.781,2	Subterráneo	1	
S-17	497.969	7.022.516	3.789,9	Subterráneo	1	
S-16A	497.122	7.026.005	3.769,9	Subterráneo	1	
S-16B	497.123	7.025.991	3.770,0	Subterráneo	1	
S-18	494.054	7.024.141	3.748,6	Subterráneo	1	
S-19	493.104	7.027.381	3.748,2	Subterráneo	1	
P-4.1	493.194	7.027.224	3.748,8	Subterráneo	1	
P-4.2	493.172	7.027.242	3.748,7	Subterráneo	1	
P-4.3	493.160	7.027.250	3.748,7	Subterráneo	1	
P-4.4	493.139	7.027.265	3.748,7	Subterráneo	1	
P-1.8	493.201	7.030.174	3.754,0	Subterráneo	1	
P-2.8	493.180	7.029.187	3.754,0	Subterráneo	1	
P-3.8	493.159	7.028.167	3.753,0	Subterráneo	1	
P-4.10	491.309	7.027.253	3.753,0	Subterráneo	1	
P-4.11	490.373	7.027.279	3.753,3	Subterráneo	1	
P-4.12	489.584	7.027.300	3.753,5	Subterráneo	1	
P-4.5	496.013	7.027.085	3.753,0	Subterráneo	1	
P-4.7	494.110	7.027.164	3.754,0	Subterráneo	1	
P-4.8	493.159	7.027.180	3.753,0	Subterráneo	1	
P-4.9	492.234	7.027.221	3.752,0	Subterráneo	1	
P-5.8	493.133	7.026.192	3.754,0	Subterráneo	1	
P-7.10	491.272	7.024.321	3.753,1	Subterráneo	1	
P-7.12	489.380	7.024.368	3.753,5	Subterráneo	1	

CÓDIGO POZO	COORDENADAS WGS84			CONTROL PIEZOMÉTRICO		
	NORTE	ESTE	COTA (msnm)	Tipo de punto	Número de datos	Rango de fechas
P-7.14	487.483	7.024.436	3.752,0	Subterráneo	1	
P-7.5	495.987	7.024.169	3.753,0	Subterráneo	1	
P-7.6	495.062	7.024.205	3.753,2	Subterráneo	1	
P-7.7	494.069	7.024.237	3.754,0	Subterráneo	1	
P-7.8	493.138	7.024.258	3.754,0	Subterráneo	1	
P-7.9	492.239	7.024.279	3.753,1	Subterráneo	1	
P-8.8	493.133	7.023.270	3.753,0	Subterráneo	1	
P-9.8	493.102	7.022.340	3.753,0	Subterráneo	1	
A.0	490.765	7.021.942	3.753,1	Subterráneo	1	
A.2	491.654	7.020.521	3.752,8	Subterráneo	1	
A.3	490.013	7.021.472	3.753,8	Subterráneo	1	
A.4	489.171	7.021.911	3.752,1	Subterráneo	1	
B.2	491.272	7.022.042	3.754,0	Subterráneo	1	
M.1	487.896	7.020.322	3.754,0	Subterráneo	1	
Lamas-1	507.851	7.005.278	4.328,0	Humedal	1	
Lamas-2	507.406	7.004.393	4.313,0	Humedal	1	
Lamas-3	505.874	7.004.613	4.204,0	Humedal	1	

Tabla 5-15. Tabla de niveles de agua de la zona de estudio.

Fuente: elaboración propia.

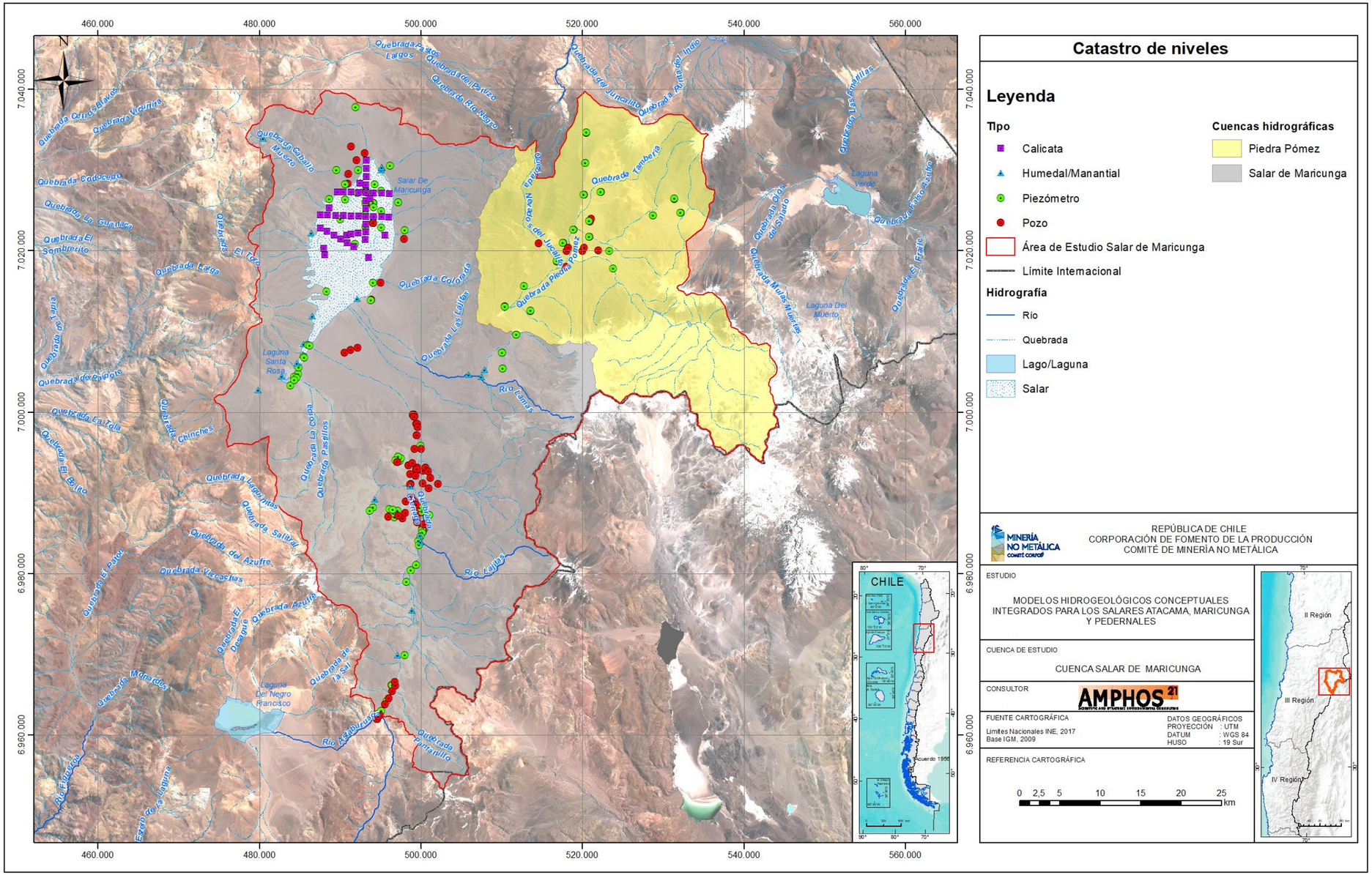


Figura 5-18: Proyección del catastro de puntos de niveles en la cuenca de Maricunga.

Fuente: elaboración propia.

5.4.2 Evolución de niveles

A partir de la información recopilada en el inventariado de puntos de agua, y en los diferentes informes consultados, se pudo revisar la evolución de los niveles de agua en los diferentes pozos o piezómetros instalados en la zona de estudio. Los principales estudios de donde se pudo extraer esta información fueron los siguientes:

- M_REF.28. En el documento se detalla la evolución de niveles en los pozos del centro y sur del Salar de Maricunga y los emplazados en Ciénaga Redonda. La principal problemática de la información recopilada reside en que en el documento no se encuentran los registros numéricos de los niveles, pudiéndose únicamente rescatar los gráficos de la variación de estos. La información de interés fue registrada entre 1998 y 2012, aunque en alguno de los pozos existe un registro previo y anterior, desde 1988.
- M_REF.31. En este documento se exponen los resultados de la variación de niveles en los pozos del centro y sur del Salar de Maricunga. Los datos en este registro se encuentran como en el anterior, únicamente se ha podido visualizar los registros gráficos de la variación de niveles. Los registros de niveles se tomaron en dos periodos: entre 1988 y 1991, y entre 1998 y 2012.
- M_REF.32. Registro numérico de la evolución de niveles en Piedra Pómez, entre los años 1998 y 1999.
- M_REF.48. Registro numérico de los niveles de agua en los pozos emplazados en Ciénaga Redonda y el Salar de Maricunga, entre los años 1989 y 1996.
- M_REF.62. Registro numérico de los niveles de agua subterránea en Piedra Pómez entre 1999 y 2010.
- M_REF.68. Registro gráfico de la variación de niveles en los pozos de Ciénaga Redonda, entre 1998 y 2016.

Con la finalidad de obtener una mejor comprensión de la evolución y análisis de los niveles de agua, se ha dividido la cuenca en tres sectores: Salar de Maricunga, Piedra Pómez y Ciénaga Redonda.

5.4.2.1 Variación de niveles en el sector de Piedra Pómez

En total se ha obtenido registro de evolución de 39 niveles, principalmente, comprendidos entre 1998 y 2010, aunque a efectos de exposición del presente capitulo, se han seleccionado 5 pozos representativos: PPB-1, PPB-5, PPB-8, PPB-12 y PPX-16 (Figura 5-19).

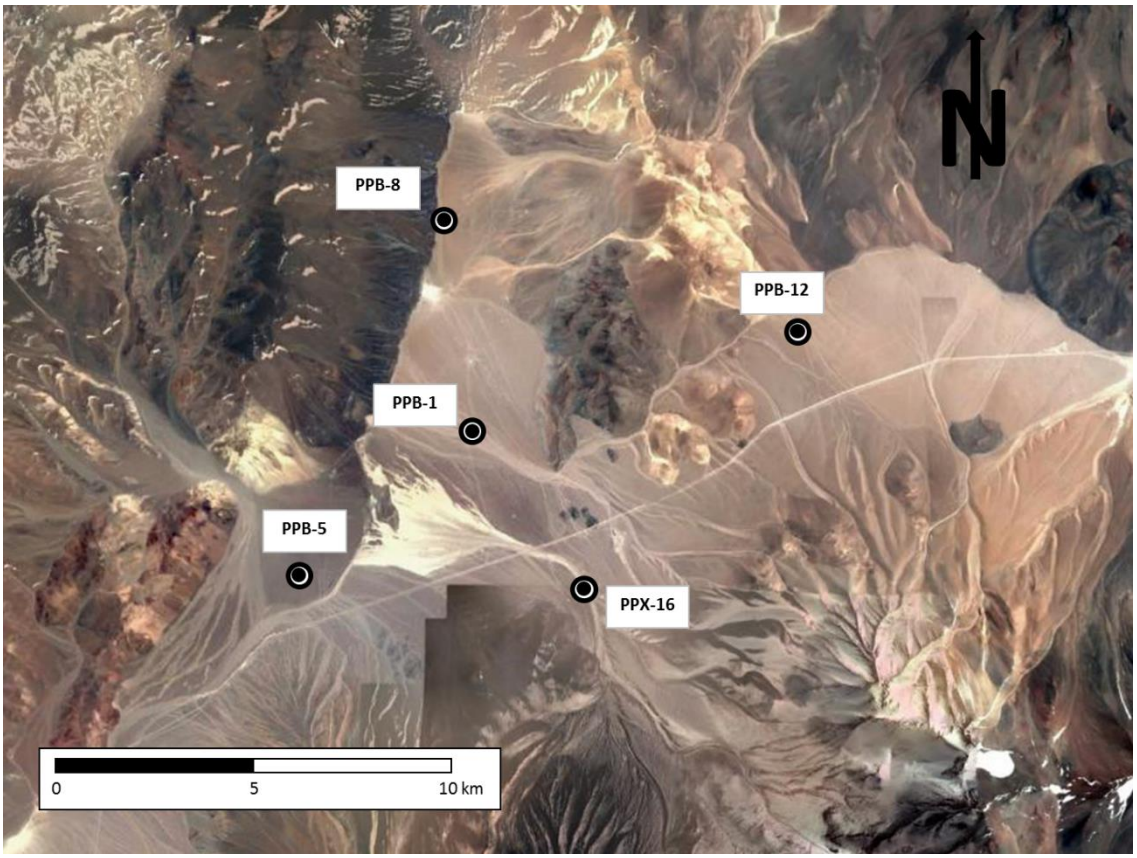


Figura 5-19: Puntos seleccionados para estudio de variación de niveles en Piedra Pómez.

Fuente: elaboración propia.

A continuación, en la Figura 5-20 y la Figura 5-21, se puede observar la variación de niveles en los pozos seleccionados. Los niveles de agua presentan cierta estabilidad durante el periodo de medición de 1998 al 2010, con variaciones puntuales poco significativas, posiblemente atribuibles a eventos de recarga o bien a años más secos y/o más húmedos.

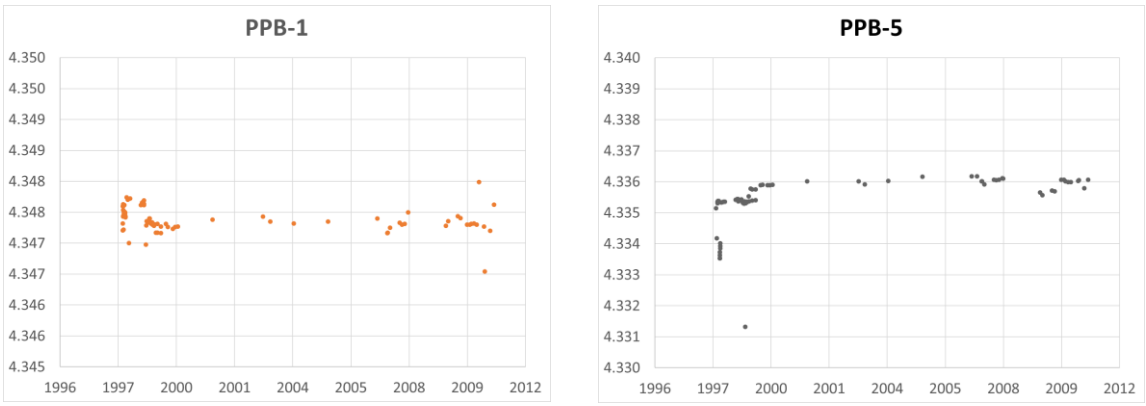


Figura 5-20: Variación de niveles en los pozos PPB-1 y PPB-5.

Fuente: elaboración propia.

Figura 5-21: Variación de niveles en los pozos PPB-8, PPB-12 y PPX-16.

Fuente: elaboración propia.

5.4.2.2 Sector Salar de Maricunga

En este sector, únicamente, se encuentran 9 puntos con registro de niveles a lo largo del tiempo, los que se pueden agrupar de la siguiente manera:

- En la zona norte: MDO-12 MDO-13, MDO-14 y MDO-15.
- En la zona centro: MDO-8 y MDO-10.
- En la zona sur MDO-9, MDO-23 y MDO-24.

La evolución de los niveles de agua se puede observar en la Figura 5-22, Figura 5-23, Figura 5-24, Figura 5-25 y Figura 5-26. Se observan variaciones en los niveles poco significativas. Cabe mencionar que los registros se encuentran muy agrupados hacia el año 1989 y luego son muy esporádicos durante la medida de los mismos.

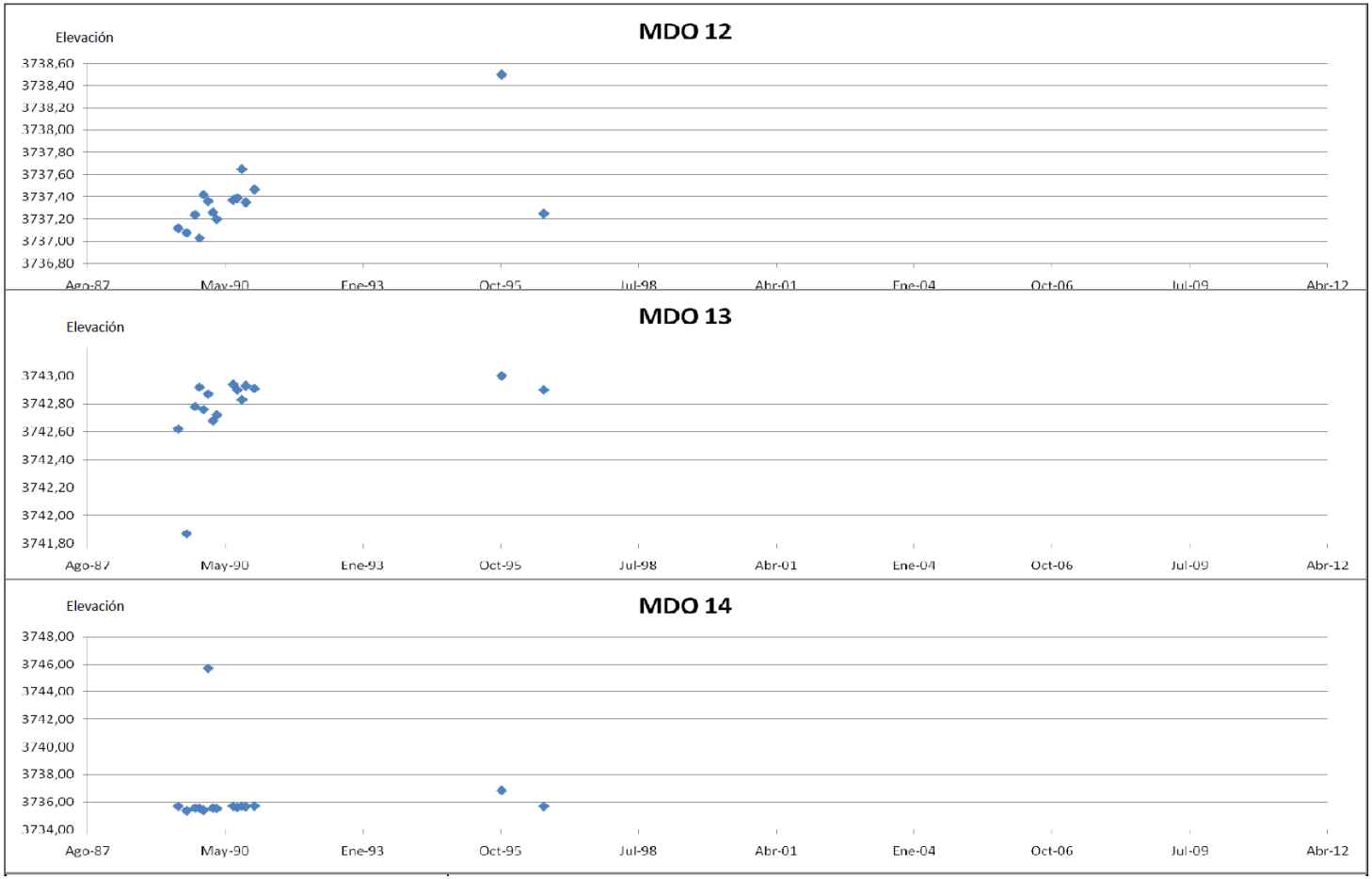


Figura 5-22: Evolución de niveles en los pozos MDO-12, MDO-13 y MDO-14, entre agosto de 1987 y octubre de 2005.

Fuente: elaboración propia.

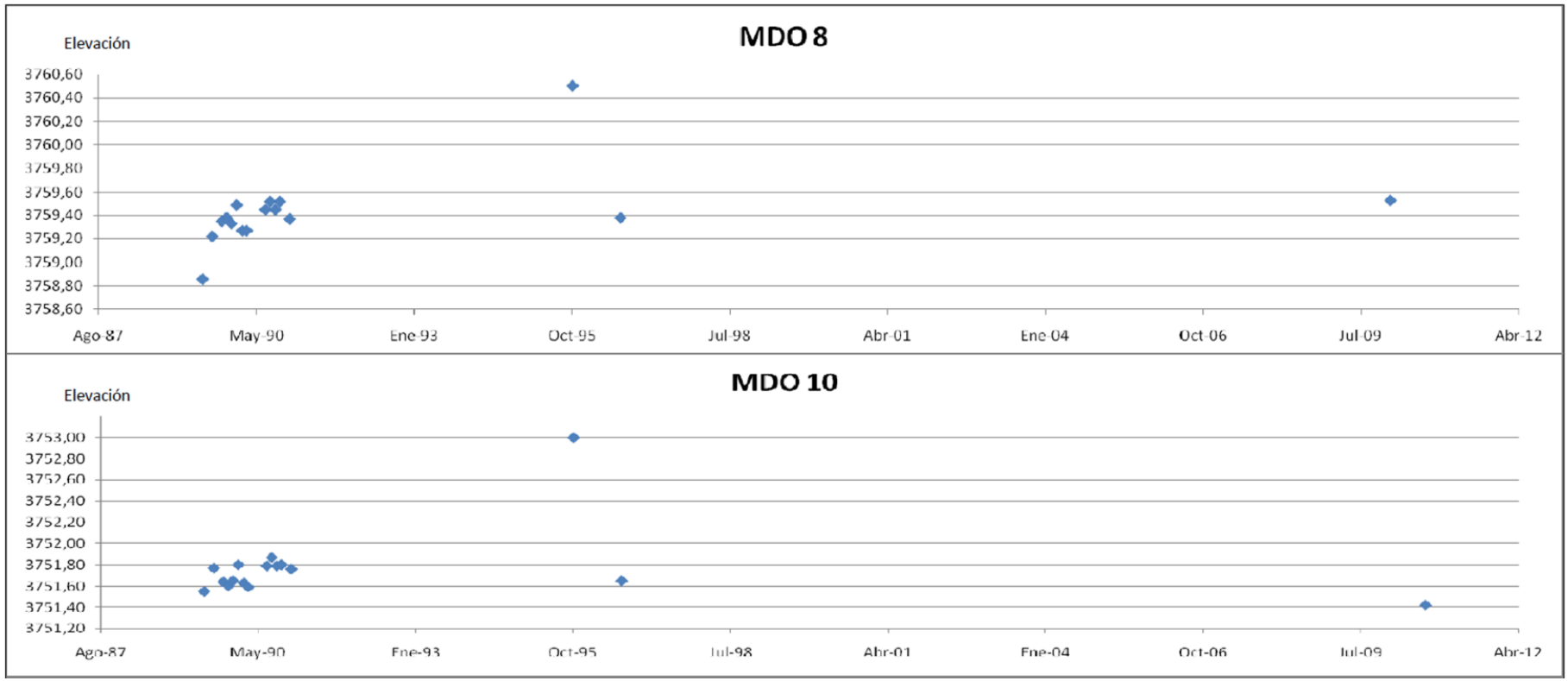


Figura 5-23: Evolución de niveles en los pozos MDO-8 y MDO-10, entre agosto de 1987 y abril de 2012.

Fuente: elaboración propia.

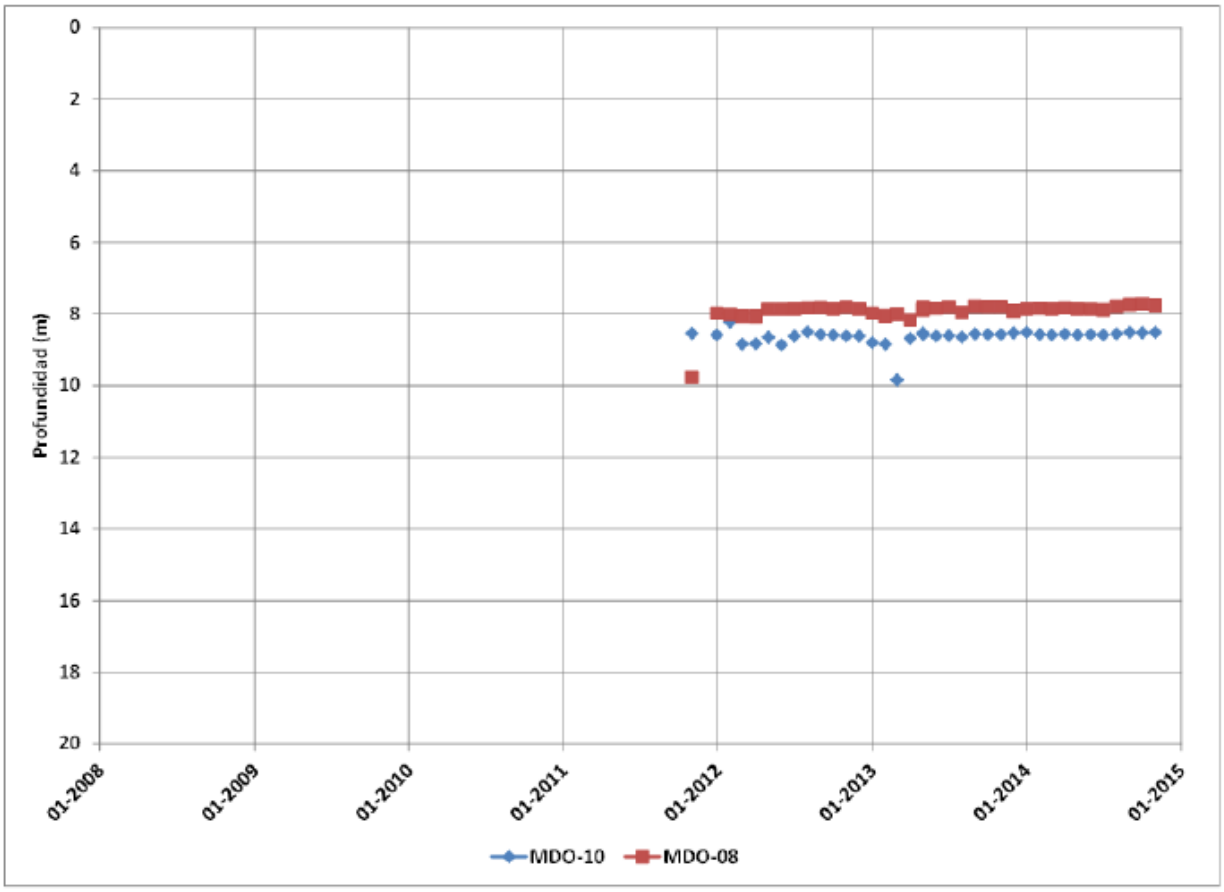


Figura 5-24: Evolución de niveles en los pozos MDO-8 y MDO-10, entre enero de 2012 hasta enero de 2015.

Fuente: elaboración propia.

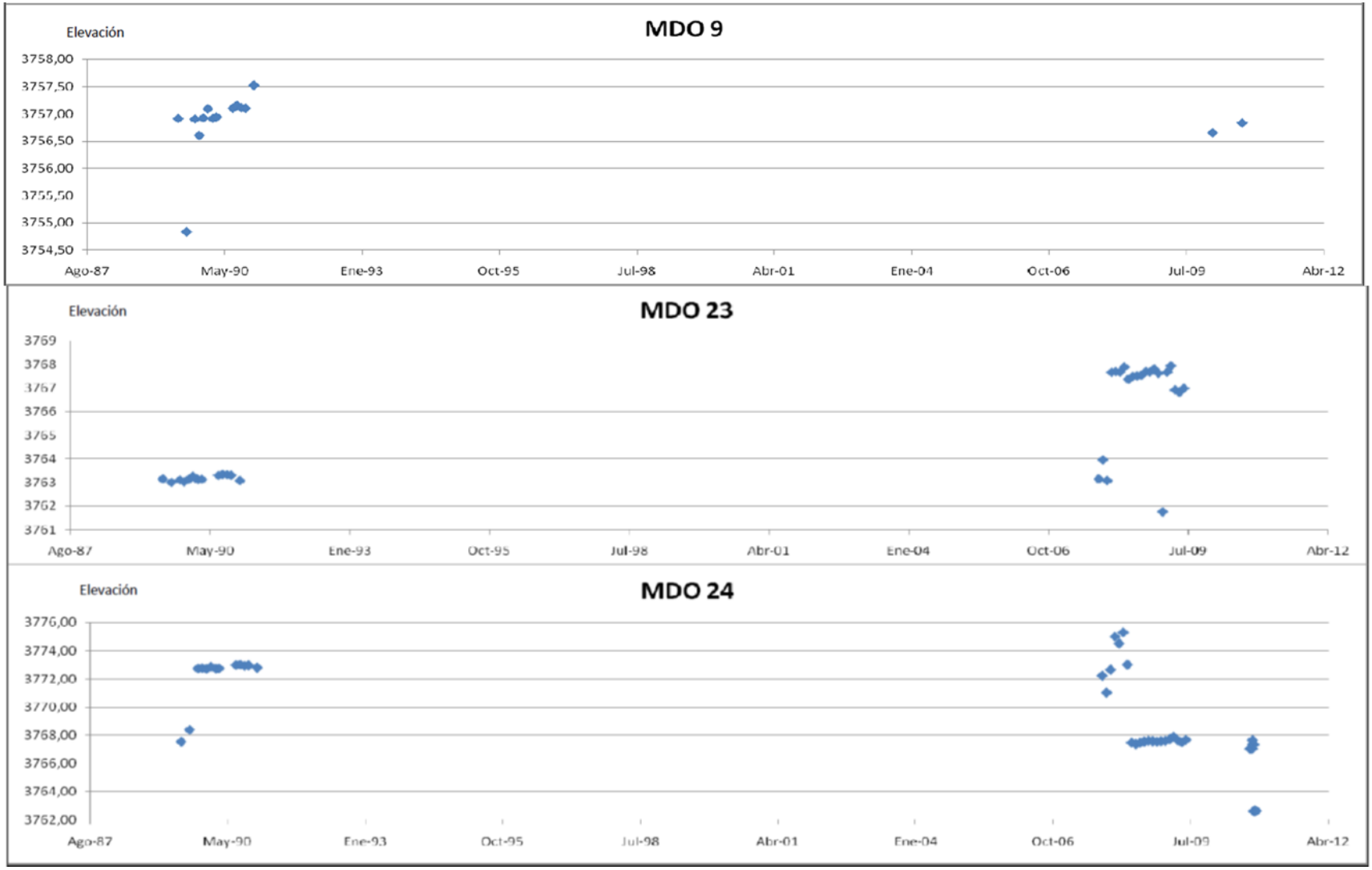


Figura 5-25: Evolución de niveles en los pozos MDO-9, MDO-23 y MDO-24, entre agosto de 1987 y abril de 2012.

Fuente: elaboración propia.

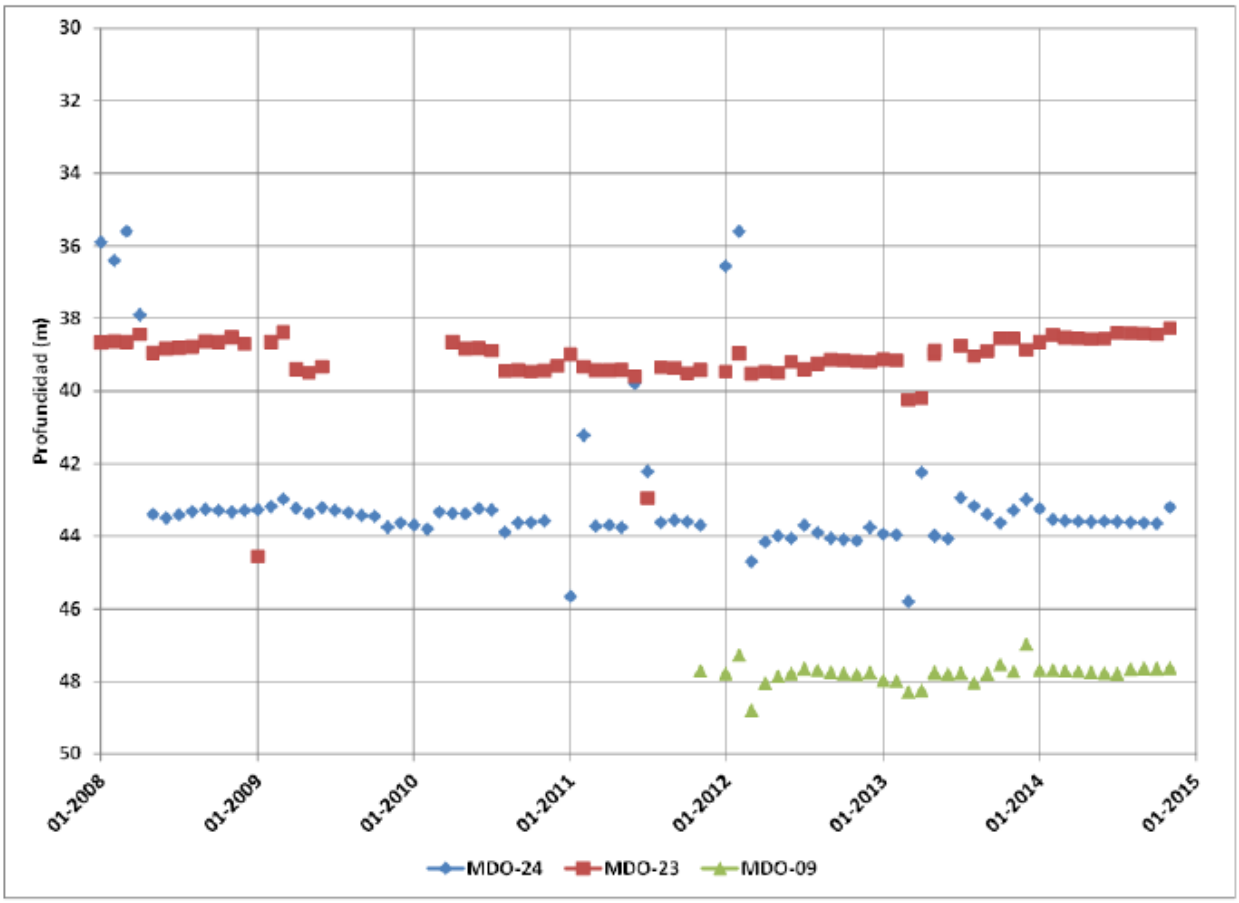


Figura 5-26: Evolución de niveles en los pozos MDO-9, MDO-23 y MDO-24, entre enero de 2008y enero de 2015.

Fuente: elaboración propia.

5.4.2.3 Sector Ciénaga Redonda

La evolución de los niveles de estos pozos se puede observar en la Figura 5-27. No ha sido posible realizar una figura conjunta del periodo completo debido a que no se han encontrado los registros numéricos de los niveles (RA-1, RA-2 y RA-3).

En el pozo RA-2 se observa un descenso generalizado desde el año 2000 hasta 2016 que en algunos casos supera 5 m. El efecto en el pozo RA-1 resulta similar, alcanzando los 4-5 m y produciéndose de forma generalizada a partir del año 2006. Por su parte, en el pozo RA-3, se produce un descenso máximo de 3 m. Estos descensos son el resultado de la explotación acuífera que ha sufrido el sector de Ciénaga Redonda y que, actualmente, deberían estar recuperándose debido al cese de extracción de agua. A partir del proceso sancionatorio, aplicado con posterioridad a marzo de 2016, los bombeos en las diferentes zonas se han detenido. Luego de este período, no se han encontrado registros de niveles de la zona en los puntos descritos, por lo que se desconoce el grado de recuperación del nivel piezométrico en la zona.

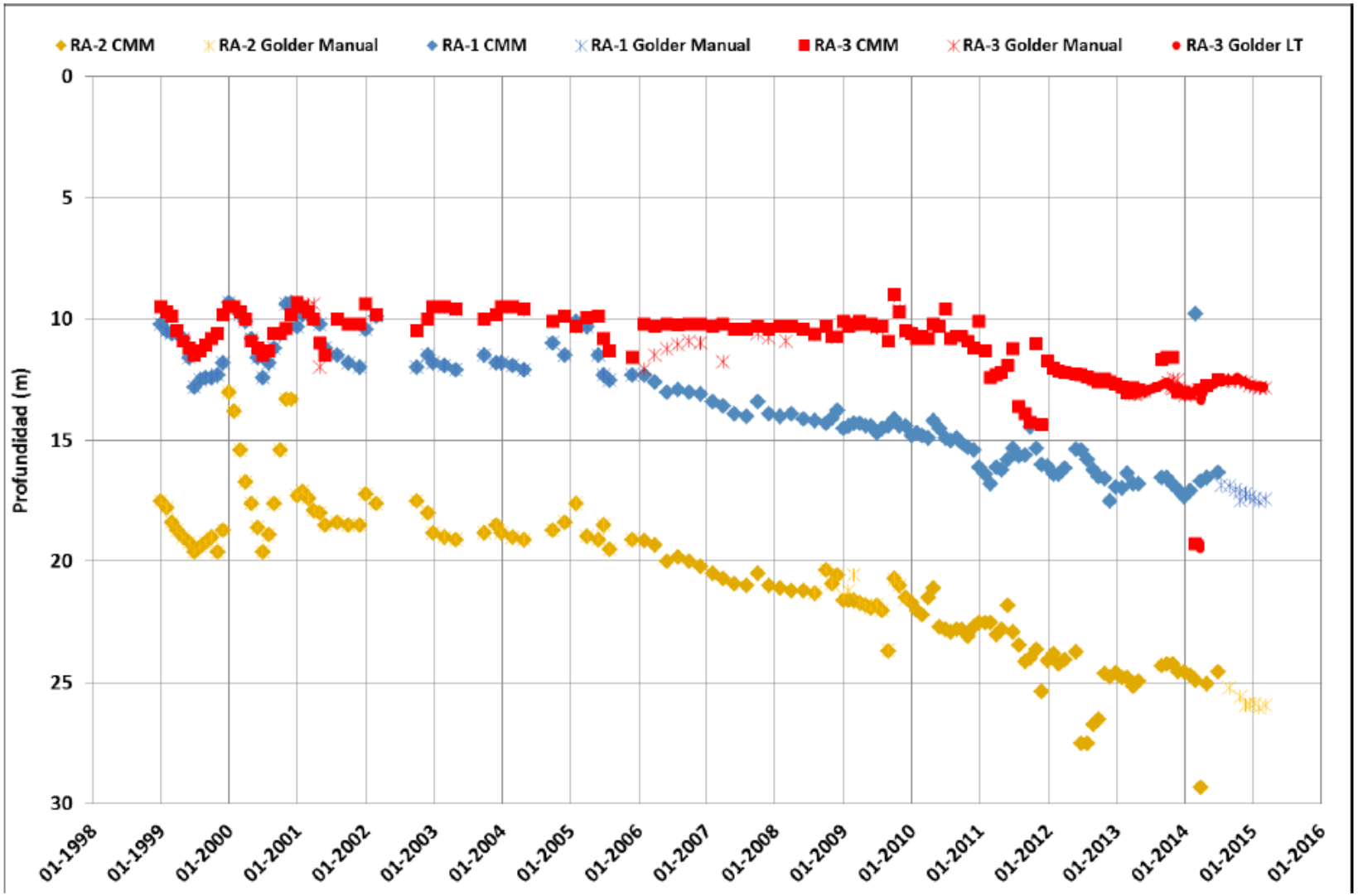


Figura 5-27: Evolución de niveles en los pozos RA-1, RA-2 y RA-3, entre enero de 1999 y enero de 2015.

Fuente: elaboración propia.

5.4.3 Funcionamiento del flujo en la zona de estudio

En la Figura 5-29 se ha trazado una piezometría tentativa de la zona de estudio en función de los datos más actuales de nivel de agua recopilados. Se ha considerado que la equidistancia entre isolíneas más adecuada para la representación gráfica es de 20 m y se han trazado las principales líneas de flujo de la zona estudiada.

En la mayor parte de la zona de estudio las isopiezas reflejan la topografía de la cuenca destacando los puntos con mayor potencial hidráulico en las zonas más altas de ésta. De la misma manera, se puede observar la confluencia de las dos zonas más importantes de recarga (Piedra Pómez al este y Ciénaga Redonda al sur) hacia el Salar de Maricunga, el cual representa el principal punto de descarga de la cuenca.

5.4.3.1 Sector Ciénaga Redonda

El sector Ciénaga Redonda (Figura 5-30) se encuentra al sur de la cuenca Salar de Maricunga y se encuentra formado por una gran extensión de materiales de naturaleza, mayoritariamente, aluvial (UH1) encajados en el valle del mismo nombre.

Los materiales acuíferos (UH1) se encuentran formados por sedimentos detríticos no consolidados. Además, a partir de la geofísica recopilada, se ha observado que este relleno sedimentario presenta espesores variables de entre 60 hasta 160 m hacia el sur, llegando a alcanzar potencias de 250 m en el norte de la cuenca. Superficialmente, a lo largo del acuífero, se encuentran humedales y bofedales con niveles freáticos cuasi superficiales, que generan una zona de gran interés ambiental e hidrogeológico.

A su vez, los límites laterales del acuífero se encuentran formados por complejos volcánicos (UH 5) y el basamento; por la roca sana y fracturada de las unidades hidrogeológicas UH5 y UH6 de edad paleozoica.

Finalmente, en base al análisis piezométrico, es posible indicar que la línea de flujo tiene sentido sur-norte descargando en el Llano de Ciénaga Redonda, al norte del presente sector.

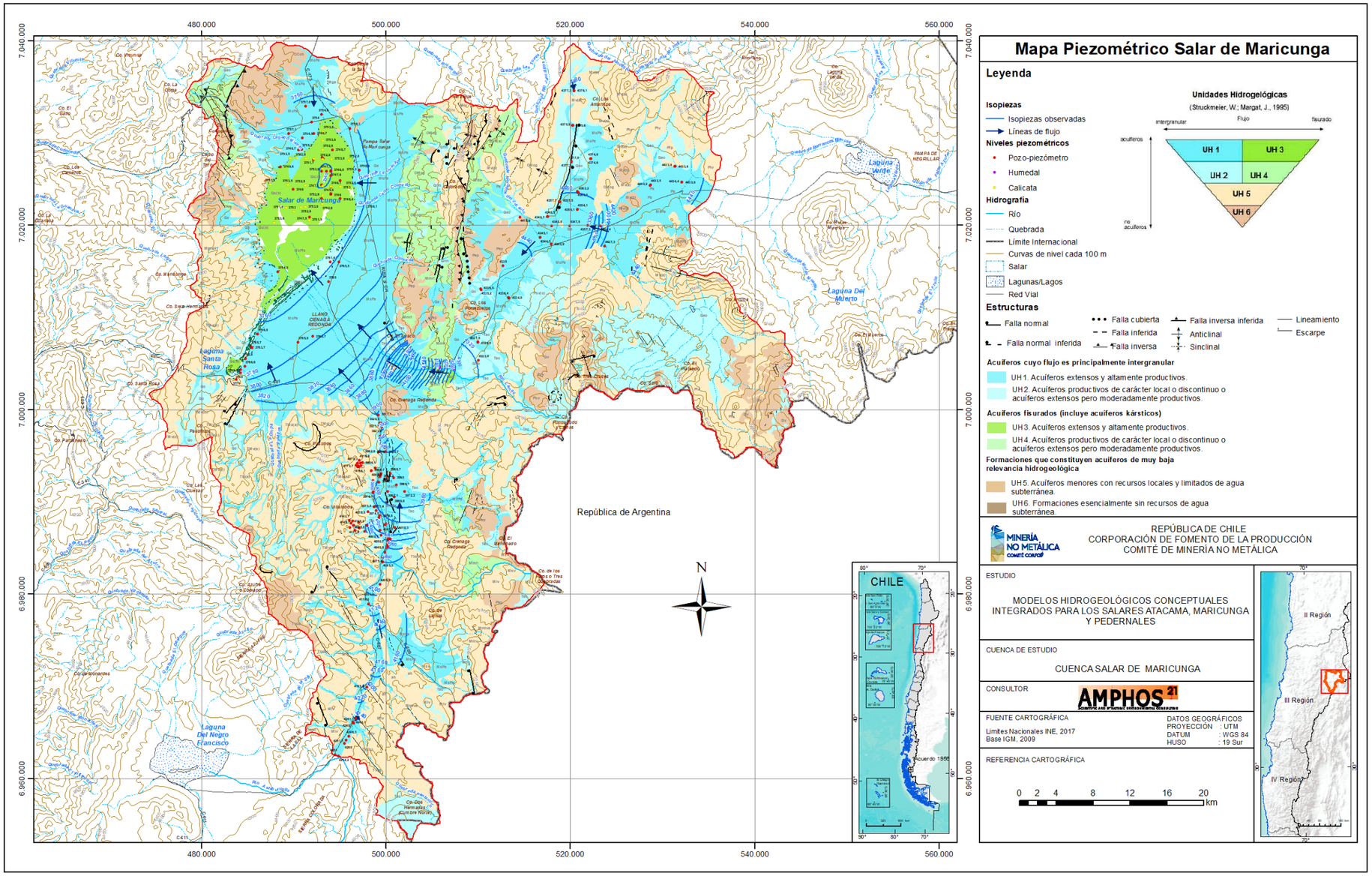


Figura 5-28: Piezometría tentativa de la cuenca de Maricunga

Fuente: elaboración propia

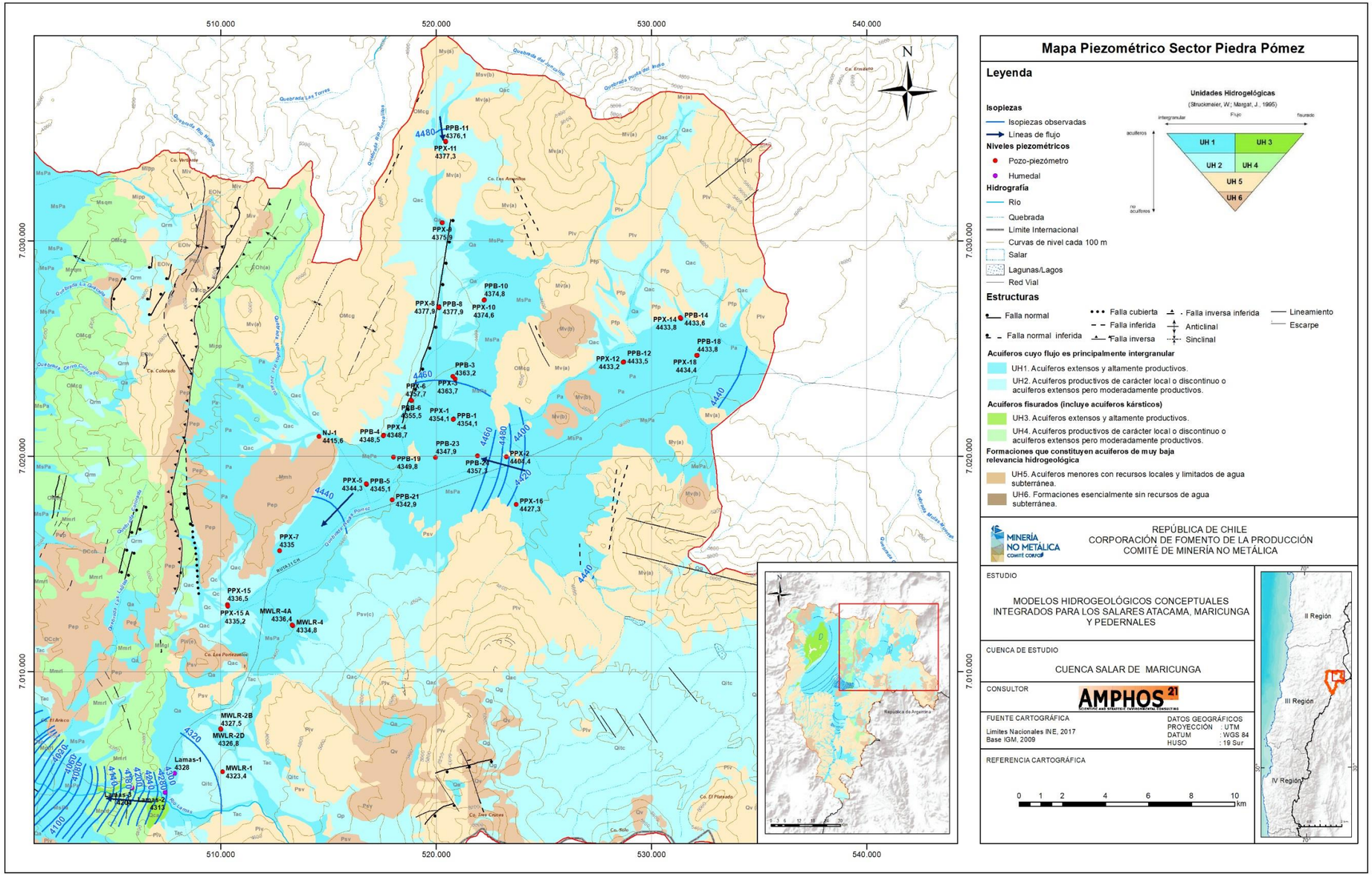


Figura 5-29: Piezometría tentativa de la cuenca de Maricunga, isopiezas cada 20 m. Sector Piedra Pómez

Fuente: elaboración propia.

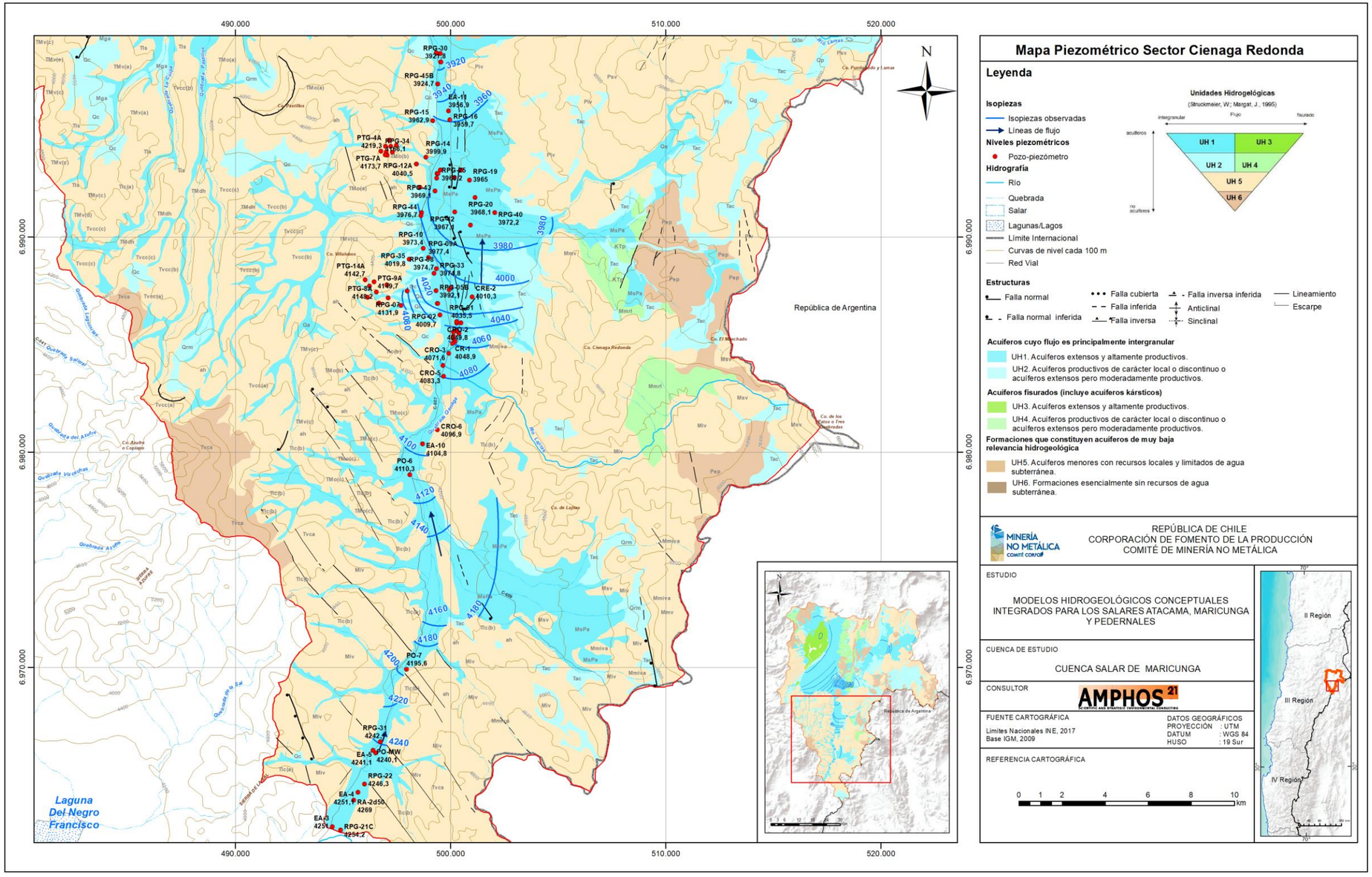


Figura 5-30. Piezometría tentativa de la cuenca de Maricunga, isopiezas cada 20 m. Sector Ciénaga Redonda.

Fuente: elaboración propia.

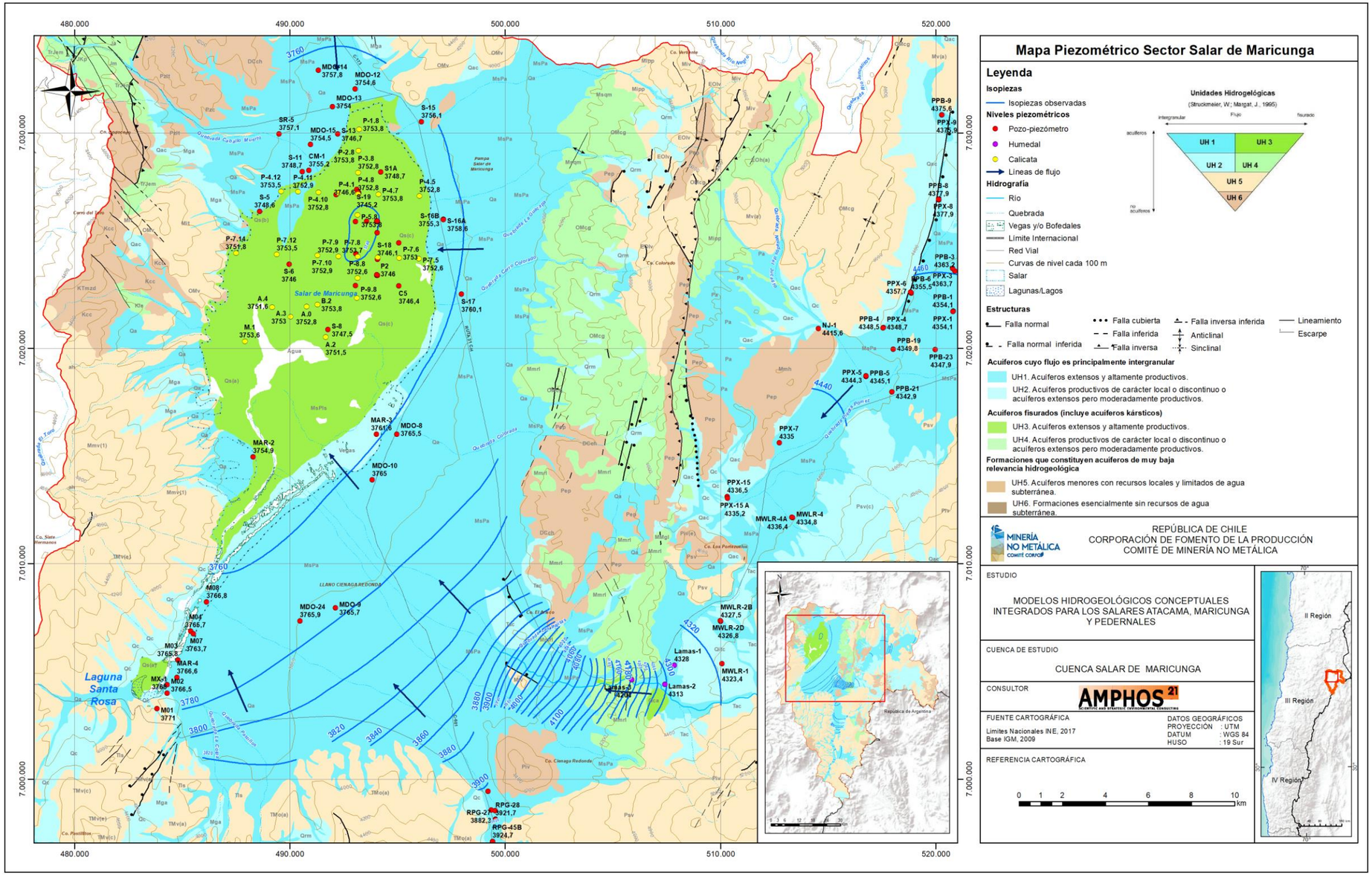


Figura 5-31. Piezometría tentativa de la cuenca de Maricunga, isopiezas cada 20 m. Sector Salar de Maricunga.

Fuente: elaboración propia.

5.4.3.2 Sector de la cuenca de Piedra Pómez

En esta zona, el acuífero (Figura 5-29) principal se encuentra formado por los materiales sedimentarios no consolidados de la UH1 y UH2, que presentan su máximo desarrollo al pie de los macizos montañosos, en los llanos de Piedra Pómez y Barrancas Blancas. Lateralmente, la cuenca se encuentra limitada hacia el sector este, por la divisoria de aguas hidrogeológica e hidrológica compartida con la cuenca de Laguna Verde y al oeste por la cordillera Claudio Gay.

Las isopiezas presentan una gran equivalencia con la topografía, ubicándose las zonas con mayor altura piezométrica en los lugares de mayor cota. La recarga se produce, fundamentalmente, por deshielo y por la lluvia que precipita a lo largo de los eventos climáticos que se producen durante el invierno altiplánico. También, se pueden producir recargas laterales en el acuífero principal, provenientes desde los sectores superiores (UH2).

El flujo discurre de NE a SW conectándose con la cuenca Salar de Maricunga y descargando las aguas subterráneas al río Lamas (probablemente debido a una zona de cambio brusco de pendiente) en la UH 4, con caudales de hasta 250-350 l/s. Posteriormente, el río Lamas alcanza el Llano de Ciénaga Redonda, formado por la UH1, donde se infiltra progresivamente la totalidad del caudal del río al acuífero. Finalmente, el flujo subterráneo se dirige hacia el sector NW descargando al propio salar.

5.4.3.3 Sector Salar de Maricunga

El sector se emplaza en la depresión que alberga al Salar de Maricunga (Figura 5-31) y se encuentra limitado al este por la cordillera de Claudio Gay y al oeste por diferentes edificios volcánicos pertenecientes a la Cordillera de Domeyko.

Las principales entradas al salar se producen desde el SE (Piedra Pómez) y desde el S (Ciénaga Redonda), además de los afloramientos que rodean al salar. Por su parte, las salidas de agua se producen en las lagunas del propio salar debido a las altas tasas de evaporación presentes en la zona, representando la mayor proporción de salida respecto a los otros dos sectores recientemente descritos.

Resulta importante destacar la zona con mayor gradiente hidráulico, localizada en el relleno fluvio-aluvial del rio Lamas, donde aflora la UH4. Aguas abajo, se produce un descenso del gradiente con el consecuente distanciamiento entre las isopiezas hasta alcanzar la zona donde se emplazan los materiales aluviales (UH1 y 2) y los depósitos salinos del Salar.

5.4.3.4 Perfiles hidrogeológicos

Con el objetivo de comprender la extensión y el comportamiento en profundidad de las Unidades Hidrogeológicas se presentan 2 perfiles hidrogeológicos esquemáticos de la zona de estudio (Figura 5-32 y Figura 5-33):

- Perfil Hidrogeológico A-A´-A´´-A´´´ (Sernageomin, 1999). Se representa una sección que atraviesa la Quebrada Caballo Muerto (noroeste del Salar), el extremo oriental del Salar de Maricunga, llano de Ciénaga Redonda y río Lamas. En esta sección es remarcable el emplazamiento de los depósitos evaporíticos actuales en el centro del corte. Estos materiales evaporíticos recientes presentan un espesor aproximado de unos 30 m y sobreyacen a los materiales salinos más antiguos compuestos de una potente capa de arcillas las que, a su vez, contienen depósitos salinos previos. Las arcillas presentan una potencia aproximada de 200 m, mientras que la capa de halita intercalada presenta grosores de unos 20 m.

  Alrededor del núcleo, se puede observar aquellos materiales que aportan, lateralmente, el agua al salar. Se tratan de depósitos aluviales cuaternarios (UH1) que rellenan el fondo de los valles. Esta unidad presenta un desarrollo máximo en el llano de Ciénaga Redonda y en la quebrada homónima, con potencias que alcanzan hasta los 150 m (pozos MDO-24, MDO-23, MDO-9). Respecto al llano quebrada Caballo Muerto, ubicado al noroeste del Salar, se estima una potencia cercana a los 50 m (pozos MDO-14, MDO-12).

  A mayor profundidad se emplazan las rocas que conforman el basamento de la zona de estudio (UH6). En el sector oeste de la sección, se distinguen los materiales que conforman la subfranja oriental de la franja metalogénica de Maricunga, representada por rocas de edad paleozoica de la UH6.

  El nivel freático alcanza una profundidad de unos 20 m en los materiales evaporíticos, aunque dependiendo de la zona, éste se puede encontrar más próximo a la superficie. En el resto de la zona representada, el nivel se encuentra a profundidades mayores siguiendo, aproximadamente, la topografía.

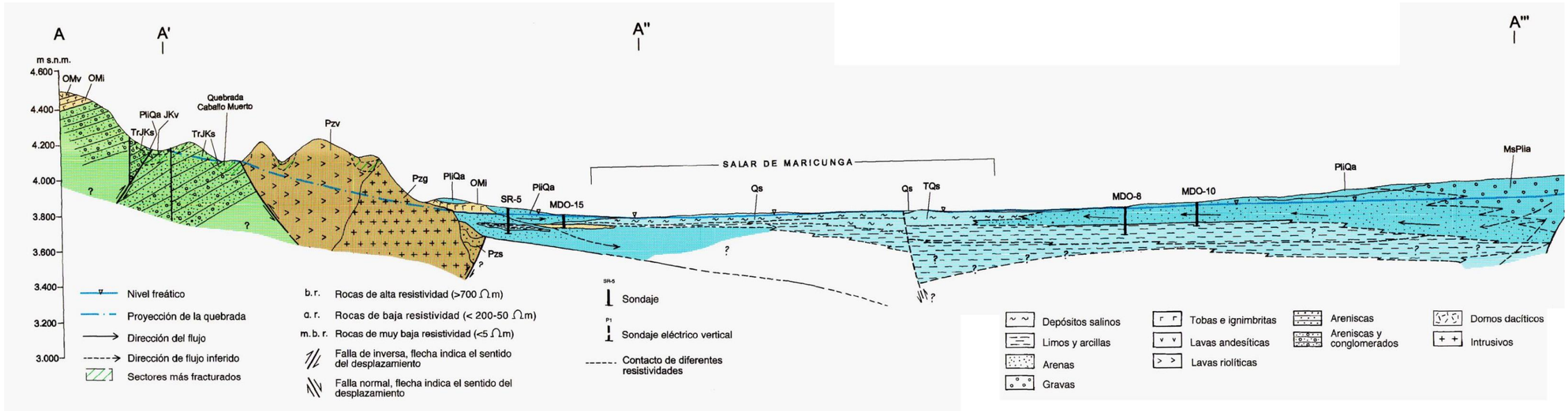


Figura 5-32. Sección hidrogeológica A-A´-A´´-A´´´.

Fuente: modificado de Sernageomin, 1999.

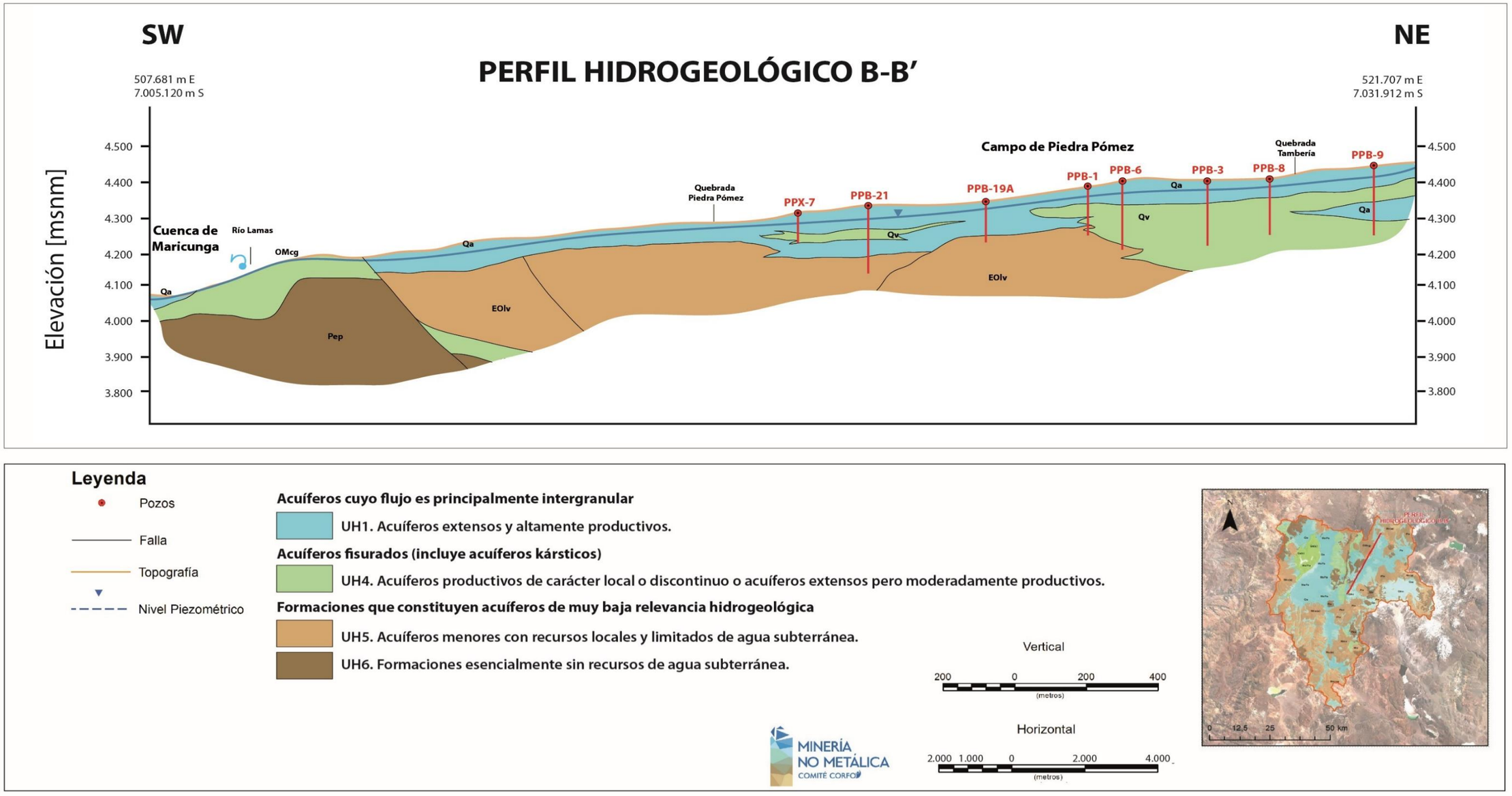


Figura 5-33: Sección hidrogeológica B-B'.

Fuente: elaboración propia.

- Perfil Hidrogeológico B-B': Esta sección cubre aproximadamente una longitud de unos 30 km y atraviesa las cuencas Piedra Pómez y Salar de Maricunga en dirección NNE a SSW.

  El nivel piezométrico se emplaza, aproximadamente, a unos 70 m de profundidad en la mayoría de los pozos. Los materiales aflorantes corresponden a depósitos aluviales que rellenan los valles de la zona. Por debajo de estos materiales detríticos, se encuentran depósitos volcánicos más antiguos conformando la UH4.

  En su drenaje subterráneo hacia el SSW, el nivel intersecta con los materiales de OMcg que conforman la UH4 en esta zona, produciéndose surgencias y vertientes por el rezume del agua (río Lamas). El substrato se encuentra formado por materiales volcánicos modernos (UH5) y, de forma local, en el oeste de la sección, por materiales paleozoicos que forman el basamento impermeable (UH6)

  Como se puede observar en el perfil hidrogeológico, existe continuidad del flujo entre las cuencas de Piedra Pómez y Salar de Maricunga.

5.5 Volumen de almacenamiento del acuífero

En base al Modelo Hidrogeológico conceptual implementado en el área de estudio se ha estimado un volumen de almacenamiento total en la cuenca Salar de Maricunga. Para calcular el volumen de agua en los espesores saturados de los acuíferos se ha utilizado la siguiente ecuación:

$$VT = \sum_{i=1}^{N} VA_i * S_i$$

Donde VT corresponde al volumen de almacenamiento total del acuífero saturado, VA_i corresponde al volumen de almacenamiento del sector acuífero saturado i y S_i corresponde al coeficiente de almacenamiento del sector acuífero saturado i.

En este caso, el acuífero de la cuenca se discretizó en dos sectores, teniendo en cuenta las zonas de acuíferos compuestos por depósitos no consolidados (con un volumen saturado igual a 135.430 Hm^3) y los acuíferos en roca fracturada (con un volumen saturado de 17.165 Hm^3) –los volúmenes se han sacado del modelo en 3D de *Leapfrog* realizado para el presente estudio-. El coeficiente de almacenamiento (Sy) se ajustó considerando los resultados de las pruebas de bombeo realizadas en el área de estudio entregando un rango que va de 0,05 a 0,1 para los depósitos no consolidados y de 0,0001 a 0,001 para la roca fracturada.

Considerando estos valores y la ecuación presentada se calculó un rango de aproximadamente **6.773 a 13.560 Hm^3** para el volumen de almacenamiento total en la cuenca Salar de Maricunga. A continuación se resumen los cálculos para el rango de volumen de almacenamiento total del acuífero saturado en la cuenca Salar de Maricunga (Tabla 5-16).

Acuíferos	Volumen (VA)	Sy		Volumen de almacenamiento (hm^3)	
	(hm^3)	Mín.	Max.	Mín.	Max.
Acuífero no consolidado	135.430	0,05	0,1	6.772	13.543
Acuífero fracturado	17.165	0,0001	0,001	1,7	17,2
Volumen total en la cuenca (VT)				**6.773,2**	**13.560,2**

Tabla 5-16. Volumen de acuífero cuenca Salar de Maricunga.

Fuente: elaboración propia.

6. Hidrogeoquímica e isótopos

6.1 Información disponible

En la caracterización hidroquímica e isotópica de la cuenca Salar de Maricunga se ha recopilado información de distintas fuentes integrándolas en una base de datos con un total de 251 puntos y 556 analíticas (Ver BBDD Hidroquímica en Anexo I). Los estudios revisados y la información disponible en cada uno de ellos, se detalla en el capítulo 2.7 y 2.8 del presente informe

6.2 Clasificación de los puntos de agua y sectorización

Debido a que los puntos de los antecedentes se han clasificado con tipologías diferentes según cada autor, en el presente estudio se han unificado los criterios de clasificación definiéndose, así, 5 tipos de puntos los que, a su vez, se desglosan en subtipos. En la Tabla 6-1 se resume la tipología propuesta y sus respectivos subtipos, mientras que en la Figura 6-1 se muestra su distribución geográfica.

Tipo de punto	Subtipo de Punto
Subterráneo	Pozo-piezómetro
	Calicata
Superficial	Río/Estero
	Laguna/Lago
Manantial/Vertiente	Manantial
Humedal	Humedal
Precipitación	Nieve

Tabla 6-1: Tipos y subtipos de punto para clasificación hidroquímica.

Fuente: elaboración propia.

Además, la cuenca de estudio se ha dividido en 5 sectores, los cuales se ilustran en la Figura 6-1. El objetivo de ello es clasificar los puntos en base a su ubicación y así poder determinar si existen variaciones hidroquímicas-isotópicas en función de las líneas de flujo e identificar zonas de mezclas. Los mencionados sectores son:

- Ciénaga Redonda: se ubica al sur de la cuenca de Maricunga. El acuífero se emplaza en depósitos no consolidados de gran espesor (~250 m) y se encuentra encajonado al fondo del valle de la Quebrada Ciénaga Redonda.
- Cordillera Claudio Gay: se localiza en el límite noreste de la cuenca de Maricunga, y se ha definido como una zona de recarga de la mencionada cuenca. Los puntos con información hidroquímica/isotópica en este sector corresponden, únicamente, a ríos y esteros ya que no existe un acuífero principal en esta zona sino, más bien, acuíferos colgados.
- Piedra Pómez: este sector se emplaza en la cuenca Piedra Pómez, al noreste de la cuenca de estudio. El acuífero principal se reconoce en la zona central y se emplaza en depósitos no consolidados y en rocas fracturadas en profundidad.
- Río Lamas – Llano de Tres Cruces: se ubica al sur del sector Cordillera Claudio Gay, y corresponde a la zona de conexión entre el acuífero emplazado en la cuenca Piedra Pómez y el acuífero ubicado en el sector del Salar de Maricunga. En esta zona el acuífero se encuentra en rocas volcánicas fracturadas y tiene como rasgo principal al río Lamas, el cual se infiltra al llegar al Llano Ciénaga Redonda.
- Salar de Maricunga: se localiza al noroeste de la cuenca y comprende el acuífero emplazado en los depósitos no consolidados de gran espesor (~450 m) en el Llano de Ciénaga Redonda, el acuífero emplazado en el mismo salar y las zonas altas de recarga ubicadas al norte y oeste del salar.

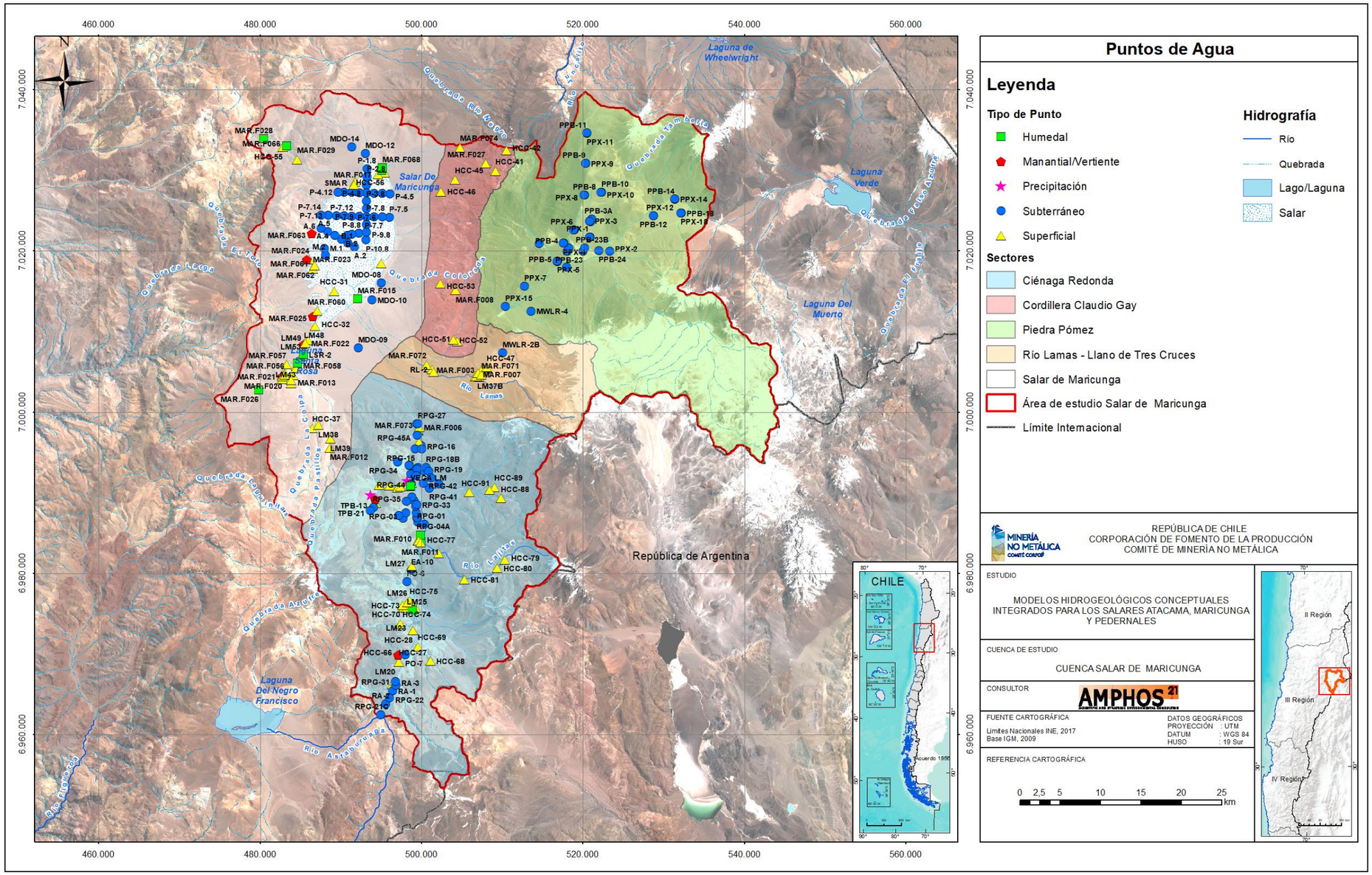


Figura 6-1: Ubicación puntos con información hidroquímica/isotópica, clasificados en base al tipo de punto y sector.

Fuente: elaboración propia.

6.3 Validación de los datos

El mecanismo utilizado para validar los datos hidroquímicos consistió en la estimación del balance iónico (BI) de cada uno de los análisis disponibles en los antecedentes. Para dicha estimación se ha aplicado la siguiente ecuación:

$$\frac{\sum cationes - \sum aniones}{\sum cationes + \sum aniones} * 100$$

Donde los cationes corresponden a las concentraciones disueltas (en meq/l) de Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+}, K^{+}, B^{3+}, Al^{3+}, Fe^{2+}, Mn^{2+}, Cu^{2+} y Zn^{2+}, y los aniones corresponden a las concentraciones disueltas (en meq/l) de SO_4^{2-}, Cl^{-}, HCO_3^{-}, CO_3^{2-}, NO_3^{-} , NO_2^{-}, F^{-}, Br^{-} y PO_4^{3-}.

En el Anexo I (03_Hidroquímica) se presenta la base de datos de todos los puntos con registro, con su respectiva analítica y balance iónico calculado. El error que se ha considerado no admisible es el que se encuentra fuera del rango -10% y 10%, correspondiente a 159 muestras, las cuales se encuentran destacadas en color verde en la base de datos (Anexo I, 03_Hidroquímica).

No obstante, debido a que en la zona de estudio algunas de las aguas se encuentran mineralizadas naturalmente, presentando altas concentraciones de elementos, especialmente en las salmueras del salar, el laboratorio debe diluir la muestra para realizar el análisis, generando una mayor probabilidad de error.

Por tal motivo, se han analizado individualmente cada una de las muestras que presentan un error de balance fuera del rango [-10%,10%], teniendo en cuenta la conductividad eléctrica y los resultados analíticos de campañas previas realizadas en el mismo punto. Con ello se han definido como admitidas 22 de las 159 muestras con BI fuera del rango, las cuales se indican en Tabla 6-2.

Nombre del punto	Tipo de punto	Fuente	Fecha muestreo	Balance iónico (%)	Estado
MAR.F013	Superficial	Proyecto Lobo Marte (2011)	04-11-2010	-10,45	No muestran variaciones significativas en comparación con otras campañas
MAR.F013	Superficial	Proyecto Lobo Marte (2011)	18-04-2010	11,68	
LM32	Superficial	Proyecto Lobo Marte (2011)	26-03-2010	13,80	
LM53	Superficial	Proyecto Lobo Marte (2011)	18-04-2010	-10,12	
LM49	Superficial	Proyecto Lobo Marte (2011)	11-05-2010	10,09	
PPB-24	Subterráneo	EDRA (1999)	14-03-1999	15,59	
LM33	Superficial	Proyecto Lobo Marte (2011)	15-02-2010	-13,95	
PPB-1	Subterráneo	EDRA (1999)	06-12-1998	10,46	
RPG-12A	Subterráneo	Proyecto Lobo Marte (2011)	08-12-2010	-19,64	
RPG-12A	Subterráneo	Proyecto Lobo Marte (2011)	28-02-2010	-11,52	
RPG-12A	Subterráneo	Proyecto Lobo Marte (2011)	05-06-2010	-10,66	
RPG-12A	Subterráneo	Proyecto Lobo Marte (2011)	11-10-2010	-12,10	
RPG-12B	Subterráneo	Proyecto Lobo Marte (2011)	08-12-2010	-18,08	
RPG-12B	Subterráneo	Proyecto Lobo Marte (2011)	09-09-2010	-18,13	
RPG-12B	Subterráneo	Proyecto Lobo Marte (2011)	28-02-2010	-10,68	
RPG-12B	Subterráneo	Proyecto Lobo Marte (2011)	05-06-2010	-10,53	
PPB-14	Subterráneo	EDRA (1999)	02-04-1998	11,45	
RPG-35	Subterráneo	Proyecto Lobo Marte (2011)	10-10-2010	10,64	
LM23	Superficial	Proyecto Lobo Marte (2011)	10-09-2010	11,30	
RPG-22	Subterráneo	Proyecto Lobo Marte (2011)	09-10-2010	11,53	
M-1	Subterráneo	Risacher et al (1999)	15-05-1995	10,34	Muestra concentraciones similares a los puntos del entorno y un error <20%
RPG-40	Subterráneo	Proyecto Lobo Marte (2011)	06-12-2010	15,73	

Tabla 6-2: Muestras con BI fuera de rango y admitidas como datos confiables.

Fuente: elaboración propia.

Cabe mencionar que existen 3 muestras que presentan un BI dentro del rango admitido; sin embargo, no contienen la analítica completa de los elementos mayoritarios por lo que se han clasificado como no admitidas. En la Tabla 6-3 se identifican los puntos mencionados, además de los parámetros mayoritarios no medidos en cada uno de ellos.

Nombre del punto	Tipo de punto	Fuente	Fecha muestreo	Balance iónico (%)	Mayoritarios medidos	Mayoritarios no medidos
HCC-55	Superficial	Sernageomin (1999)	01-01-1999	2,64	Mg, Cl, SO4	Ca, Na, K, HCO3, CO3, NO3
PPX-7	Subterráneo	Sernageomin (2006)	sin fecha	3,33		
PPB-18	Subterráneo	Sernageomin (2006)	17-03-1999	8,92	Ca, Mg, Na, K, Cl, SO4, NO3	HCO3, CO3

Tabla 6-3: Puntos con balance iónico dentro del rango establecido, pero sin información de todos sus parámetros mayoritarios.

Fuente: elaboración propia.

6.4 Parámetros físico-químicos

Las temperaturas mínimas registradas en las aguas de la zona de estudio (0°C) corresponden a muestras superficiales y humedales ubicados en las cercanías del Salar de Maricunga (Laguna Santa Rosa – MAR.F019) y a lo largo del valle de Ciénaga Redonda (LM28, LM30, LM37), tomadas durante mayo y junio (años 1995 y 2010), además de una calicata dentro del salar (P-4.5), muestreada en 1982. Cabe notar que, durante el invierno, las temperaturas descienden bajo los 0°C complicando los accesos y muchas veces imposibilitando el muestreo en la mayor parte de la cuenca.

A su vez, las temperaturas máximas registradas corresponden a los pozos ubicados en el extremo oriental de la cuenca hidrográfica Piedra Pómez (PPB-14 - 30°C y 29,1°C; PPX-18 – 27,4°C; PPB-12 – 23,7°C) muestreados durante enero y abril de 1998 y 1999; y al punto MAR.F019, ubicado en el extremo sur de la Laguna Santa Rosa, durante el mes de enero del 2010. Es notable destacar que este último punto representa, fielmente, la variación estacional de las temperaturas de aguas superficiales en la cuenca, debido a que comparte los rangos mínimos y máximos registrados.

Se observa que, en general, las temperaturas de las aguas subterráneas son más elevadas, sobre todo en el extremo oriental y norte de Piedra Pómez. En toda la cuenca de análisis las temperaturas de puntos subterráneos varían entre 3,7 y 30°C, mientras que las aguas superficiales; entre 0 y 25,2°C.No se tiene registro de manantiales termales en esta cuenca.

En cuanto al pH, los rangos varían entre 3,63 y 9,94, con un promedio de 7,7. Se observa que, a nivel macro, las aguas superficiales tienden a ser más alcalinas que las subterráneas (($\overline{X}$:7,9 y 7,4; respectivamente), mientras que los humedales y manantiales presentan pH's promedio de 8,1.

Además, existe una correlación entre las aguas más ácidas analizadas y su distribución geográfica, donde los menores valores de pH (entre 3,6 y 4,5) se distribuyen en quebradas que drenan desde las faldas del volcán Copiapó (ej. Quebrada la Coipa - puntos LM38 y HCC-37; Quebrada Villalobos – MAR.F002). Esta relación ya había sido identificada por el estudio de la DGA (2009) en donde se sugiere la influencia e interacción del agua de recarga con rocas del Complejo Volcánico Volcán Copiapó, las que presentan una fuerte alteración hidrotermal en el área. Otros puntos con valores bajos de pH, se distribuyen justo aguas abajo de los rajos Lobo-Marte (puntos RPG-12B y RPG-12A), cuyas zonas de alteración hidrotermal y mineralización están, también, estrechamente ligadas a la actividad volcánica-hidrotermal descrita.

En cuanto a los pH más básicos, existe una tendencia en su distribución, asociada a bofedales o zonas vegetacionales y en el extremo sur de la laguna Santa Rosa. Este ligero aumento del pH podría explicarse por una remoción de CO_2 como consecuencia de la actividad fotosintética y un consecuente aumento del pH.

La conductividad eléctrica (CE) depende directamente de la concentración de sólidos disueltos en el agua (TSD). Estos parámetros muestran una amplia diversidad de valores (5 a >250.000 µS/cm),

reflejando la heterogeneidad de los puntos y sectores muestreados. Los datos de conductividad más elevados se concentran en el sistema Salar de Maricunga-Laguna Santa Rosa, mientras que los valores más bajos se localizan en muestras de nieve, ríos, humedales y pozos/piezómetros ubicados en las zonas altas de la cuenca (zonas de recarga).

En la Figura 6-2 se presenta un gráfico entre la relación de la CE y el TSD, mientras que en la Figura 6-3; la distribución espacial de conductividad. Para la construcción del gráfico se calcularon las conductividades de aquellos puntos que no contaran con estos valores, pero sí de TSD o viceversa, utilizando la relación TDS = 0,62*CE. Este factor (0,62) fue deducido a partir de graficar aquellas muestras que sí contaran con ambos valores y calculando una línea de tendencia. En el estudio de la DGA (2009) se realizó un ejercicio similar, pero con un factor de 0,64.

Del análisis se desprende que las muestras ubicadas en el sector Ciénaga Redonda, Cordillera de Claudio Gay y Piedra Pómez (ver sectores en Figura 6-1) poseen las menores conductividades. Por otro lado, los mayores valores de CE se distribuyen en el curso inferior del Río Lamas y en el mismo Salar de Maricunga.

Cabe notar que existe una zona de alta conductividad (hasta 12.600 µS/cm) en una quebrada al poniente de la Vega Pantanillo Ancho (sector Ciénaga Redonda; muestras HCC-72, HCC-73, HCC-75, LM25, HCC, 71, H-26) y al sur de la misma vega (muestras HCC-28 y LM23). Estos valores anómalos en relación a su entorno se asocian, probablemente, a aguas estancadas (pequeñas lagunas superficiales) que han sufrido procesos de evaporación pudiendo no ser muy representativas del sector.

En base al comportamiento de la CE, es posible sugerir líneas de flujo, en donde las aguas (superficiales y subterráneas) se van enriqueciendo en sales desde el sur de la cuenca, partiendo con aguas dulces en Pampa Pantanillo, las que se van haciendo salobres a medida que avanzan por la Quebrada Ciénaga Redonda hacia el llano homónimo y terminando como salmueras en la zona del Salar. También, es posible diferenciar un aporte diluido desde la Cordillera de Claudio Gay hacia el Salar, el que drena en dirección NO-SE y E-O.

Adicionalmente, las muestras ubicadas en el sector Piedra Pómez (sólo puntos subterráneos) presentan conductividades bajas (<4.000 µS/cm).

Finalmente, cabe destacar que la parte superior del Río Lamas presenta aguas diluidas, las que se van salinizando progresivamente en un tramo de casi 9 km antes de infiltrarse en el Llano de Ciénaga Redonda.

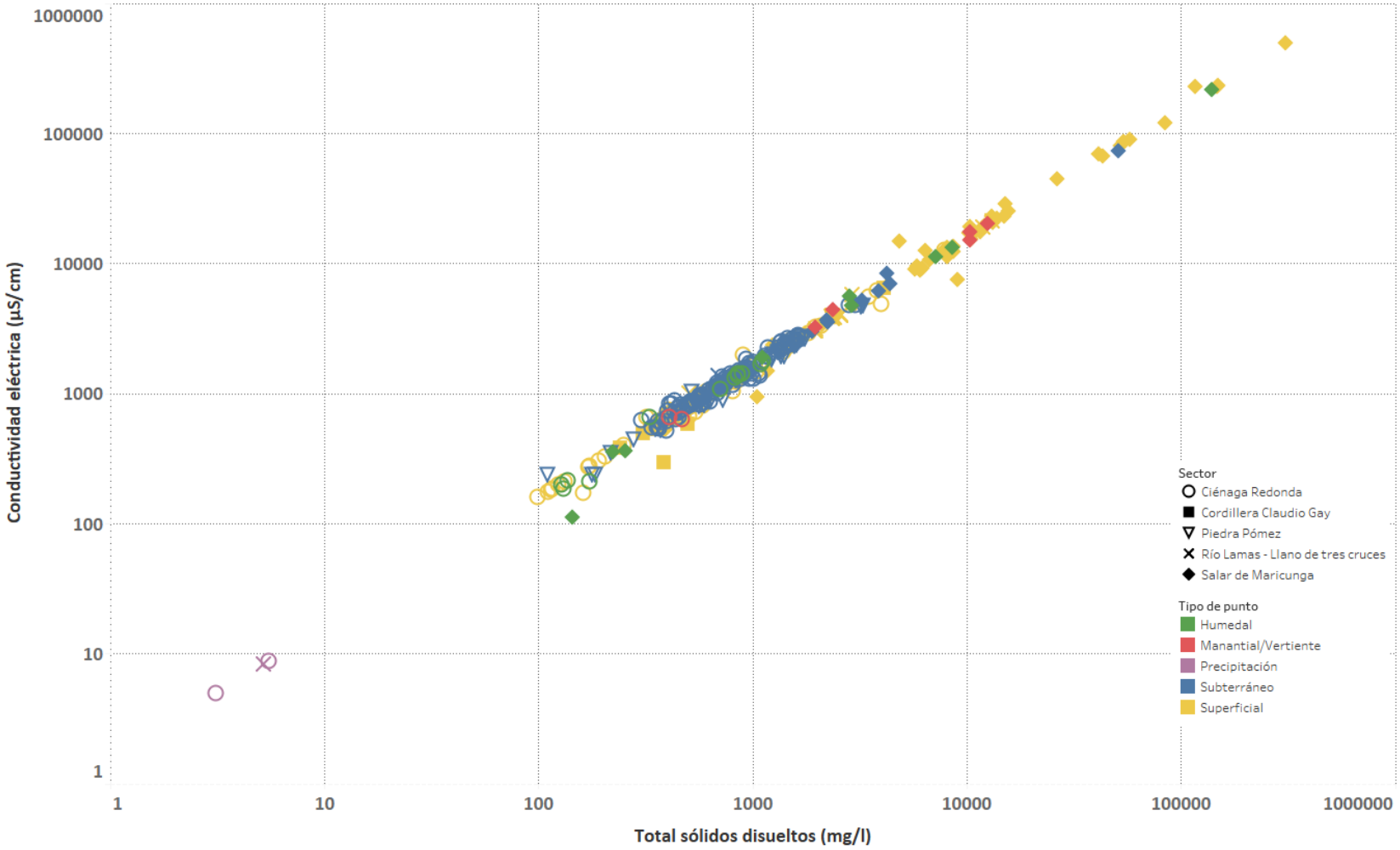


Figura 6-2: Relación entre la CE y TDS.

Fuente: elaboración propia.

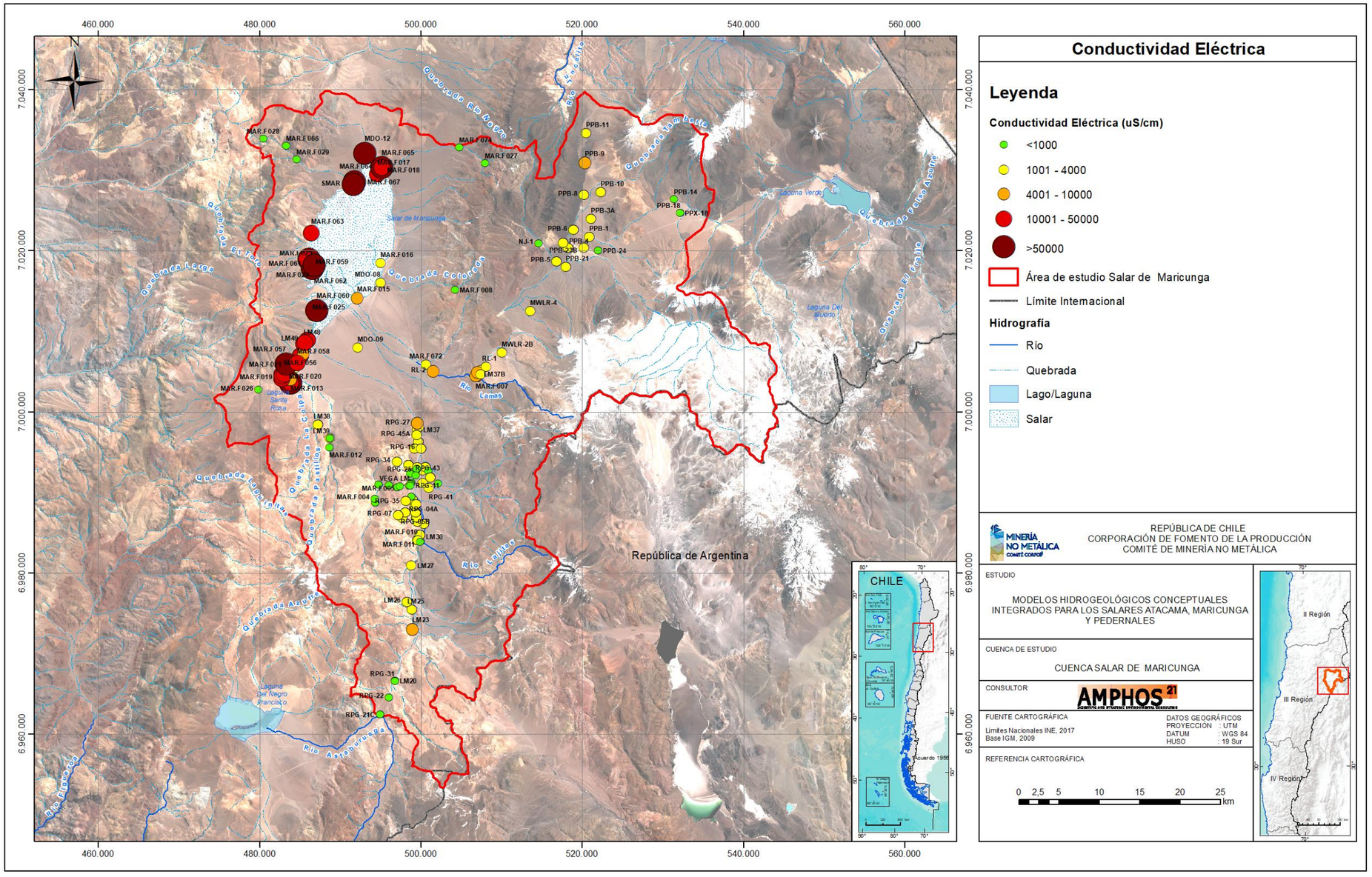


Figura 6-3: Distribución espacial de la conductividad eléctrica.

Fuente: elaboración propia.

6.5 Componentes mayoritarios y facies

A continuación, se presentan las facies hidroquímicas de las aguas en la zona de estudio, las cuales se han definido en base a las concentraciones de sus parámetros mayoritarios. La manera gráfica de observar esto es a través del diagrama Piper, el cual permite determinar las facies hidroquímicas de las aguas mediante la distribución de concentraciones relativas de los cationes mayoritarios disueltos (Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+}, y $K^{+)}$ y los aniones mayoritarios disueltos Cl^{-}, HCO_3^{-}, CO_3^{2-}, SO_4^{2-} y NO_3, ambas en [meq/l]. Se incluyen los valores de CO_3^{2-} y NO_3 debido a que el primero forma parte de la alcalinidad en muestras con pH's mayores a 8,3 y debido a que el nitrato se encuentra comúnmente en las salmueras.

Cabe mencionar que los datos utilizados poseen un rango de fechas desde 1982 hasta el 2016, representando un amplio espectro temporal de varias de las muestras que poseen más de una analítica. En los siguientes párrafos, se pretende caracterizar el tipo aguas según su distribución espacial, por lo que se incluyeron todas las analíticas disponibles sin adentrarse en evoluciones temporales.

En la Figura 6-4 se muestra el diagrama de Piper para todas las aguas de la cuenca, clasificadas en función de la tipología de punto. En éste se observa una composición heterogénea asociada, probablemente, a diversos procesos ocurridos a lo largo de las distintas líneas de flujo (ej. precipitación, disolución, mezcla de aguas, evaporación) y diferentes orígenes de la fuente.

Si se analiza el diagrama en función del tipo de punto, se observa que tanto las aguas subterráneas como los humedales poseen una composición, esencialmente, sulfatada-clorurada cálcica-sódica. Sin embargo, existen algunas muestras de composición bicarbonatada.

Por su parte, las aguas superficiales son, en su mayoría, de tipo cloruradas-sulfatadas sódicas, con tendencia a una composición más cálcica, similar a la composición de las aguas de manantiales/vertientes.

Con el objetivo de identificar si las variaciones de composición y origen de cada tipo de punto están asociadas a la distribución espacial de la muestra, se ha realizado un diagrama de Piper para cada sector de estudio, los cuales se describen a continuación.

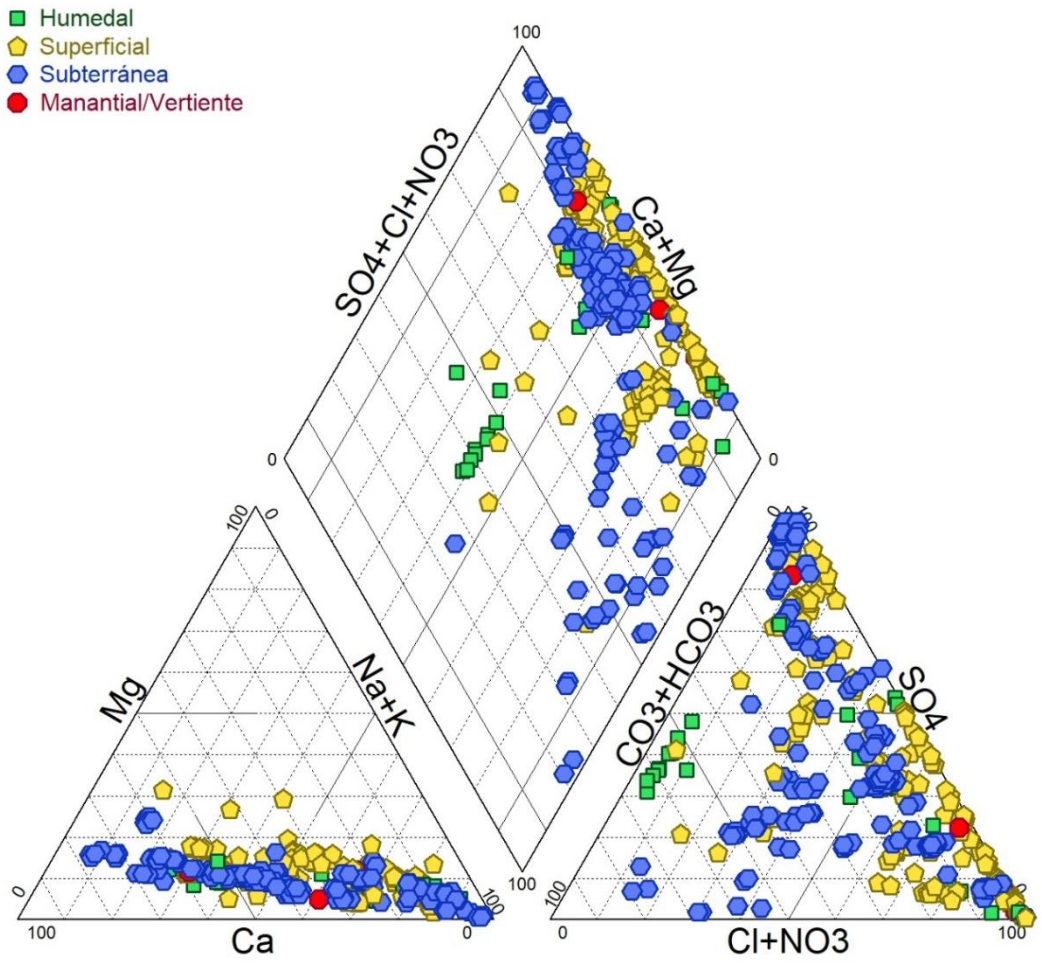


Figura 6-4: Diagrama de Piper de las aguas emplazadas en la cuenca Salar de Maricunga.

Fuente: elaboración propia.

6.5.1 Sector Ciénaga Redonda

En la Figura 6-5 se muestra el diagrama de Piper para las aguas del sector Ciénaga Redonda clasificadas en función del tipo de punto.

Se observa que las aguas subterráneas y superficiales poseen composiciones heterogéneas, las cuales varían entre sulfatada cálcica a clorurada sódica.

De igual manera, el tipo de aguas en humedales difieren unas de otras dependiendo de su ubicación, encontrando composiciones bicarbonatadas-sulfatas-cloruradas sódicas-cálcicas. A modo de ejemplo, las aguas del humedal ubicado en el Río Lajitas o Barros Negros (LM-29), ubicada en la ladera oriental del valle Ciénaga Redonda, son bicarbonatadas cálcicas-sódicas, mientras que las del humedal Vega

LM, ubicada en la ladera oeste del valle son de tipo sulfatadas cálcicas-sódicas. Una explicación posible sería que las vegas ubicadas en la vertiente occidental estarían influenciadas por la interacción de las aguas de recarga con rocas intensamente alteradas hidrotermalmente, las que a su vez están relacionadas, genéticamente, al volcán Copiapó. A su vez, las vegas de la vertiente oriental presentan una composición bicarbonatada cálcica-sódica similar a las aguas de recarga.

En cuanto a la composición de las aguas de manantiales/vertientes, se cuenta con información de una única muestra, tomada en el punto MAR.F004, ubicado en la parte alta de Quebrada Villalobos, la cual posee una composición sulfatada cálcica. Se sugiere la misma influencia de la alteración hidrotermal en la composición de esta muestra.

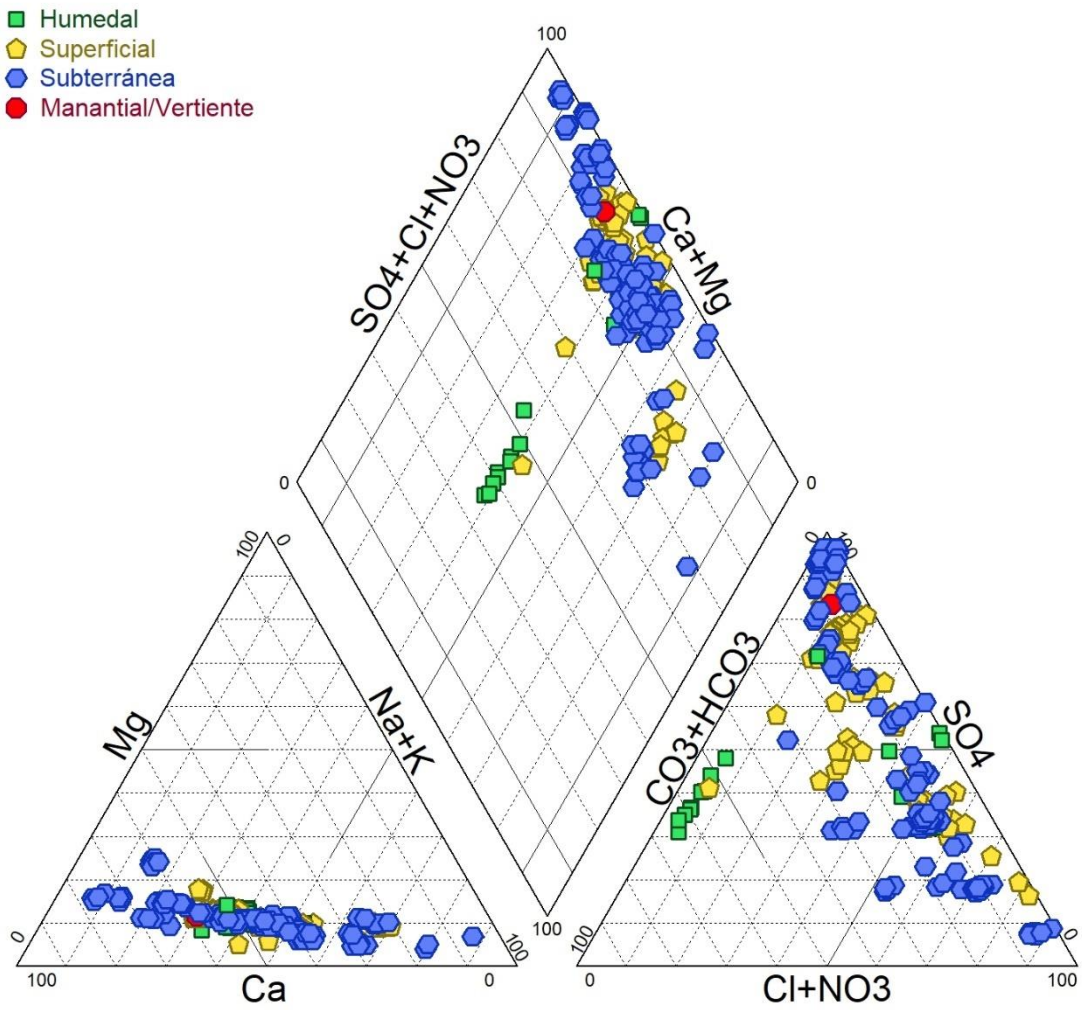


Figura 6-5: Diagrama de Piper de las aguas emplazadas en el sector Ciénaga Redonda.

Fuente: elaboración propia.

6.5.2 Sector Cordillera Claudio Gay

Para el sector Cordillera Claudio Gay se ha realizado el diagrama de Piper de la Figura **6-6**, en la cual se ilustra la concentración relativa de los parámetros mayoritarios de 3 puntos de agua superficial. En ella se observa que las aguas de dicho sector tienen tendencia al tipo bicarbonatadas sódicas, sugiriendo una similitud con aguas-lluvia de las zonas recarga.

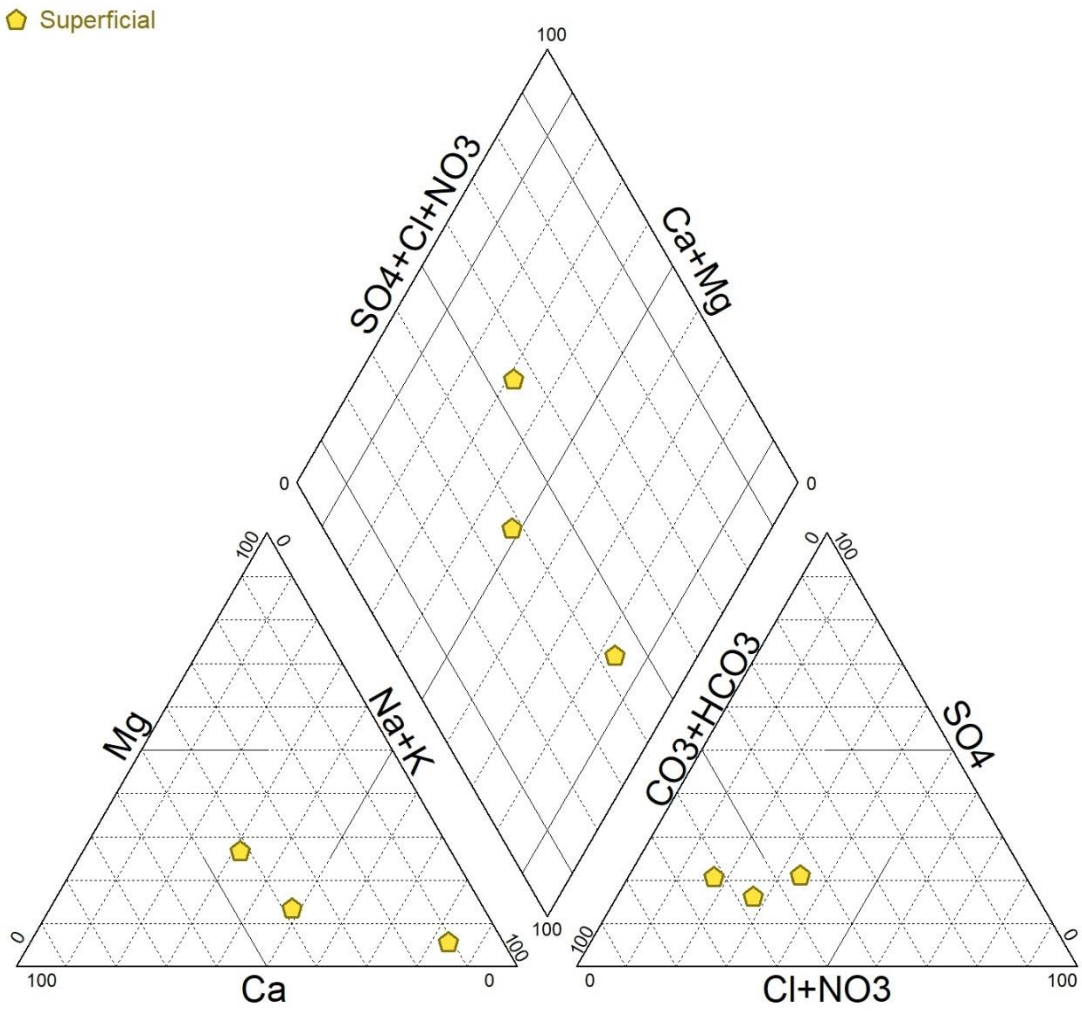


Figura 6-6: Diagrama de Piper de las aguas emplazadas en el sector Cordillera Claudio Gay.

Fuente: elaboración propia.

6.5.3 Sector Piedra Pómez

En la Figura 6-7 se presenta el diagrama de Piper de las aguas subterráneas emplazadas en el sector Piedra Pómez.

En ésta se observa que la composición de las aguas subterráneas es principalmente bicarbonatada sódica con tendencia a sulfatada sódica. Cabe notar que existe una relación entra la ubicación de los puntos, las zonas de recarga y la composición de las aguas.

Aquellos puntos ubicados en Pampa de Barrancas Blancas (PPX-14, PPX-18, PPX-12), al noreste de la cuenca hidrográfica, son del tipo sulfatados sódicos. Estos reciben aportes desde el cerro Peñas Blancas por el norte y desde los cerros de Barrancas Blancas por el sur. Cabe notar que los pozos de este sector poseen las mayores temperaturas registradas en la cuenca (hasta 30°C), por lo que la componente sulfatada podría indicar algún aporte geotermal profundo de H_2S.

Por otro lado, las aguas de los puntos ubicados aguas arriba de la Quebrada Piedra Pómez (PPB-11, PPB-9, PPB-8) son bicarbonatadas sódica, mientras que los puntos que reciben aportes desde Quebrada Nevados de Juncalito (NJ-1, PPB-5, PPX-4) son del tipo bicarbonatados cálcico-sódicos. A su vez, en las zonas intermedia y baja de la cuenca hidrográfica (sector Campo de Piedra Pómez), las composiciones de las aguas son bicarbonatadas-sulfatadas sódicas, evidenciando mezcla de aguas con recargas de diferentes zonas.

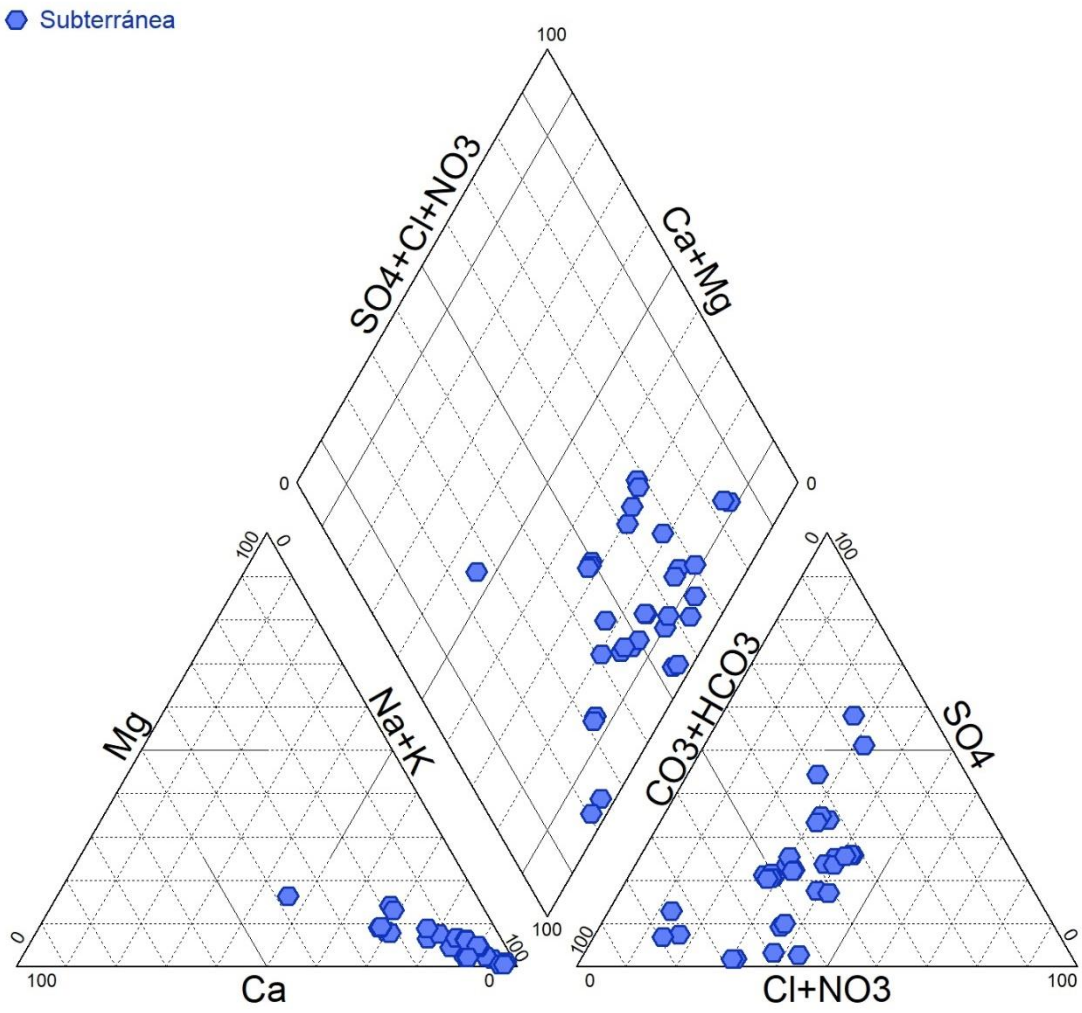


Figura 6-7: Diagrama de Piper de las aguas emplazadas en el sector Piedra Pómez.

Fuente: elaboración propia.

6.5.4 Sector Río Lamas – Llano de Tres Cruces

En la Figura 6-8 se presenta el diagrama de Piper del sector Río Lamas y Llano de Tres Cruces, con el cual se ha identificado que las aguas superficiales en este sector son, principalmente, cloruradas

sódicas. Excepción de ello es el punto RL-1, el cual presenta una concentración relativa de cloruro menor y una concentración relativa de sulfato y bicarbonato mayor al resto de las aguas superficiales.

En cuanto a la composición de las aguas subterráneas, se posee información de un punto (MWLR-2B), el cual presenta una facies bicarbonatada sódica con tendencia al ion cloruro.

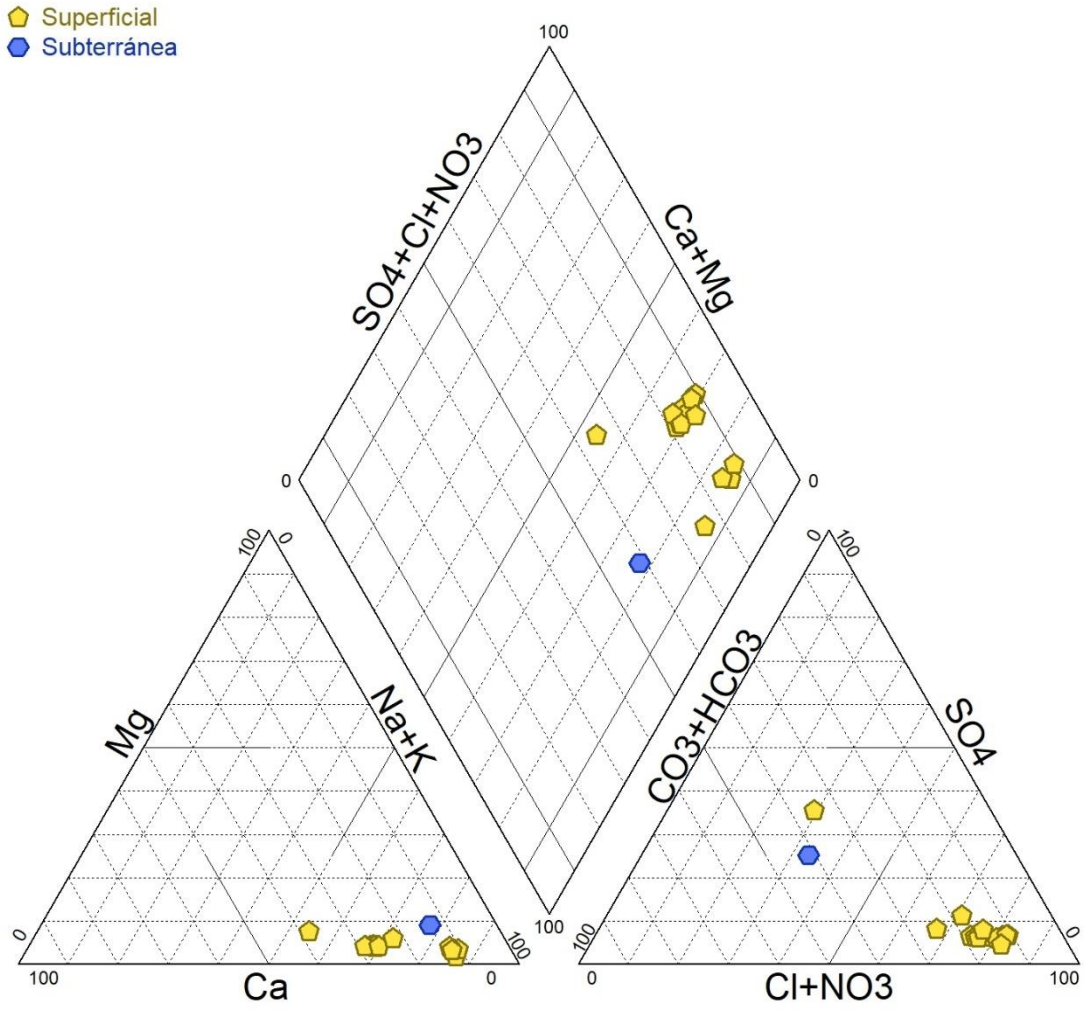


Figura 6-8: Diagrama de Piper de las aguas emplazadas en el sector Río Lamas - Llano de Tres Cruces.

Fuente: elaboración propia.

6.5.5 Sector Salar de Maricunga

En la Figura 6-9 se representa, mediante un diagrama de Piper, la concentración relativa de los parámetros mayoritarios en las aguas del sector Salar de Maricunga, clasificadas en función del tipo de

punto. En ella se observa que las aguas subterráneas emplazadas en el entorno del salar y los manantiales/vertientes ubicados al suroeste del salar, presentan una composición clorurada sódica.

Por su parte, los humedales del sector presentan composiciones variables dependiendo de su ubicación. Aquellos ubicados en las zonas altas de recarga, hacia la Cordillera de Domeyko (MAR.F028 y MAR.F026), presentan composiciones bicarbonatadas cálcicas, mientras que los humedales ubicados en las cercanías del salar presentan composiciones cloruradas sódicas.

Por último, las composiciones de las aguas superficiales son, esencialmente, cloruradas sódicas. Destacan algunas muestras con facies diferentes; entre ellas, el punto LM38. Esta se encuentra ubicada aguas abajo del volcán Copiapó, en el curso superior de la Quebrada La Coipa y sus aguas son del tipo sulfatada cálcica. Además, presenta un pH ácido (complementar con el capítulo 6.4), lo que sugiere un origen distinto al resto al interactuar con las rocas intensamente alteraras de este complejo volcánico. Otra muestra que destaca es la tomada en el punto MAR.F066, ubicada en la Cordillera de Domeyko, al noroeste del salar, en la Quebrada Caballo Muerto, la cual presenta una concentración relativa de bicarbonato mayor.

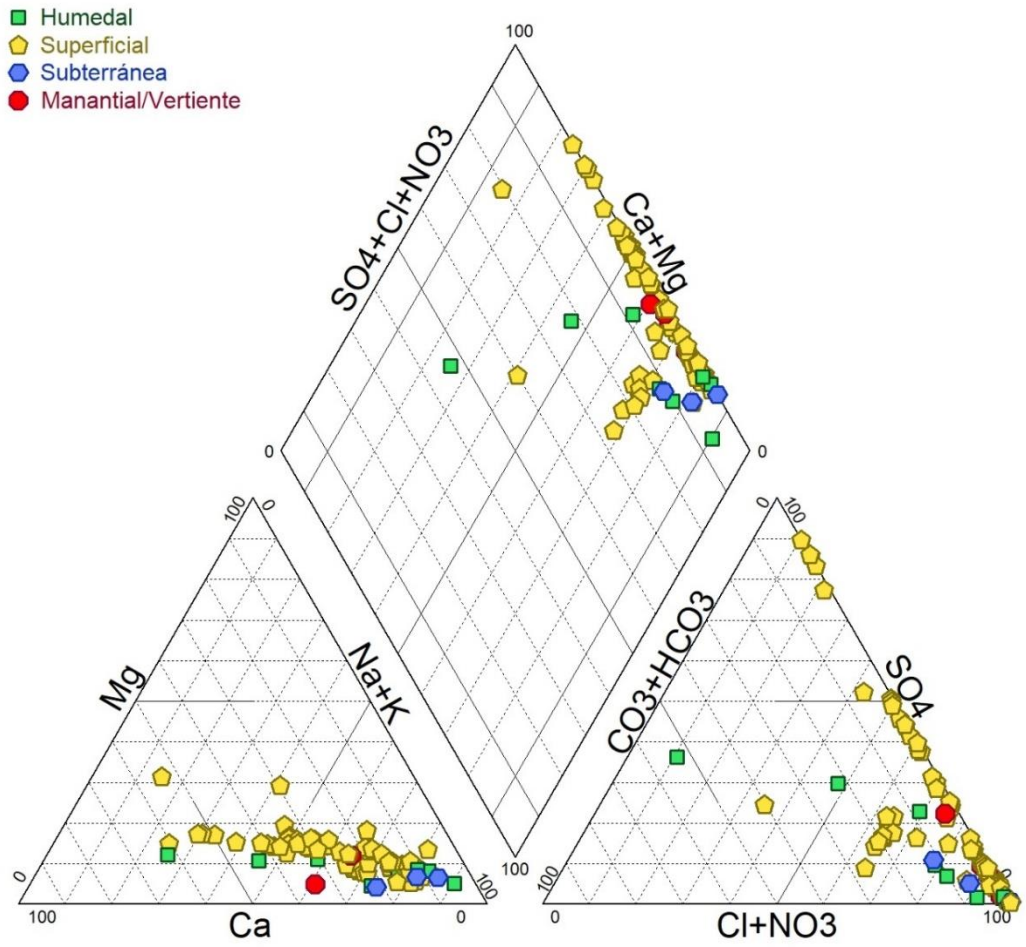


Figura 6-9: Diagrama de Piper de las aguas emplazadas en el sector Salar de Maricunga.

Fuente: elaboración propia.

6.6 Relaciones iónicas

Las relaciones iónicas en estudios hidroquímicos se utilizan para identificar reacciones que se han producido en las aguas, las cuales pueden generarse por mezclas o interacción agua-roca. Para el caso del área de estudio se utilizarán las relaciones iónicas que puedan aportar información sobre los posibles procesos de disolución-precipitación y de intercambio iónico, además de la posible relación entre direcciones de flujo y la variación en la concentración de ciertos elementos.

6.6.1 rNa/rCl

Esta relación es utilizada para determinar si las concentraciones de sodio (Na) y cloruro (Cl) provienen de la disolución de sales como la halita (NaCl). De forma específica, si al graficar las concentraciones (en meq/l) de ambos elementos las aguas se encuentran sobre la recta 1:1, significa que los principales aportes de sodio y cloruro provienen de la disolución de halita. En caso contrario, el aporte proviene de otro proceso, tales como intercambio catiónico y mezclas de agua, entre otros.

En la Figura 6-10 se ilustra la relación rNa/rCl para las aguas de la zona de estudio, clasificadas en función de su ubicación y tipología.

En ella se observa que las aguas del sector Ciénaga Redonda poseen concentraciones de Na y Cl bajas a moderadas, en comparación a las aguas de otros sectores. Además, las aguas distribuidas en el sector sur y oeste de la Quebrada Ciénaga Redonda, poseen una concentración de Na mayor a la de Cl, mientras que las aguas del sector nor-oriente poseen una relación rNa/rCl cercana a 1, pero con una concentración de Cl mayor a la de Na. Por lo tanto, en el sector Ciénaga Redonda, es posible sugerir que los mayores aportes de sodio y de cloruro no provienen de la disolución de halita.

Por su parte, en el sector Cordillera Claudio Gay y en el sector Piedra Pómez, las aguas muestran concentraciones bajas de Na y de Cl y una relación rNa/rCl mayor a 1. Esta observación indica que las concentraciones de estos elementos no provienen de la disolución de sales como halita y que existe otra fuente que aporta sodio a las aguas.

Por último, se observa que en los puntos localizados en el sector Río Lamas y Llano de Tres Cruces y en las zonas más altas del sector Salar de Maricunga, tanto al noroeste (Quebrada Caballo Muerto) como al sur (Quebrada Pastillos y Quebrada La Coipa), las concentraciones de Na y Cl son bajas a moderadas y poseen una relación mayor a 1. Los puntos que se encuentran en la zona intermedia y baja del sector Salar de Maricunga, en el entorno del mismo salar, poseen concentraciones altas de ambos parámetros y una relación levemente inferior a 1, apuntando que sí existe disolución de halita.

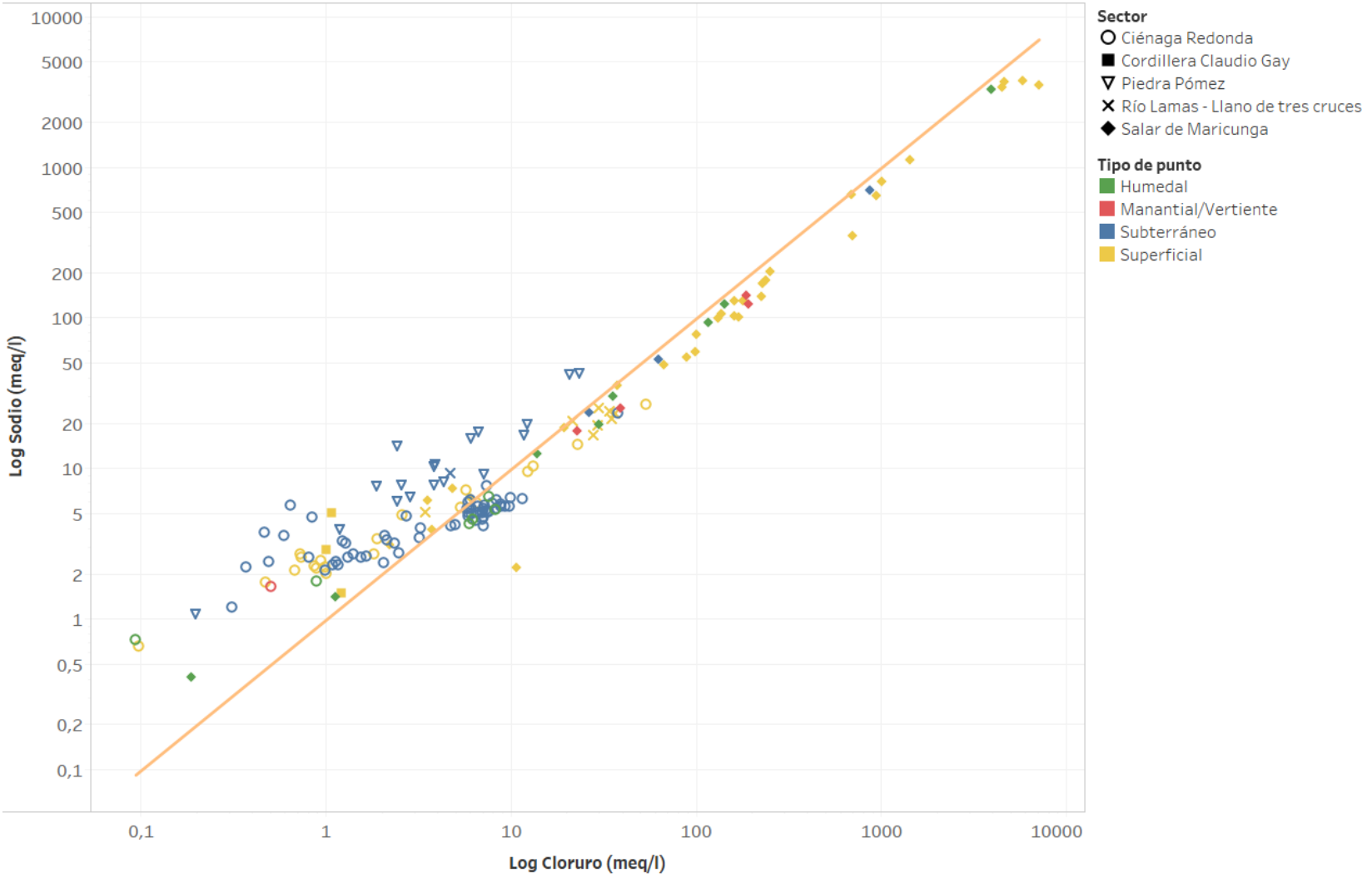


Figura 6-10: Relación iónica Sodio v/s Cloruro.

Fuente: elaboración propia.

6.6.2 rCa/rSO$_4$

La relación rCa/rSO4 se utiliza para determinar si los aportes de calcio y de sulfato provienen de la disolución de sulfatos de calcio, tal como el yeso.

En la Figura 6-12 se presenta la relación para los puntos emplazados en la zona de estudio. En ella se observa que, en general, las aguas no poseen una relación cercana a 1 y, por lo tanto, el principal aporte de Ca y de SO_4 no proviene de la disolución de yeso. Además, las concentraciones de ambos elementos son moderadas y no muestran ninguna tendencia (puntos con relación <1 y otras con relación >1), a excepción de las aguas del sector Salar de Maricunga.

En el sector Salar de Maricunga, las concentraciones de ambos parámetros son heterogéneas, algunos puntos muestran concentraciones similares a lo observado en los demás sectores de la zona de estudio, mientras que otros muestran concentraciones mayores. Sin embargo, en general, las aguas en este sector presentan una relación rCa/rSO_4 > 1, correspondiente a un exceso de calcio en relación al sulfato, por lo que podrían estar sucediendo algunos de los siguientes procesos:

- mezcla de aguas con alto contenido de calcio;
- intercambio iónico;
- disolución de carbonatos de calcio (se descarta en la siguiente sección), o
- sobresaturación de yeso, y una posterior evolución cálcica de las aguas.

El último de los procesos mencionados corresponde a un efecto típico de zonas de salares, en los cuales es común alcanzar la sobresaturación de yeso, el cual precipita bajo ciertas condiciones termodinámicas. Para ello se debe cumplir que el producto de las actividades sea constante e igual al producto de solubilidad del yeso (Risacher et al., 1999). Bajo esta condición, las concentraciones de calcio y sulfatos se vuelven inversamente proporcionales. La Figura 6-11 muestra un ejemplo de una relación rCa/rSO_4, en la cual los puntos con concentraciones de calcio y sulfatos inferiores a 2 meq/l muestran una relación cercana a 1 sugiriendo que el principal aporte de estos elementos se genera por la disolución de yeso. Al alcanzar la sobresaturación y consecuente precipitación de yeso, las concentraciones se vuelven inversamente proporcionales, pudiendo seguir dos tendencias o vías evolutivas: una sulfatada y otra cálcica.

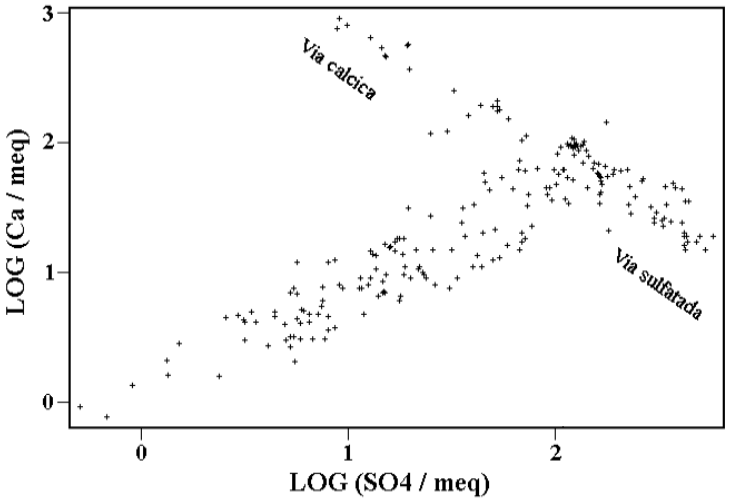


Figura 6-11: Ejemplo de relación rCa/rSO_4 con vías evolutivas (sulfatada y cálcica).

Fuente: Risacher et al. (1999).

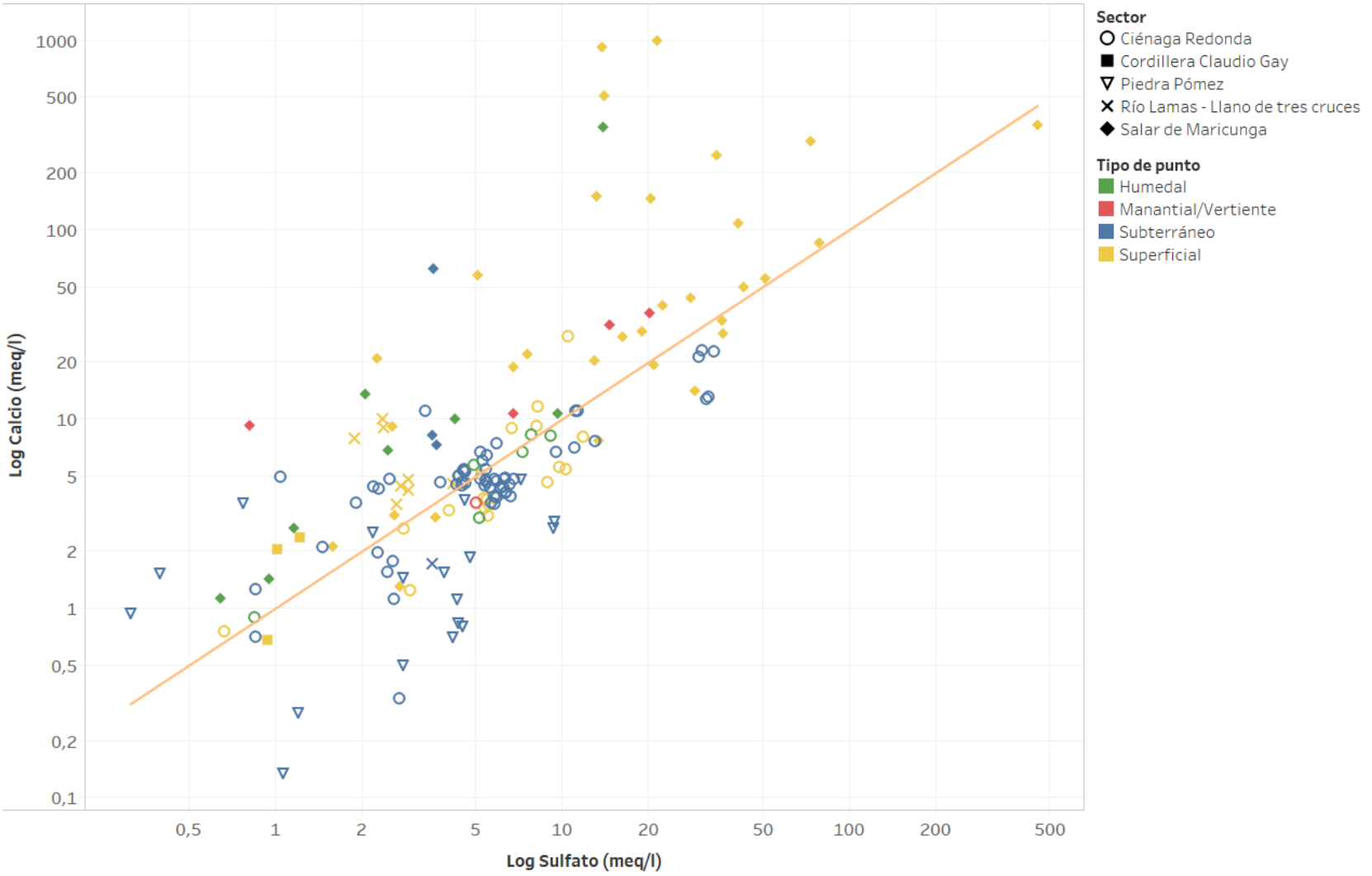


Figura 6-12: Relación iónica Calcio v/s Sulfato.

Fuente: elaboración propia.

6.6.3 rCa/rHCO3

La relación $rCa/rHCO_3$ cercana a 1 indica que el principal aporte de calcio y de bicarbonato proviene de la disolución de carbonatos de calcio como la calcita.

En la Figura 6-13 se presenta esta relación para las aguas de la zona de estudio, clasificadas en función del tipo de punto y su ubicación.

Se observa que las aguas subterráneas del sector Piedra Pómez y las aguas superficiales del sector Cordillera Claudio Gay presentan concentraciones moderadas de ambos parámetros y una relación $rCa/rHCO_3 < 1$, indicando una mayor concentración de bicarbonato en comparación con la de calcio. Por lo tanto, en ambos sectores el aporte de bicarbonato no estaría asociado a disolución de carbonatos de calcio sino que, probablemente, a aportes de aguas de precipitación, las cuales son bicarbonatadas.

En el sector de Río Lamas y Llano de Tres Cruces, específicamente en las aguas del Río Lamas, las concentraciones son moderadas y la relación se encuentra en torno a 1.

Por último, en los sectores Ciénaga Redonda y Salar de Maricunga, las concentraciones de calcio son moderadas a altas, respectivamente, mientras que las concentraciones bicarbonato son bajas a moderadas en ambos sectores. La relación $rCa/rHCO_3$ es mayor a 1, representando el exceso de calcio por sobre el bicarbonato. A partir de esta observación se puede decir que el principal aporte de estos parámetros no se debe a disolución de calcita. Los posibles procesos que podrían estar aportando el calcio, principalmente, en la zona del salar son:

- disolución de sulfato (descartado en la sección anterior);
- mezcla con aguas cálcicas;
- intercambio iónico; o
- sobresaturación de yeso, y una posterior evolución cálcica de las aguas.

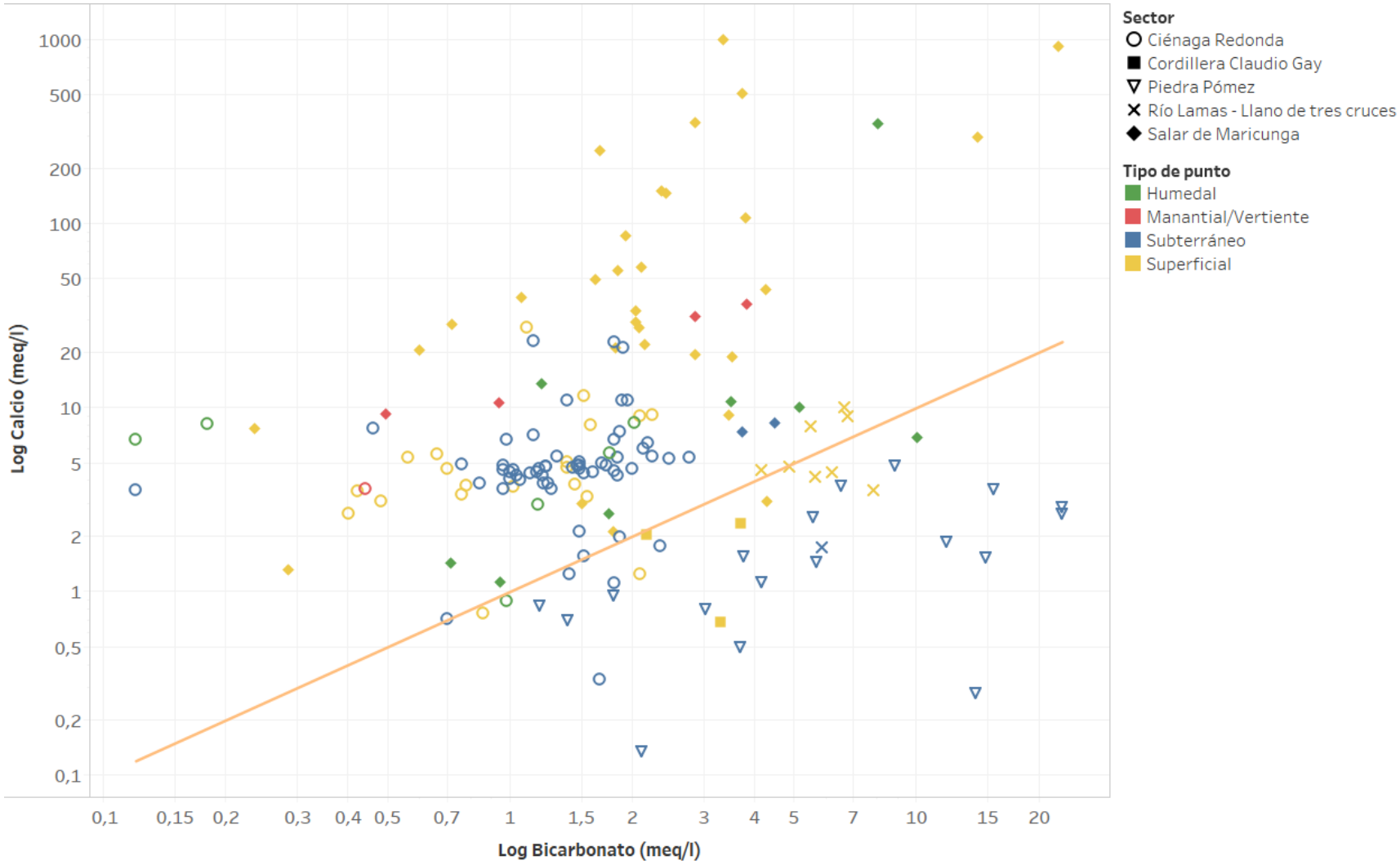


Figura 6-13: Relación iónica Calcio v/s Bicarbonato.

Fuente: elaboración propia.

6.7 Parámetros representativos de salares

En la presente sección se caracterizan los parámetros más representativos de los salares andinos, debido a que en la zona de estudio se emplaza el Salar de Maricunga. Los parámetros a estudiar son cuatro: Boro (B); Litio (Li); Magnesio (Mg) y Potasio (K), a los cuales se les analizará la evolución temporal y espacial de sus concentraciones disueltas en las aguas.

6.7.1 Evolución temporal

Para la caracterización de la evolución temporal de las concentraciones de los parámetros B, Li, Mg y K en las aguas, se han escogido los puntos que presentan al menos 4 registros establecidos como admitidos (consultar sección 6.3), sumando un total de 39 puntos. Seis (6) de ellos corresponden a puntos de agua superficial ubicados en el sector Salar de Maricunga; uno (1) a un punto de agua superficial en el sector Río Lamas y Llano de Tres Cruces; y treinta y tres (33) a puntos de agua de tipo subterráneo, superficial y humedal emplazados en el sector Ciénaga Redonda.

A continuación, se analizan las posibles variaciones de concentración en las aguas a lo largo del tiempo para cada uno de los sectores mencionados.

a) Sector Salar de Maricunga

En la Figura 6-14 se ilustra la evolución temporal de las aguas superficiales en el sector Salar de Maricunga. En ella, se observa que las aguas no presentan variaciones significativas en sus concentraciones de B, K, Mg y Li. Sin embargo, existen fluctuaciones estacionales asociados a procesos de concentración de las aguas en verano, probablemente, asociado a la evaporación en lámina libre, y a procesos de dilución de las aguas en invierno por aumento de las precipitaciones, y en primavera por los eventos de deshielo.

b) Sector Río Lamas y Llano de Tres Cruces

En este sector se cuenta, únicamente, con un punto que posee más de 4 registros definidos como admitidos. Dicho punto es el denominado LM37B, correspondiente a las aguas de Río Lamas y, por lo tanto, clasificado como agua superficial.

En la Figura 6-15 se ilustra el gráfico con la evolución temporal de las concentraciones disueltas de B, Li, K y Mg con el cual es posible observar que las aguas no muestran variaciones significativas de dichos parámetros. Las fluctuaciones observadas, posiblemente, se deben a efectos estacionales de concentración de las aguas por evaporación en meses estivales y de dilución por los eventos de precipitación y de deshielo en invierno y primavera.

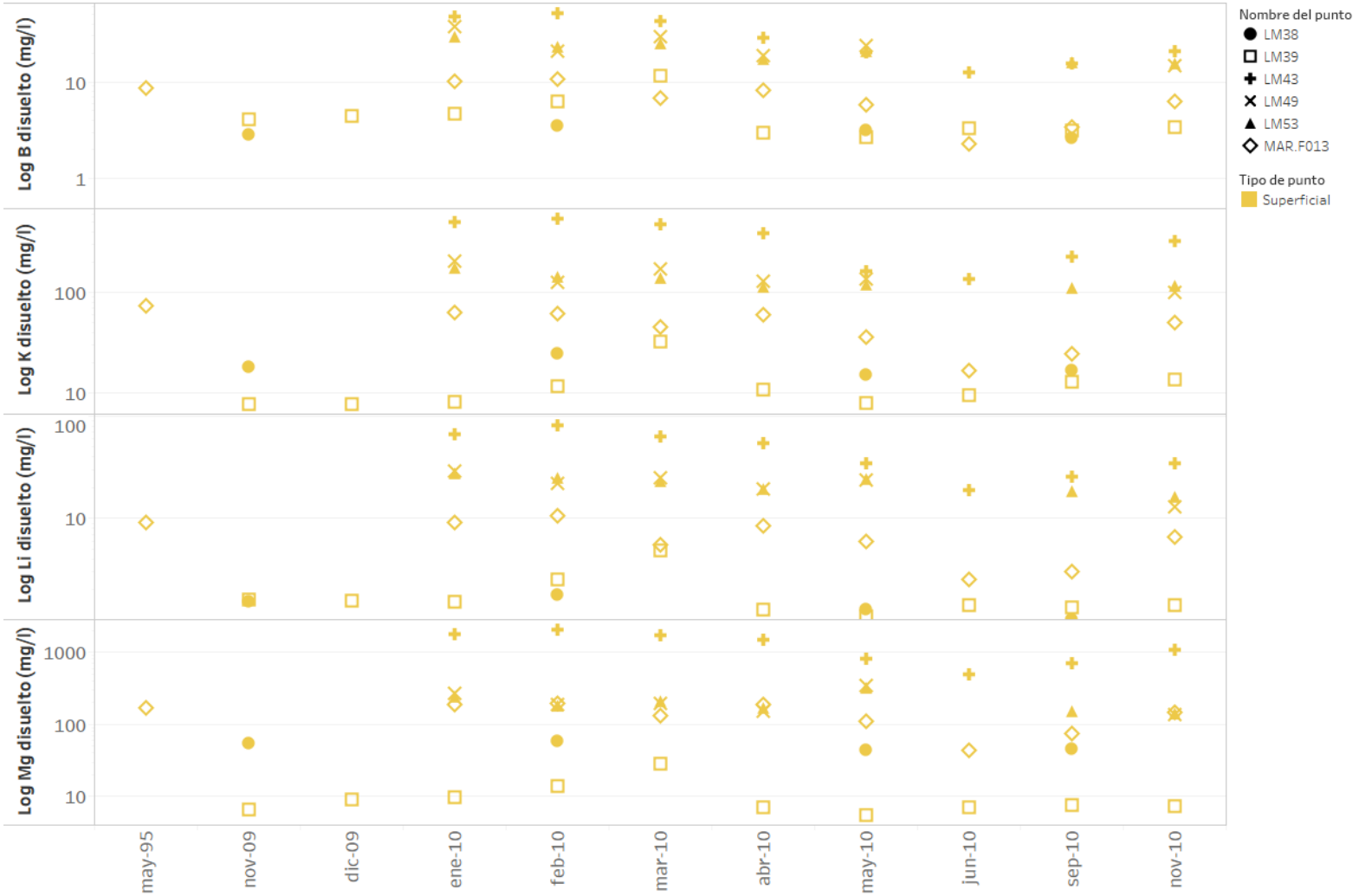


Figura 6-14: Evolución temporal B, K, Li, Mg de las aguas superficiales en el sector Salar de Maricunga.

Fuente: elaboración propia.

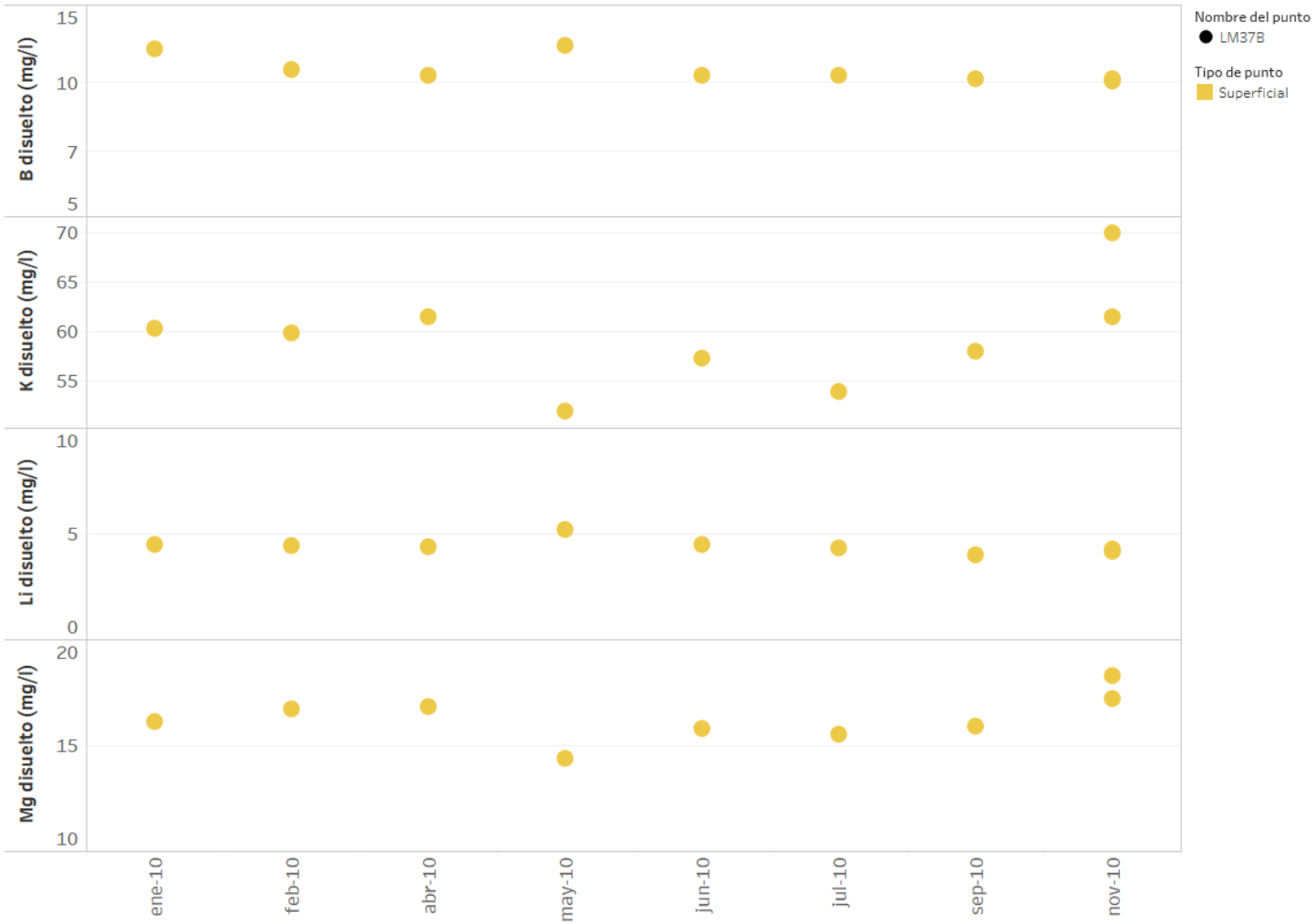


Figura 6-15: Evolución temporal B, K, Li, Mg en el punto de agua superficial LM37B ubicado en el sector Río Lamas y Llano de Tres Cruces.

Fuente: elaboración propia.

c) Sector Ciénaga Redonda

Para la caracterización de la evolución temporal de los parámetros disueltos B, K, Li y Mg, en las aguas emplazadas en el sector Ciénaga Redonda, se han utilizado las analíticas de 32 puntos, los cuales poseen más de 4 registros definidos como admitidos.

En la Figura 6-16, Figura 6-17, Figura 6-18 y Figura 6-19 se ilustra las concentraciones de B, K, Li y Mg, respectivamente, para las distintas campañas de muestreo en cada uno de los puntos. Cabe mencionar que, debido a la gran cantidad de puntos con información, no se han graficado los puntos de agua subterránea RPG-04A, RPG-04B, RPG-15, RPG-16, RPG-17 y RPG-18B debido a que muestran un comportamiento similar a otros puntos de agua subterránea aledaños, dificultando la lectura de las figuras.

Se observa que las aguas no muestran variaciones significativas a lo largo del tiempo en ninguno de los parámetros mencionados; no obstante, se observan variaciones estacionales producto de las condiciones climáticas y procesos ocurridos.

En particular, los humedales y aguas superficiales presentan mayores concentraciones en los meses de verano, posiblemente, producto de la evaporación en lámina libre, mientras que las menores concentraciones se registran durante invierno y primavera, estaciones en las que ocurren eventos de precipitación y deshielo diluyendo las aguas.

En cuanto a las aguas subterráneas, éstas presentan fluctuaciones estacionales similares a las observadas en los humedales y aguas superficiales. Sin embargo, como el proceso de infiltración hacia el acuífero no es inmediato, las máximas y mínimas concentraciones en las aguas subterráneas muestran un retardo en comparación con las aguas superficiales y humedales.

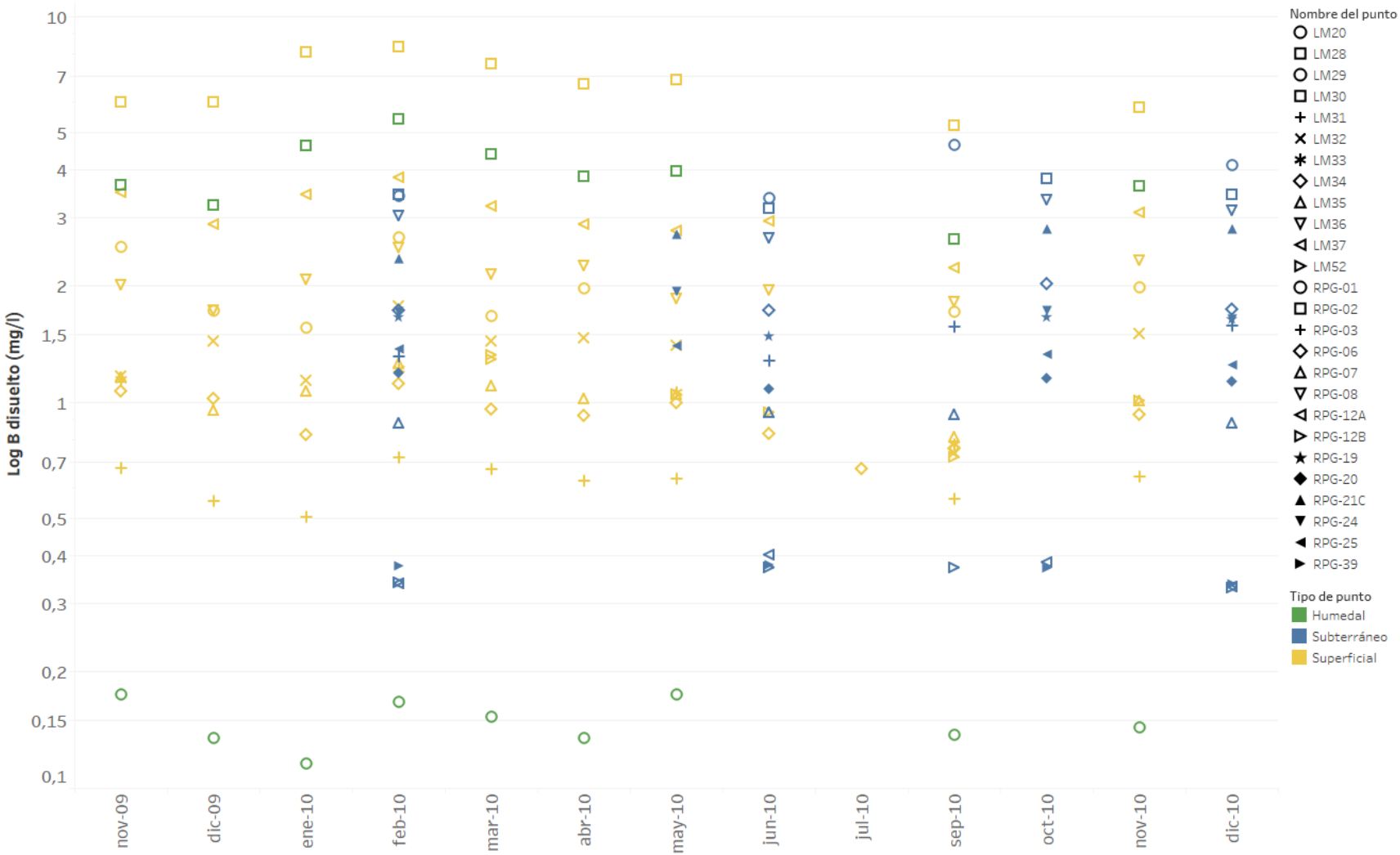


Figura 6-16: Evolución temporal de B en las aguas emplazadas en el sector Ciénaga Redonda.

Fuente: elaboración propia.

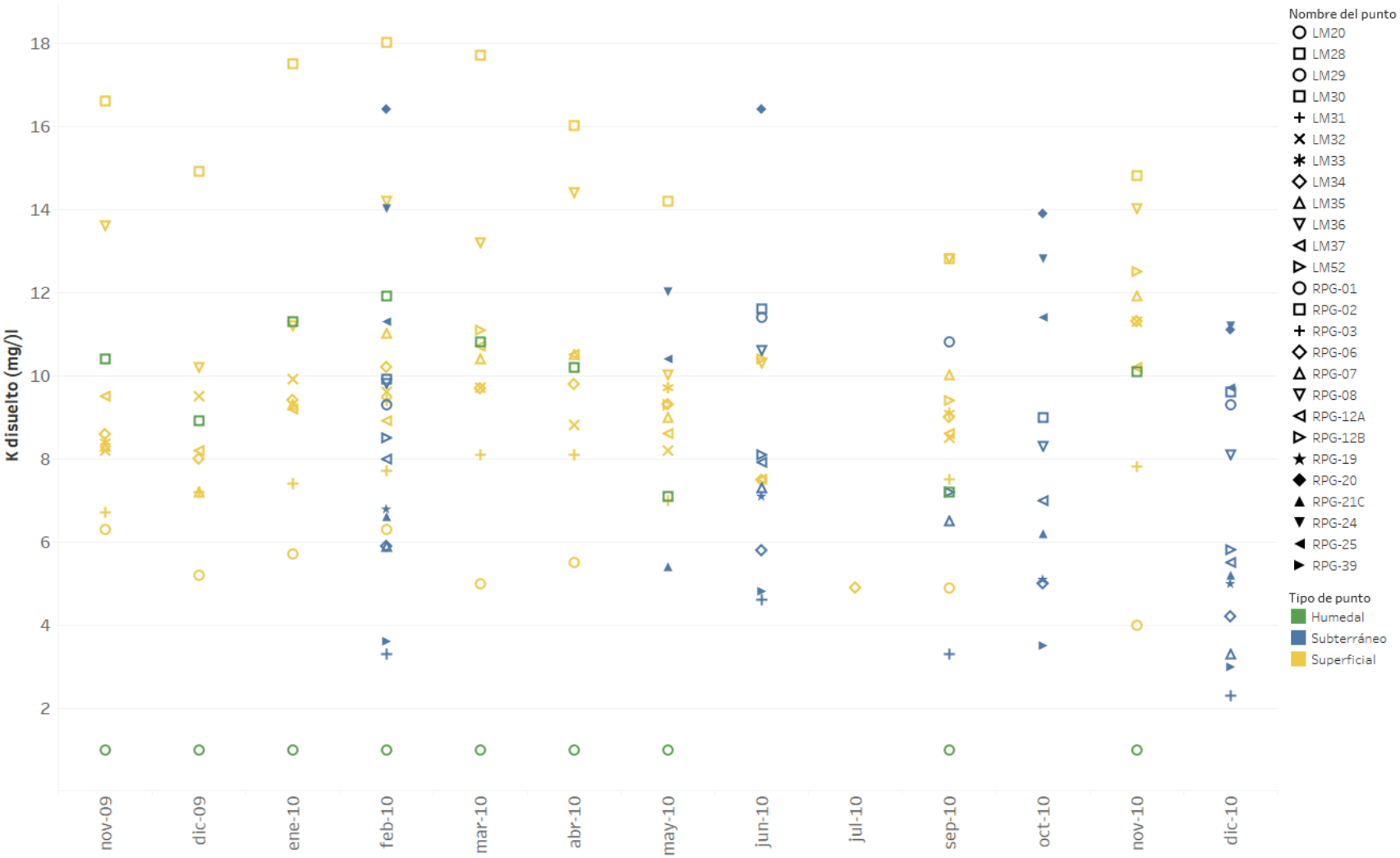


Figura 6-17: Evolución temporal de K en las aguas emplazadas en el sector Ciénaga Redonda.

Fuente: elaboración propia.

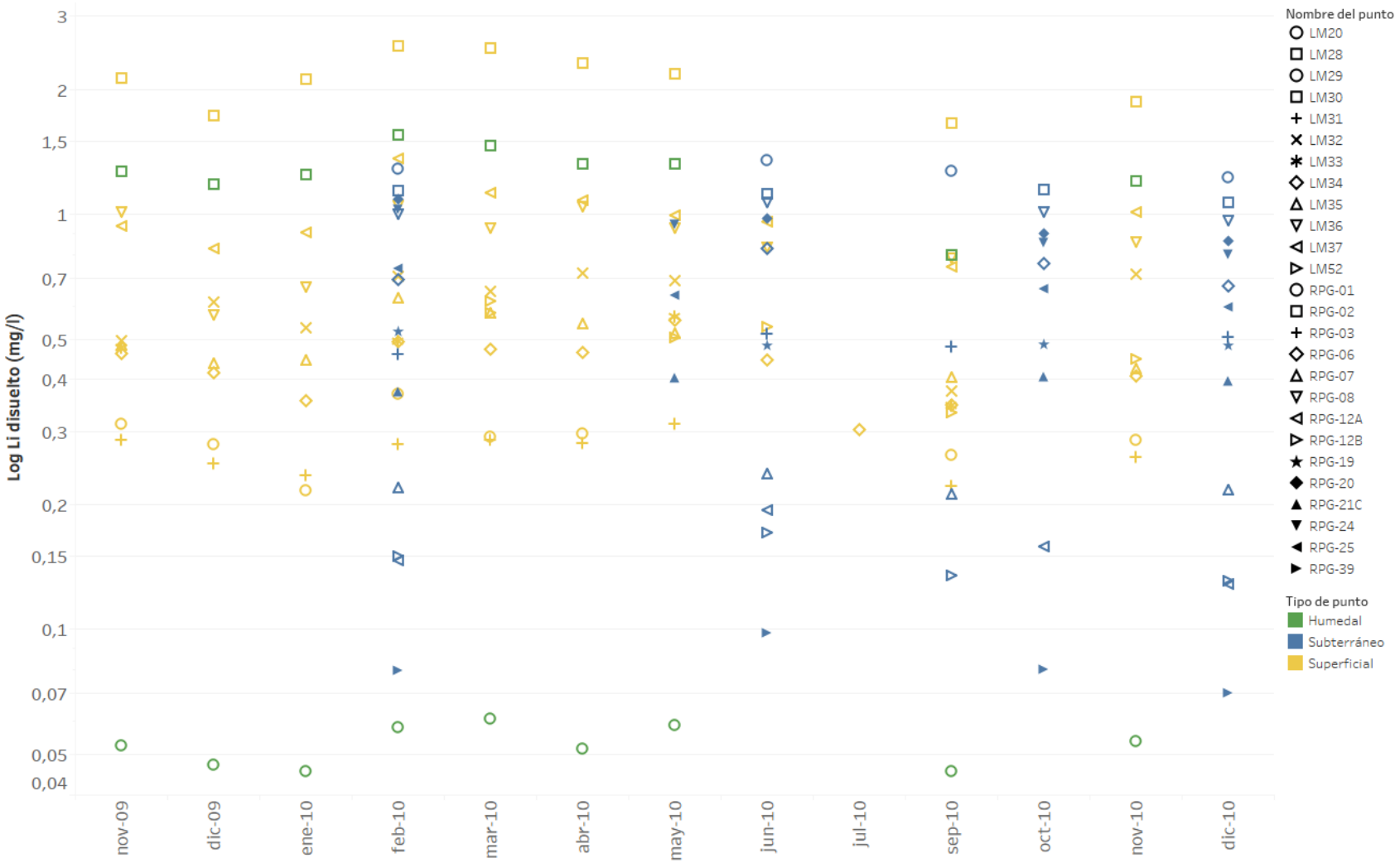


Figura 6-18: Evolución temporal de Li en las aguas emplazadas en el sector Ciénaga Redonda.

Fuente: elaboración propia.

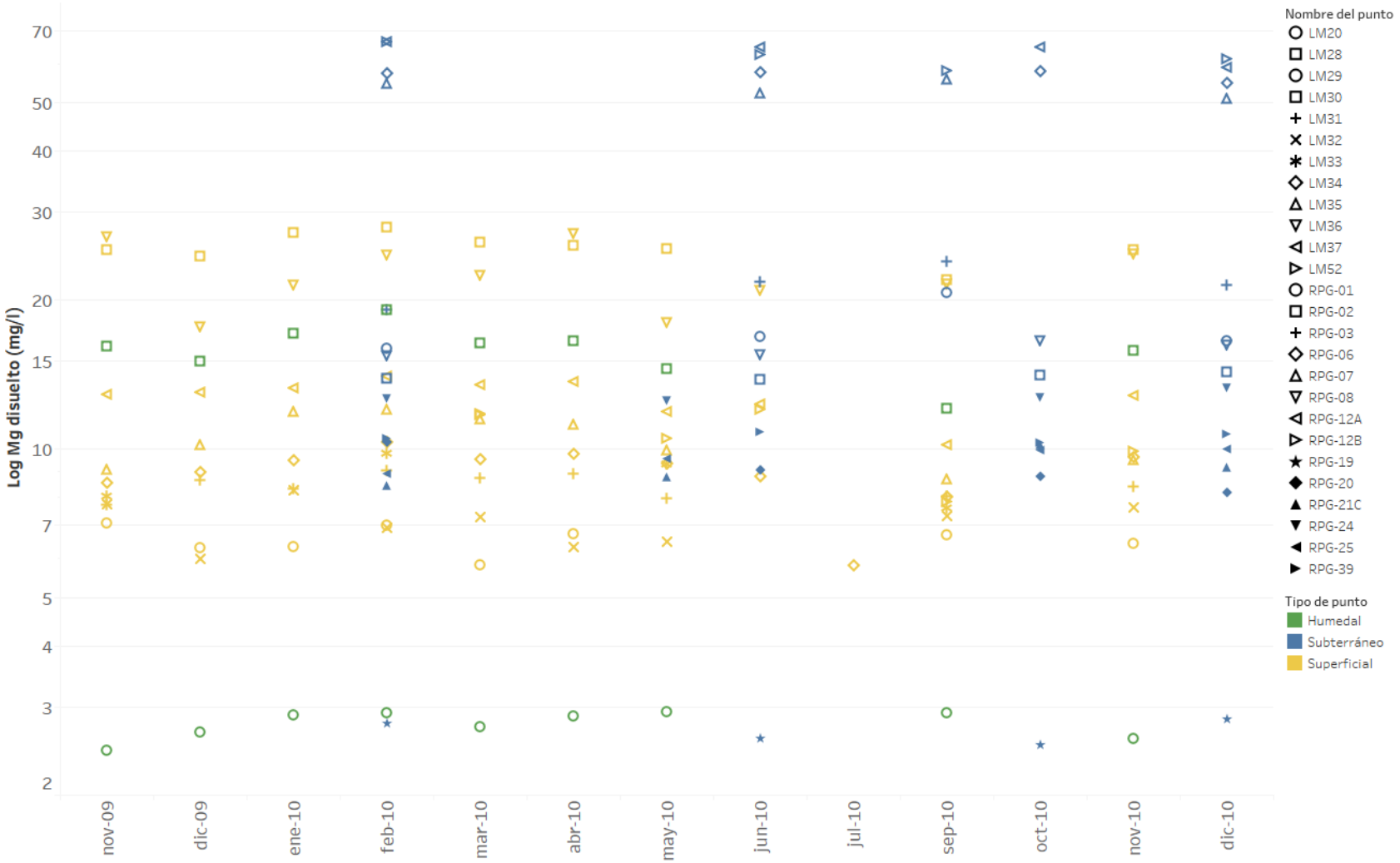


Figura 6-19: Evolución temporal de Mg en las aguas emplazadas en el sector Ciénaga Redonda.

Fuente: elaboración propia.

6.7.2 Distribución espacial

Debido a que la zona de estudio consiste en una cuenca evaporítica, es posible observar correlaciones entre la ubicación y la concentración de algunos elementos característicos de los salares como boro, litio, magnesio y potasio.

En la Figura 6-20 se grafica la concentración de B, Li, K y Mg para cada sector diferenciando según tipo de punto. A continuación, se describe la distribución de las concentraciones para cada uno de los parámetros.

- **Boro**

A partir del mapa de la Figura 6-21, se desprende que las mayores concentraciones de boro se distribuyen en el sector Salar de Maricunga, mientras que en el resto de los sectores éstas no superan los 15 mg/l.

Las únicas excepciones son el punto PPB-9, ubicado en las nacientes de la Quebrada Piedra Pómez (norte de esta cuenca hidrográfica), cuyos valores son de 22 y 23 mg/l y el punto MAR.F072 con 15,6 mg/l, ubicado en el curso inferior del río Lamas. Estos valores superan tenuemente el límite de clasificación utilizado en la figura, por lo que no representan casos excepcionales de especial atención.

Las mayores concentraciones alcanzan valores cercanos a 1250 mg/l, todas ellas correspondientes a calicatas excavadas en el mismo salar. En general, todos aquellos puntos que superan los 100 mg/l se distribuyen en el margen occidental y norte del Salar de Maricunga o dentro de éste. Se observa que las aguas superficiales están mucho más enriquecidas en boro que las subterráneas, mientras que en Ciénaga Redonda, los rangos de boro son, prácticamente, iguales entre los distintos tipos de puntos.

Por último, es importante mencionar que dentro de los puntos descartados para el análisis, aquellos no admitidos como válidos por presentan un error de balance iónico elevado (ver apartado 6.3), se incluyen varias analíticas de pozos ubicados en el sector nor-oriental de Piedra Pómez que presentan valores elevados de B (pozos PPX-11, PPX-12, PPX-8, PPX-9, PPX-14, PPX-10 con concentraciones de hasta 936 mg/l).

- **Litio**

Al analizar la Figura 6-22 se observa que las mayores concentraciones de Li en la cuenca se distribuyen en el sector Salar de Maricunga. Los valores máximos alcanzan los 1860 mg/l (A.1, A.3) y todos corresponden a calicatas excavadas dentro del salar. Además, se han identificado altas concentraciones en lagunas de poca profundidad dentro del salar (ej. 791, 586 y 122 mg/l, puntos MAR.F024, SMAR, MAR.F023, respectivamente). Las zonas de mayor concentración coinciden con las de mayor contenido en B, Mg y K; localizándose en el centro y los extremos occidental-norte del Salar.

Si bien los puntos ubicados en torno a la Laguna Santa Rosa (sur del Salar) poseen rangos elevados en contenido de Li, también se observan puntos con bajos valores, lo que sugiere que esta zona en particular recibe aportes de variados tipos de agua asociados a distintos orígenes.

Respecto al resto de la cuenca, las concentraciones no superan los 15 mg/l corroborando una recarga de aguas diluidas. El contenido de litio es similar tanto en las aguas superficiales como subterráneas en el sector Ciénaga Redonda, mientras que las concentraciones son ligeramente mayores en los pozos de Piedra Pómez. El alto contenido de litio en el sector del Salar se relaciona con aguas superficiales, las que han sido afectadas por procesos reiterativos de evaporación y reconcentración mineral.

- **Magnesio y Potasio**

En base a la Figura 6-23 y Figura 6-24 es posible identificar las mismas relaciones descritas para el Li y B, en donde las mayores concentraciones de Mg y K se localizan, nuevamente, en calicatas y aguas superficiales del sector Salar de Maricunga.

Cabe señalar la alta concentración de potasio (alrededor de 500 mg/l) de las muestras MAR.F070, MAR.F071, MAR.F072, ubicadas a lo largo del curso del río Lamas.

.

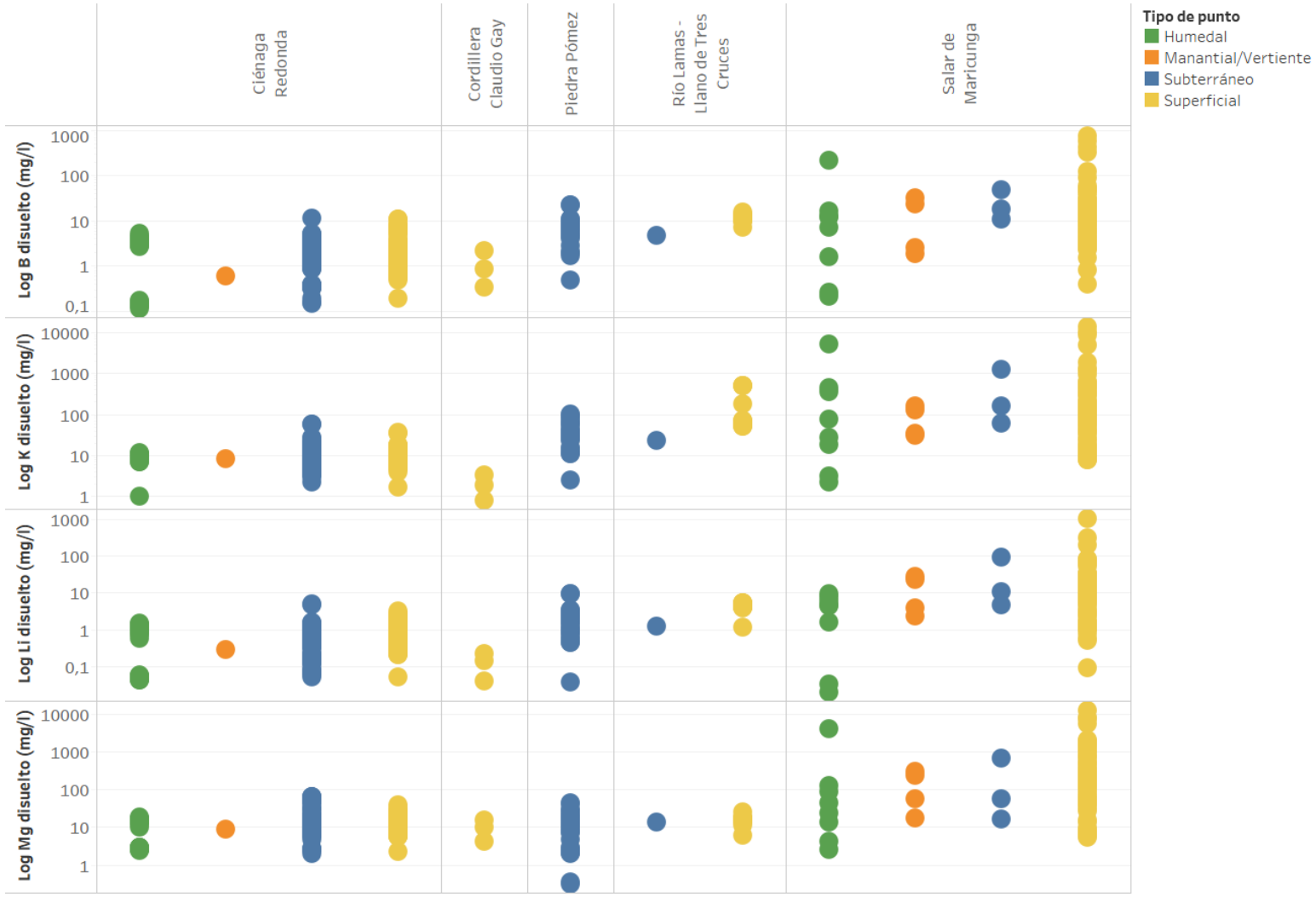


Figura 6-20: Concentración de B, Li, Mg y K según tipología y sector geográfico

Fuente: elaboración propia.

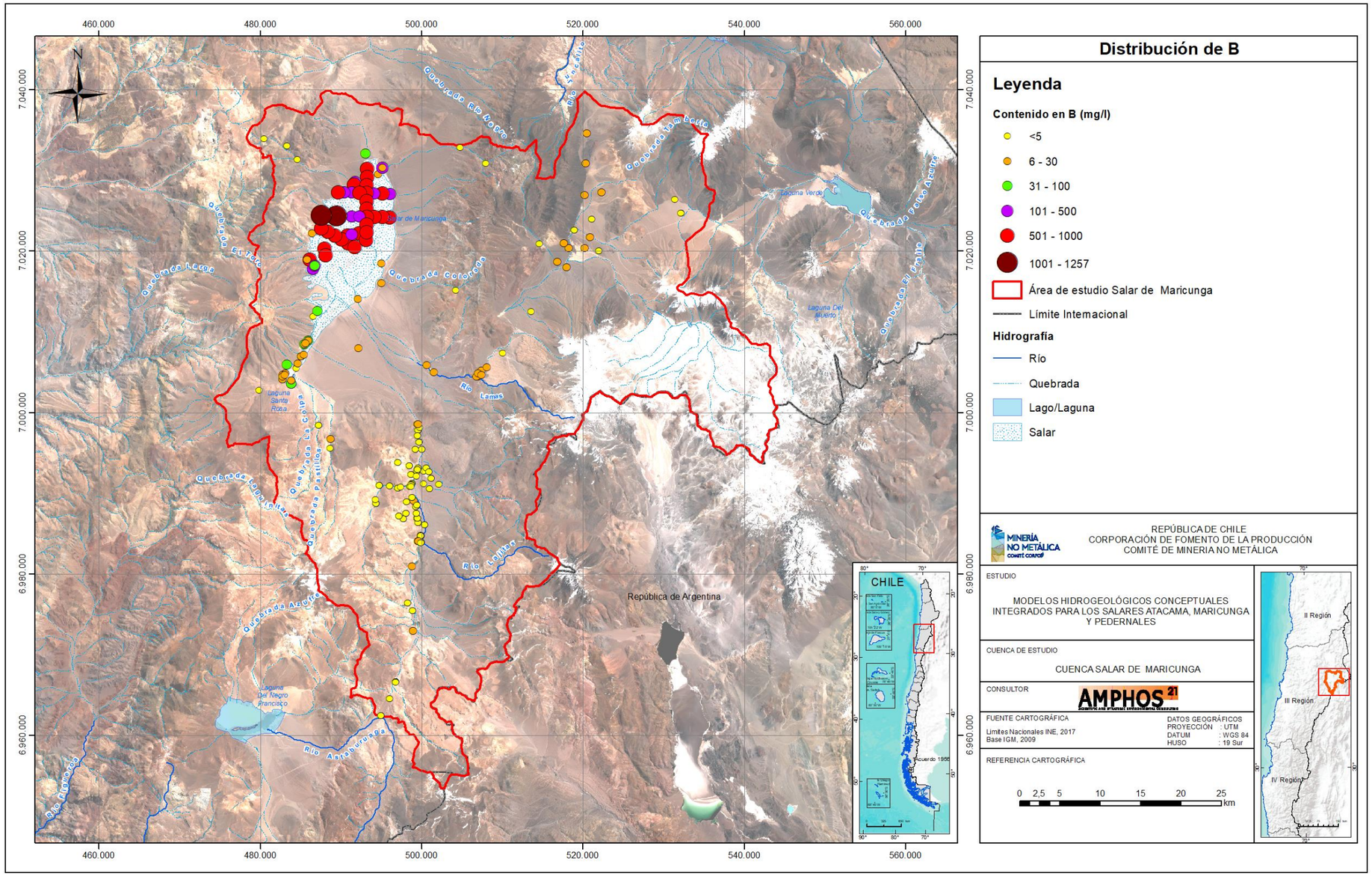


Figura 6-21: Distribución de B.

Fuente: elaboración propia.

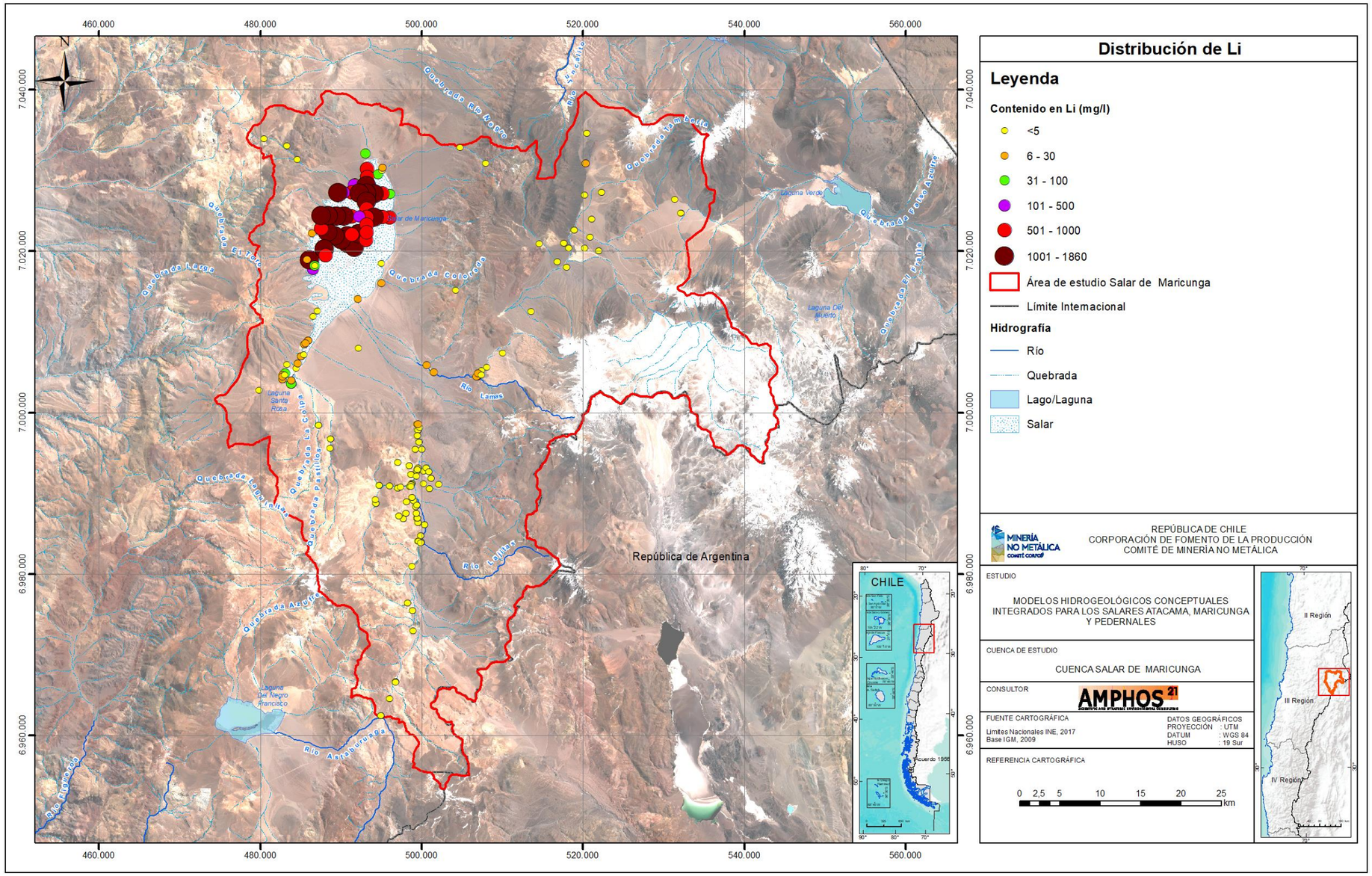


Figura 6-22: Distribución de Li.

Fuente: elaboración propia.

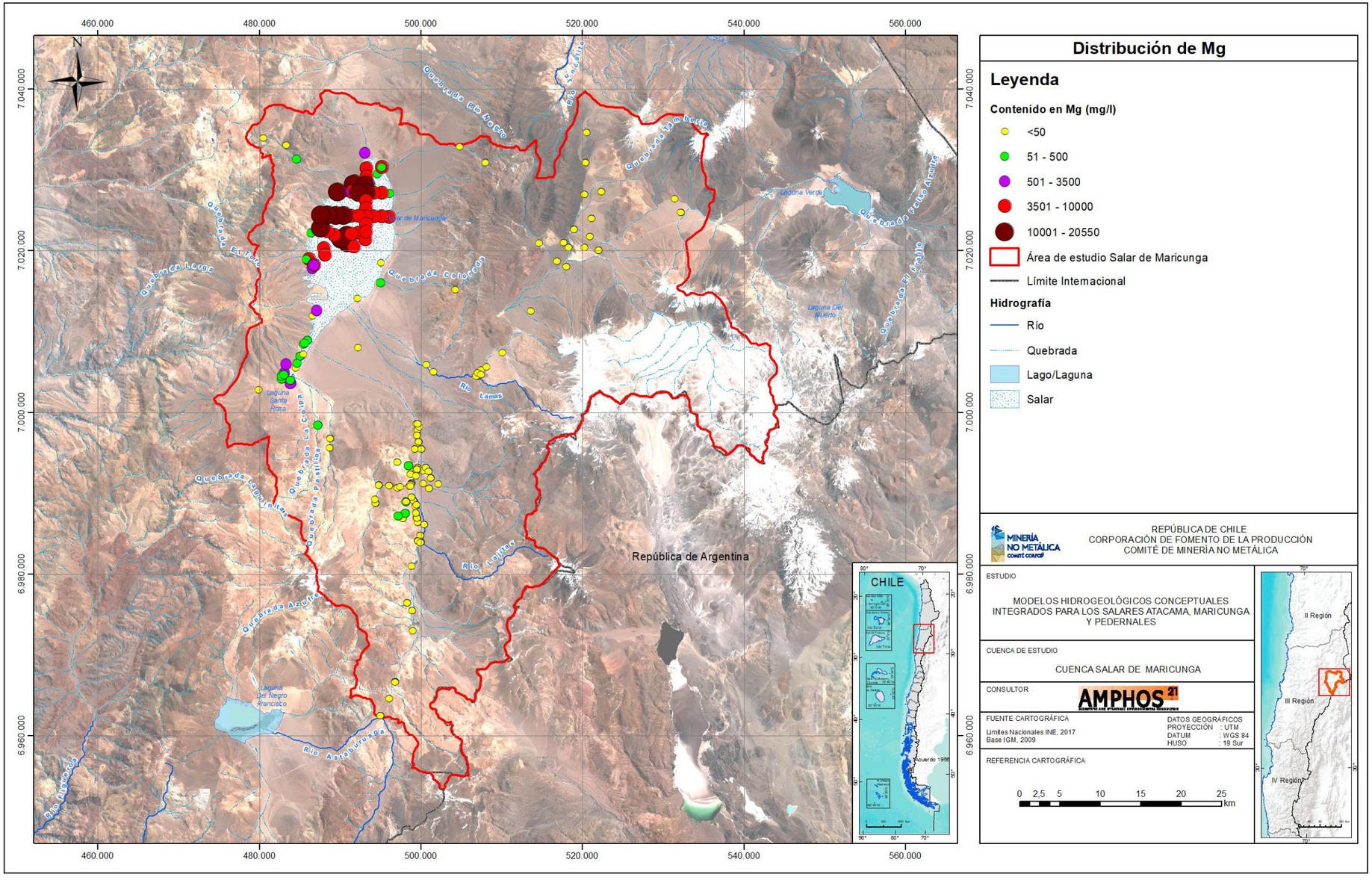


Figura 6-23: Distribución de Mg.

Fuente: elaboración propia.

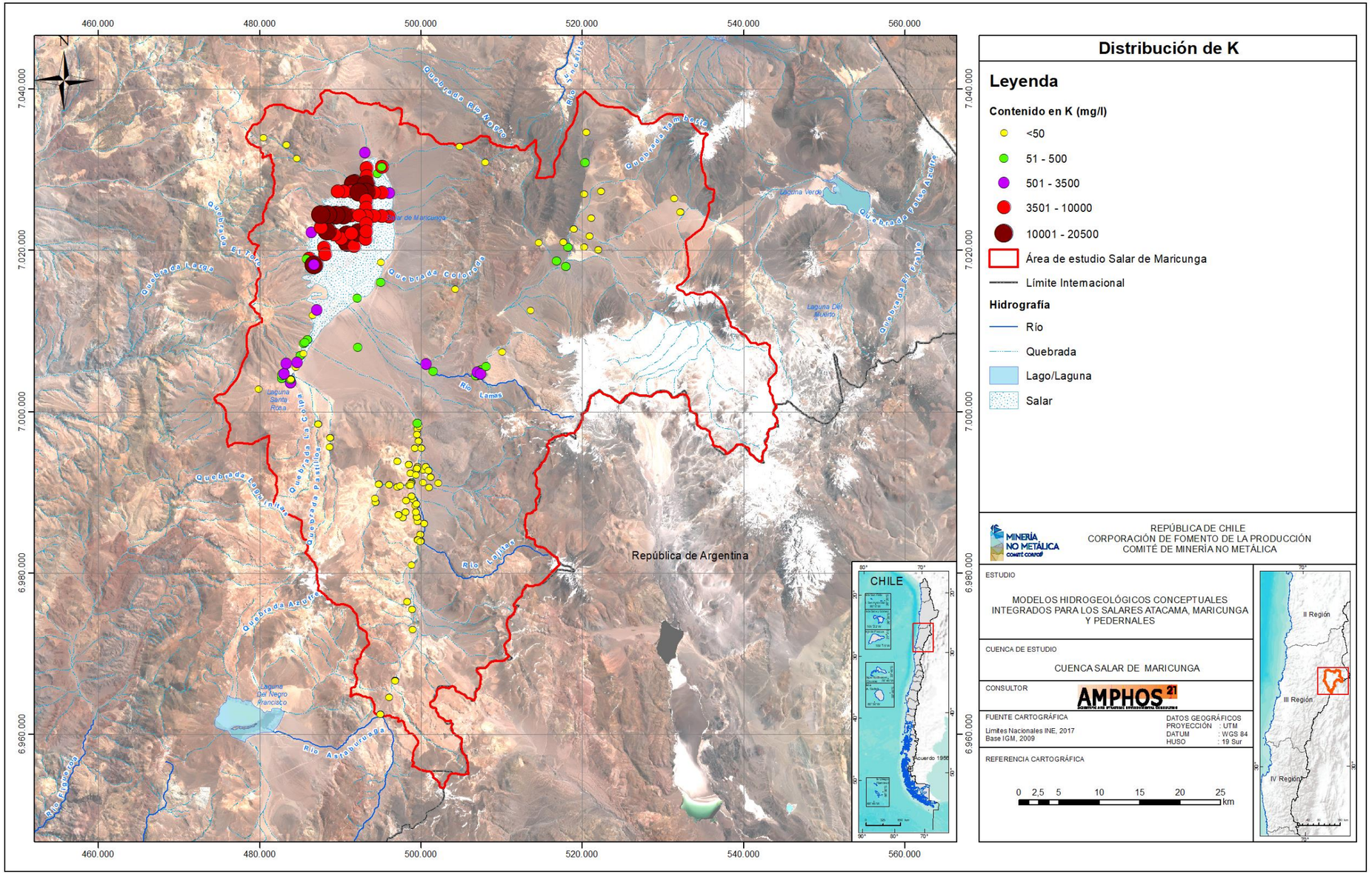


Figura 6-24: Distribución de K.

Fuente: elaboración propia.

6.8 Isótopos

La interpretación de datos isotópicos es suma utilidad en las aguas subterráneas dado que constituye un método adecuado para obtener y validar modelos conceptuales. Esta técnica es considerada un instrumento fiable para la validación de otras técnicas hidrogeológicas y aporta información sobre interconexiones hidráulicas, mezclas de agua, profundidad de circulación, zonas de recargas, tiempos de tránsito y de fuentes de contaminación.

Los isótopos ambientales analizados en esta sección corresponden a los isótopos estables del agua deuterio (δ^2H o δD) y $\delta^{18}O$. Para el respectivo análisis, se han utilizado 31 analíticas desprendidas de los antecedentes recopilados, de las cuales 9 pertenecen al estudio de la DGA (2016), 19 a DGA (2009) y 3 a Risacher et al. (1999).

Los isótopos del hidrógeno y del oxígeno constituyen trazadores geoquímicos ideales para el estudio del ciclo hidrológico porque son isótopos de la propia molécula de agua. Algunos de los procesos naturales que hacen variar la composición isotópica estable de las aguas son la evaporación y la condensación. Se observa una relación entre la temperatura de condensación y la composición isotópica de las precipitaciones de manera que se producen variaciones estacionales en el contenido isotópico de la precipitación, variaciones con la latitud y con la altitud. De esta forma, los isótopos estables del agua se utilizan para identificar y caracterizar áreas de recarga, así como posibles épocas climáticas de recarga. La evaporación causa fraccionamiento isotópico permitiendo diferenciar aguas de ríos, lagos y subterráneas.

6.8.1 Evolución temporal δ^2H y $\delta^{18}O$

Dado que no se cuenta con varias mediciones isotópicas de un mismo punto a lo largo del tiempo, no es posible realizar un análisis temporal con los datos disponibles.

6.8.2 Relación δ^2H / $\delta^{18}O$

Para el análisis de isótopos de δ^2H y $\delta^{18}O$ se ha trabajado con la recta meteórica mundial (MWL) de Craig (1961 en Clark y Fritz, 1997), y la recta meteórica mundial sin exceso de deuterio (+10‰), que es característica de la composición de las aguas de recarga en zonas áridas. Adicionalmente, se ha considerado la recta meteórica local (LMWL), calculada por Aravena et al. (1997) en el norte de Chile. Las ecuaciones se describen a continuación:

MWL: $$\delta D = 8 \cdot \delta^{18}O + 10$$

LMWL: $$\delta D = 7{,}8 \cdot \delta^{18}O + 9{,}7$$

MWL s/D: $$\delta D = 8 \cdot \delta^{18}O$$

Por lo tanto, las muestras tomadas en la cuenca Salar de Maricunga debieran presentar tendencias similares a las rectas recién descritas, siempre y cuando no hayan sido afectadas por procesos posteriores que provoquen cierto grado de fraccionamiento en su composición.

En la Figura 6-25 se presenta la composición isotópica $\delta^{2}H$ versus $\delta^{18}O$ de las aguas analizadas. En éste, es posible observar que las muestras siguen una tendencia distinta a las rectas, alejándose de éstas a medida que se enriquecen en $\delta^{2}H$ y $\delta^{18}O$. Dado que las muestras poseen una tendencia con pendiente de 4,7, es posible sugerir que han sido afectadas por procesos asociados a evaporación desde una superficie libre, durante la infiltración por la zona no saturada o por evaporación freática a través de la vegetación (FCIHS, 2009), generando el fraccionamiento isotópico observado, el que enriquece las aguas remanentes en isótopos pesados.

Del análisis del gráfico, se observa que las muestras de los sectores Ciénaga Redonda, Río Lamas – Llano de Tres Cruces y Piedra Pómez, se agrupan cercanos a la MWL s/D y presentan valores empobrecidos en isótopos pesados. Las dos muestras de la Cordillera de Claudio Gay, ubicadas en el extremo norte de ésta, se sitúan justo sobre la MWL s/D y presentan valores levemente más enriquecidos en comparación con los demás sectores recién descritos. Estas características sugieren que el agua de estos puntos posee una baja afectación de procesos que produzcan fraccionamiento isotópico, propias de zonas de recarga.

Finalmente, es notable destacar que todas las muestras del sector Salar de Maricunga se alejan de las rectas meteóricas y presentan valores enriquecidos en isótopos pesados. Esto se condice con los procesos reiterativos de evaporación desde una superficie libre y reconcentración mineral que afectan al Salar y el consecuente enriquecimiento de isótopos pesados en las aguas remanentes.

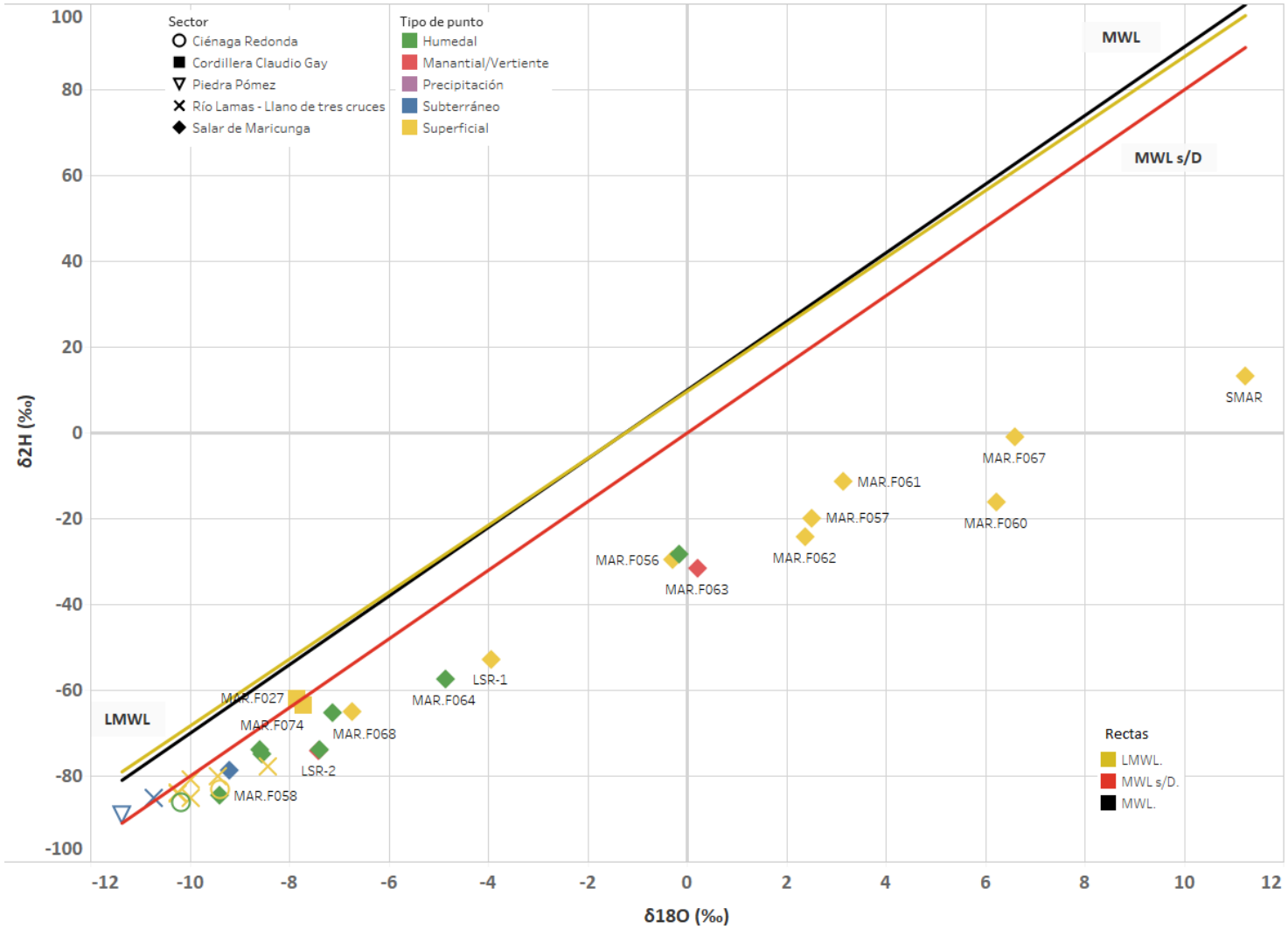


Figura 6-25: Composición isotópica $\delta^{2}H$ v/s $\delta^{18}O$ de las aguas analizadas.

Fuente: elaboración propia.

6.8.3 Relación Altitud / $\delta^{18}O$

En las aguas de lluvia existe un efecto asociado a la altitud, en el cual los contenidos de $\delta^{2}H$ y $\delta^{18}O$ disminuyen al aumentar la altura convirtiéndose en aguas más ligeras (FCIHS, 2009). Este efecto se debe, principalmente, a dos factores:

- Aguas arriba la lluvia procede de masas de vapor progresivamente empobrecidas isotópicamente por la pérdida de isótopos pesados en las lluvias precedentes; y
- Aguas arriba la temperatura es más baja y, por lo tanto, el fraccionamiento de la condensación de vapor es mayor.

Con el objetivo de determinar zonas de recarga en distintas zonas del acuífero, se pueden tomar muestras de aguas lluvia a diferentes cotas, las cuales al graficarlas en un gráfico Altitud/ $\delta^{18}O$ debiesen generar una recta denominada recta altitudinal (ver línea negra continua Figura 6-26).

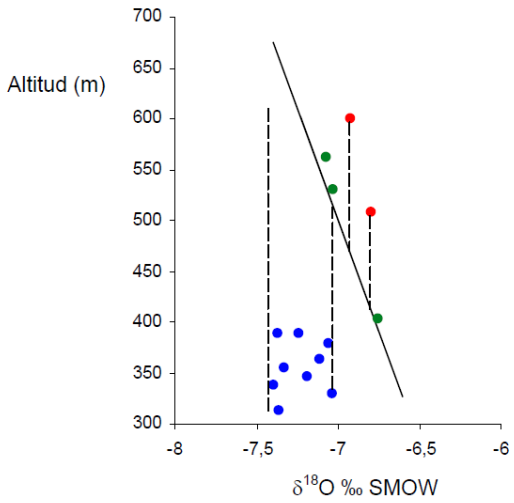


Figura 6-26: Ejemplo de una relación entre diferentes muestras de aguas y la recta altitudinal local.

Fuente: FCIHS (2009).

Una vez determinada la recta altitudinal, se grafican las aguas subterráneas, superficiales y de humedales, vertientes y manantiales y dependiendo de su ubicación con respecto de la mencionada recta, se puede definir lo siguiente (FCIHS, 2009 y Lambán, 1997):

- Si las muestras están por sobre la recta altitudinal: las aguas presentan una composición isotópica más enriquecida en isótopos pesados a la que le correspondería por su cota topográfica de recarga, por lo que se trata de un efecto asociado a procesos de evaporación, a

enriquecimiento por interacción agua-roca o a mezcla de aguas (puntos color rojo en Figura 6-26);

- Si las muestras caen en la recta altitudinal: las aguas muestreadas a cierta cota topográfica poseen valores isotópicos iguales a las aguas lluvias caídas en dicha cota y, por lo tanto, la recarga es local y no regional (puntos color verde en Figura 6-26); y
- Si las muestras están por debajo de la recta altitudinal: las aguas muestran una composición isotópica menos enriquecida en isótopos pesados en comparación con las aguas lluvias caídas a esa misma cota, por lo tanto, se trata de flujos regionales (puntos color azul en Figura 6-26).

En la Figura 6-27 se ha graficado la cota topográfica de cada muestra (calculada mediante un DEM) y su contenido en y $\delta^{18}O$, clasificadas en función del tipo de punto y su distribución geográfica en la cuenca.

Debido a que no se cuenta con información isotópica de precipitaciones en la cuenca, no se ha podido establecer la recta altitudinal local, lo que imposibilita un análisis acabado de las aguas de recarga.

No obstante, es posible advertir que las muestras de los sectores Ciénaga Redonda, Cordillera de Claudio Gay, Piedra Pómez y Río Lamas- Llano de Tres Cruces presentan rangos isotópicos acotados de $\delta^{18}O$ (-11 a -7 ‰) indistintamente de la altura a la que se encuentren, mientras que las aguas del sector Salar de Maricunga reflejan un enriquecimiento isotópico de las aguas ubicadas en la misma cota. Adicionalmente, se observa que las aguas superficiales son siempre más enriquecidas que las aguas subterráneas, de humedales y manantiales.

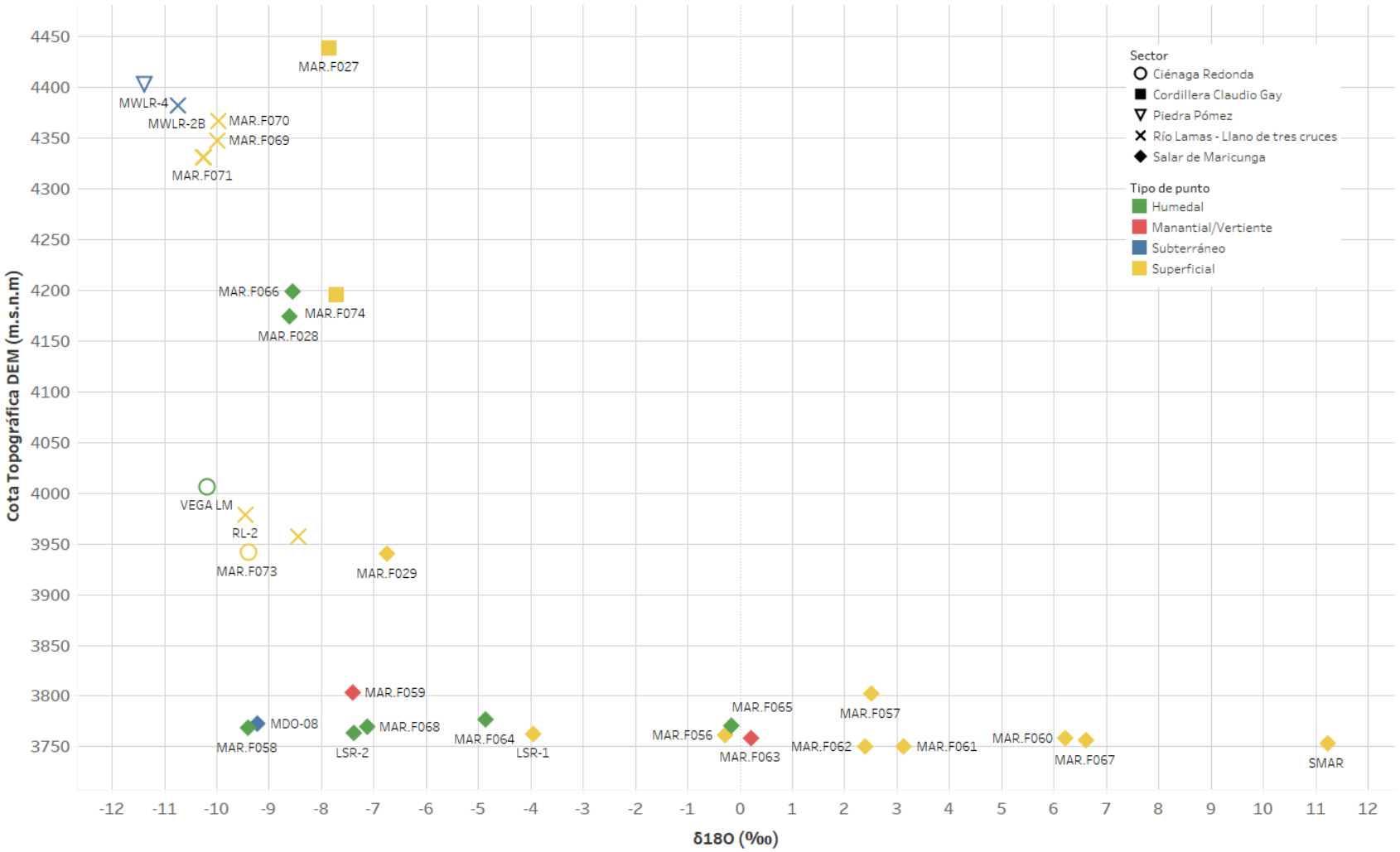


Figura 6-27: Relación de la cota topográfica de muestreo v/s $\delta^{18}O$ de las aguas analizadas.

Fuente: elaboración propia.

6.8.4 Relación B^{3+}/Cl^{-} / $\delta^{18}O$

En la Figura 6-28 se muestra el gráfico con la relación de boro disuelto (B^{3+}) normalizado por cloruro (Cl^{-}) v/s el $\delta^{18}O$. Debido a que el boro y el cloruro son elementos conservativos, la normalización de boro por cloruro (eje “y” del gráfico) permite eliminar las fluctuaciones asociadas a procesos que involucren variaciones en sus concentraciones en la misma razón (e.g. dilución, evaporación).

Por ello, las aguas que tengan la misma fuente u origen y únicamente hayan tenido procesos de evaporación, se encontrarán en el mismo rango de valores de B^{3+}/Cl^{-}. De modo contrario, si existen procesos de disolución/precipitación o mezcla con otras aguas, estos podrían aumentar o disminuir la concentración de B^{3+} con respecto a Cl^{-}, dependiendo del contenido de estos elementos en las sales.

Dicho esto, a partir de la Figura 6-28 se puede advertir que las aguas de los sectores Piedra Pómez, Río Lamas- Llano de Tres Cruces, Cordillera de Claudio Gay y las zonas altas del sector Salar de Maricunga presentan una fuente común asociada, probablemente, al agua de recarga proveniente de precipitaciones. Sin embargo, las aguas del mismo salar evidencian procesos de evaporación y enriquecimiento isotópico y presentan una razón B/Cl inferior a las observadas en el resto de los sectores. Esto sugiere un aporte de agua distinto al resto, una mezcla con otro tipo de aguas o más probablemente, un cambio en la composición in situ de la misma debido a procesos reiterativos de disolución/precipitación mineral, en particular de halita, incrementando las proporciones de cloruro.

Por otra parte, destaca la muestra “Vega LM”, ubicada en la desembocadura de la quebrada Villalobos hacia la quebrada Ciénaga Redonda. Sus altas relaciones B/Cl pueden atribuirse a un origen distinto, influenciado por la zona de alteración hidrotermal y volcanismo asociado al complejo volcánico Copiapó, con un mayor aporte de B respecto al Cl.

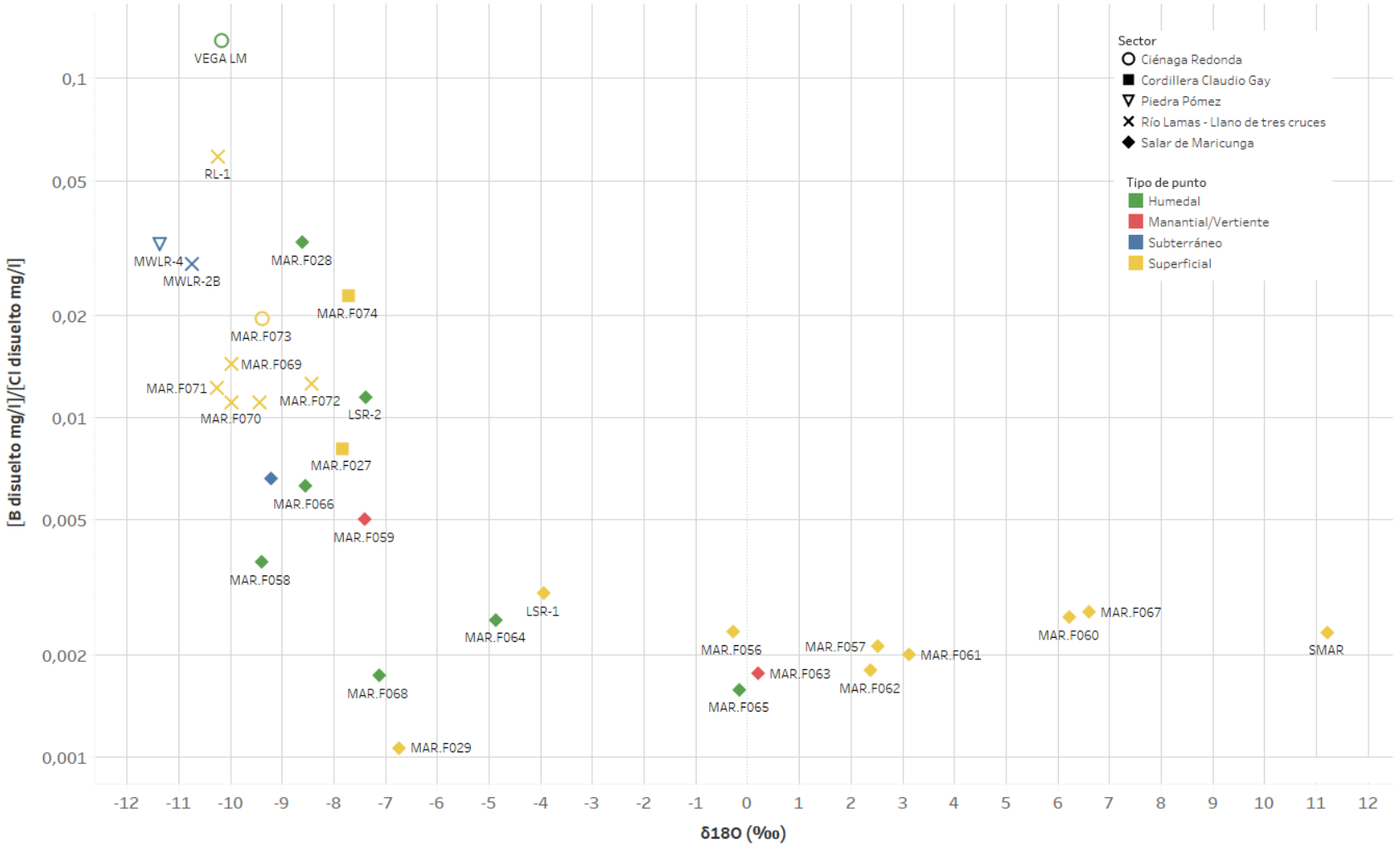


Figura 6-28: Relación B^{3+}/Cl^{-} vs $\delta^{18}O$ en las aguas de estudio.

Fuente: elaboración propia.

6.9 Modelo hidrogeoquímico

La cuenca del Salar de Maricunga posee un comportamiento hidrogeoquímico complejo debido a su gran extensión, diversas fuentes de aporte y procesos involucrados a lo largo del recorrido de sus aguas. Sin embargo, es posible determinar direcciones de flujo en base a la composición química e isotópica de las aguas y su distribución geográfica.

Las aguas del sector Ciénaga Redonda se recargan desde las zonas altas para luego fluir por el valle homónimo. En base al progresivo incremento de las conductividades eléctricas hacia el norte y al enriquecimiento isotópico en la misma dirección, es posible indicar que la dirección de flujo es en sentido sur-norte. El recorrido comienza desde Pampa Pantanillo, pasando por la Pampa de Valle Ancho para luego descargar e infiltrarse en el Llano de Ciénaga Redonda, hacia el norte.

La composición de las aguas es bastante heterogénea en este sector, variando entre sulfatadas cálcicas a cloruradas sódicas. Cabe notar que el tipo de agua es dependiente de su ubicación, encontrando composiciones bicarbonatadas cálcicas en las quebradas que aportan desde la vertiente oriental del valle y composiciones sulfatadas cálcicas-sódicas en aquellas quebradas de la vertiente occidental. Se sugiere que las aguas de la vertiente occidental estarían influenciadas por la interacción de las aguas de recarga con rocas intensamente alteradas hidrotermalmente, las que a su vez están relacionadas, genéticamente, al volcán Copiapó. Adicionalmente, las muestras localizadas en las partes altas de las quebradas que drenan desde el volcán poseen pH's ácidos, lo que confirmaría procesos de interacción del agua y la litología presente en ese sector en particular.

Cabe notar que existe una zona de alta conductividad (hasta 12.600 µS/cm) en una quebrada al poniente de la Vega Pantanillo Ancho y al sur de la misma. Estos valores anómalos en relación a su entorno se asocian, probablemente, a aguas estancadas que han sufrido procesos de evaporación y reconcentración mineral.

En cuanto al sector Cordillera de Claudio Gay, sus aguas tienen tendencia composicional al tipo bicarbonatadas sódicas, indicando una similitud con aguas-lluvias de las zonas de recarga. Adicionalmente, sus conductividades son bajas (<1.000 µS/cm), exceptuando un solo punto con 6.500 µS/cm, ubicado aguas abajo de la Quebrada La Guanaca. Se observa la correlación que los puntos ubicados a mayor altura coinciden con los de menor conductividad, indicando una recarga diluida desde la Cordillera de Claudio Gay hacia el Salar, cuyas líneas de flujo son en dirección NO-SE y E-O. Los datos isotópicos muestran un agua empobrecida en $\delta^{2}H$ y $\delta^{18}O$ y cercana a la MWL sin exceso de deuterio, corroborando un aporte que no ha sufrido mayores procesos diferenciadores en el sector.

Las aguas del sector Río Lamas y Llano de Tres Cruces son, principalmente, cloruradas sódicas. Sus composiciones isotópicas indican cercanía a la MWL s/D, aunque con un leve enriquecimiento de $\delta^{2}H$ y $\delta^{18}O$, indicando procesos de evaporación sobre todo en las aguas superficiales del río Lamas. El

incremento de las conductividades hacia el oeste, sugiere un enriquecimiento de sólidos disueltos a lo largo del curso del río, el que se infiltra al llegar al Llano Ciénaga Redonda.

Los puntos ubicados en el sector de Piedra Pómez son únicamente subterráneos y presentan conductividades bajas (<4.000 µS/cm). Solamente se cuenta con una analítica de isótopos (MWLR-4), la que refleja composiciones empobrecidas en isótopos pesados, sugiriendo una baja afectación de procesos que produzcan fraccionamiento, manteniendo las composiciones propias de las zonas de recarga. La composición de sus aguas es bicarbonatada sódica con tendencia a sulfatada sódica. Cabe notar que existe una relación entra la ubicación de los puntos, su composición y las zonas de recarga, pudiendo distinguir distintos orígenes de esta última. En la zona más baja de esta cuenca (Campo de Piedra Pómez), las aguas convergen evidenciando procesos de mezcla de los aportes de distintos orígenes.

Adicionalmente, se observa que las temperaturas de las aguas subterráneas son las más elevadas de la cuenca, sobre todo en el extremo oriental y norte alcanzando los 30°C. La composición sulfatda-cálcica, las altas temperaturas y anomalías en la concentración de boro en los pozos nor-orientales, sugieren una posible influencia geotermal profunda que sustente estas condiciones.

Cabe destacar una posible conexión química entre el sector Piedra Pómez con el de Río Lamas – Llano de Tres Cruces. Al analizar en detalle los parámetros físico-químicos, elementos mayoritarios, composiciones isotópicas y relaciones iónicas (rNa/rCl) de los pozos MWLR-4 y MWLR-2B, localizados en el primer y segundo sector, respectivamente, es posible advertir una similitud en todos sus valores y composiciones, sugiriendo una línea de flujo continua entre estos dos puntos.

Finalmente, las aguas de los sectores Ciénaga Redonda, Río Lamas-Tres Cruces y Cordillera de Claudio Gay, descargan en el sector del Salar de Maricunga. Las evidencias hidroquímicas corresponden a las elevadas conductividades (>250.000 µS/cm) y al alto enriquecimiento de isótopos pesados en las aguas del Salar, indicando que los procesos predominantes en esta zona son de evaporación desde una superficie libre, reconcentración mineral y el consecuente enriquecimiento de isótopos pesados en las aguas remanentes.

La relación iónica rNa/rCl de este sector indica que las concentraciones de Na y Cl provienen, esencialmente, de la disolución de halita (NaCl). Adicionalmente, no es de extrañar que las aguas sean del tipo cloruradas sódicas y que en el salar se encuentren las mayores concentraciones de Li, B, K y Mg.

En cuanto a la Laguna Santa Rosa, ésta representa un sistema de mayor complejidad que el mismo salar. Se observan conductividades menores y pH’s ligeramente más básicos que en el salar, apuntando a un comportamiento diferenciado, el que recibe aportes de variados tipos de agua asociados a distintos orígenes (quebrada Santa Rosa, La Coipa, Pastillos y zona sur del Llano Ciénaga Redonda).

7. Sitios de protección ambiental y sectores de explotación

7.1 Sitios de protección ambiental

Dentro del límite de la cuenca del Salar de Maricunga se encuentran diferentes modalidades de áreas de protección ambiental, tales como zonas Ramsar, Parques Nacionales, zonas SNASPE (Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado) y por último Sitios de Estrategia Regional, los cuales son susceptibles de considerarse dentro de las zonas SNASPE. En la Figura 7-1 se muestra la ubicación de estos sitios de protección ambiental en la cuenca del Salar de Maricunga.

A continuación, se exponen las características de cada una de estas áreas restrictivas:

- En primer lugar, se encuentra un único sitio Ramsar (constituida en el Decreto Ley 3485 del 2 de diciembre de 1996) que abarca desde el oeste del centro y todo el suroeste de la cuenca, ocupando una extensión comprendida desde la laguna Santa Rosa hasta el límite sur de la cuenca. En dicho emplazamiento Ramsar se encuentran los bofedales de Pantanillo - Ciénaga Redonda y el Río Valle Ancho y cuenta con una superficie de 62.000 ha.
- Por otro lado, la parte norte de la zona Ramsar además está catalogada como Parque Nacional “Nevado Tres Cruces” y SNASPE, siendo ambas catalogadas como tal el 29 de julio de 1994, por el Decreto N. º 947.
- Finalmente, en la cuenca del Salar de Maricunga existe un área descrita como Sitio Estratégico Regional que bordea el límite de la zona Ramsar.
- En la cuenca de Piedra Pómez, situada al este de la cuenca del Salar de Maricunga, no existe ningún tipo de sitio de protección ambiental de los descritos anteriormente.

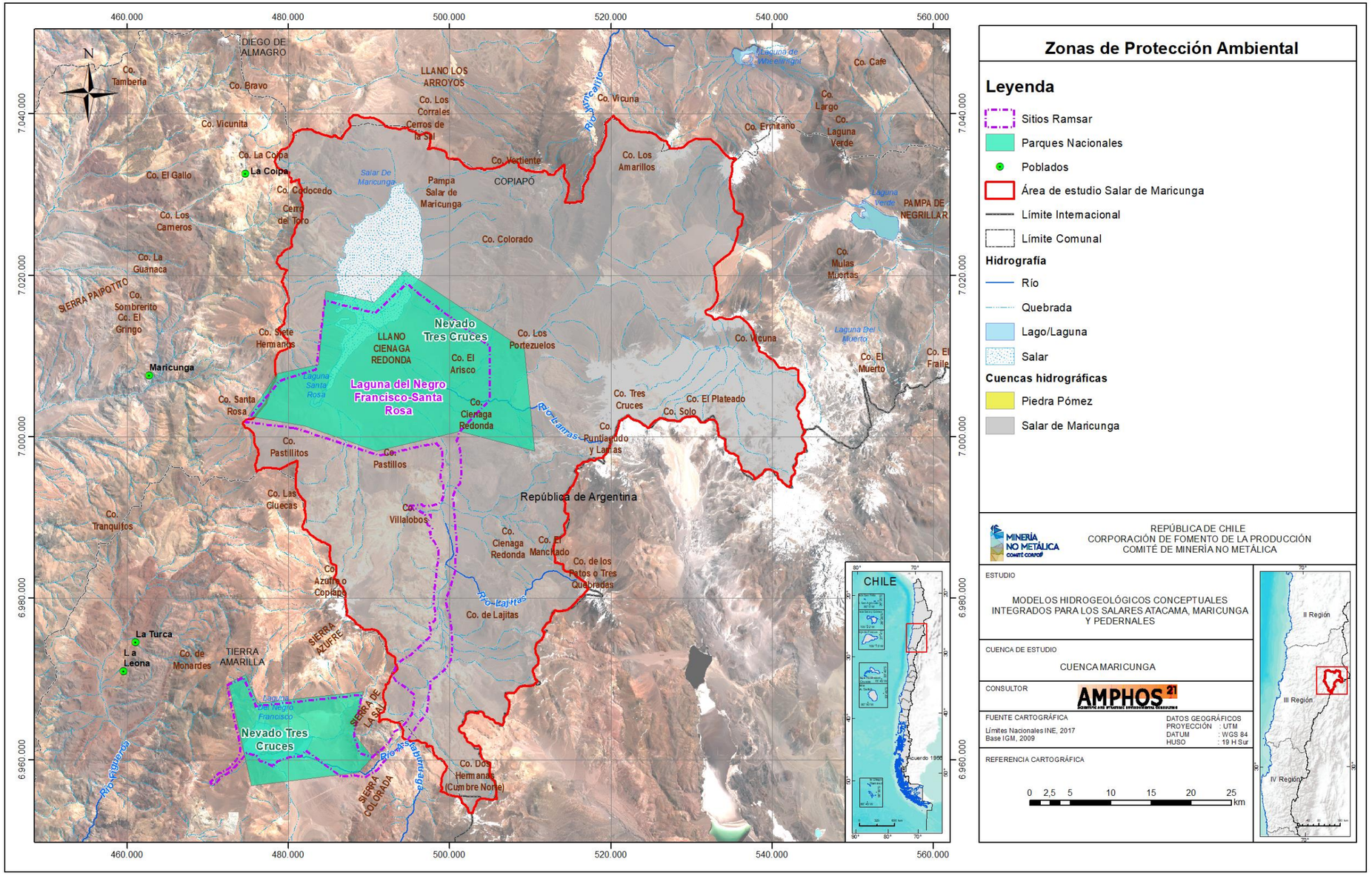


Figura 7-1: Cuenca del Salar de Maricunga y la ubicación de los sitios de protección ambiental.

Fuente: elaboración propia.

7.2 Sectores de explotación y derechos de agua

En cuanto a los derechos de aguas declarados se refiere, en la cuenca del Salar de Maricunga se encuentran derechos declarados por cinco empresas mineras. Estos derechos, extraídos de un total de 34 captaciones, suponen un consumo de 2.497 l/s.

La primera de las compañías, denominada Compañía Minera Mantos de Oro tiene declarados 10 pozos donde extrae 461 l/s. La segunda es KG Minerals LM S.A. con 2 pozos y una extracción de 200 l/s. Posteriormente, la tercera empresa es Andina Minerals Chile Ltda. con 2 pozos y 340 l/s de extracción. La cuarta compañía minera se denomina Bema Gold, la cual tiene 3 pozos y 258 l/s declarados. Finalmente, en cuanto a los derechos de agua en la cuenca de Piedra Pómez, se constata que la Compañía Minera Cerro Casale, posee 17 expedientes de constitución de derechos de agua, con un total de 1.238 l/s en los derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas constituidos. En la Tabla 7-1 se muestran las características de los derechos de agua mencionados.

Cabe destacar, que según la RE (Resolución Exenta) n° 571 del 23 de junio de 2016, Bema Gold (asociados al Proyecto Refugio de Kinross) presenta restricciones en el bombeo, es decir, del total de tres pozos que posee, únicamente puede bombear simultáneamente en dos, con una extracción variable de entre 11,7 y 27,8 l/s. El caudal de extracción varía dependiendo del mes y el caudal que se extrae es utilizado simplemente para efectos de lavado de pilas y abastecimiento de los trabajadores. Por lo tanto, y a modo de resumen, entre las cinco compañías se contabiliza un total de derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas otorgados que asciende a un caudal de extracción de 2.496,62 l/s.

Codigo Expediente Derecho de Agua	Nombre del Usuario	Coordenadas		Minera	Caudal parcial(l/s)	Caudal total(l/s)
		X	Y			
ND-0302-194	COMPAÑIA MINERA MANTOS DE ORO	490.467,72	7.007.325,82	KINROSS-CMM	100	461
M-III-125		490.815,68	7.028.274,74		20	
ND-0302-89		490.946,65	7.029.485,77		30	
ND-0302-194		491.266,72	7.007.674,74		100	
ND-0302-89		491.304,66	7.032.928,85		1	
ND-0302-89		491.959,71	7.031.238,76		30	
ND-0302-194		492.110,74	7.007.956,74		55	
ND-0302-89		493.019,67	7.032.052,79		25	
ND-0302-193		493.816,00	7.013.877,00		50	
ND-0302-193		494.967,00	7.016.023,00		50	
ND-0302-60	KG MINERA LM S.A.	499.375,40	6.992.924,80	KINROSS-CMM	100	200
ND-0302-60		499.474,40	6.992.899,10		100	
ND-0302-556	ANDINA MINERALS CHILE LTDA.	500.131,00	6.985.555,00	ANDINA MINERALS	170	340
ND-0302-556		500.136,00	6.985.260,00		170	
ND-0302-262	MINERA BEMA GOLD (CHILE) LTDA.	495.519,00	6.963.900,00	KINROS-CMM	105	258
ND-0302-249		496.477,00	6.965.442,00		108	
ND-0302-265		496.841,00	6.966.098,00		45	
ND-0302-499	COMPAÑIA MINERA CASALE	514.556,30	7.020.934,10	COMPAÑIA MINERA CASALE	1,02	1237,62
ND-0302-489		516.758,85	7.018.703,92		102	
ND-0302-483		517.572,72	7.020.953,40		120	
ND-0302-492		517.957,70	7.017.958,83		95	
ND-0302-486		518.019,04	7.019.978,57		120	
ND-0302-490		518.863,00	7.022.553,00		108	
ND-0302-494		519.980,84	7.019.957,79		120	
ND-0302-487		520.138,87	7.026.911,22		30	
ND-0302-484		520.279,49	7.030.824,32		20	
ND-0302-485		520.447,00	7.034.569,00		41,6	
ND-0302-488		520.813,03	7.021.707,99		100	
ND-0302-497		520.889,00	7.023.563,00		100	
ND-0302-496		521.926,50	7.019.994,63		30	
ND-0302-491		522.243,49	7.027.237,92		47	
ND-0302-493		528.677,35	7.024.367,53		30	
ND-0302-498		531.330,28	7.026.374,90		130	
ND-0302-495		532.091,59	7.024.666,69		43	
TOTAL					2496,62	2496,62

Tabla 7-1: Características de los derechos de agua en la cuenca del Salar de Maricunga.

Fuente: elaboración propia a partir de datos de la DGA 2017.

8. Determinación de flujos de entrada y salida

A continuación, se presenta una estimación de los principales flujos de entrada y salida al acuífero de la cuenca en estudio. Las entradas al sistema subterráneo se componen de la percolación y los caudales de escorrentía generados en la cuenca. Este último término se incluye como una entrada para a la componente subterránea, ya que la cuenca es endorreica. Lo anterior equivale a suponer que la totalidad o una parte del flujo de escorrentía generado infiltra en su transcurso por los cauces presentes en la cuenca y el caudal restante llega hasta la parte baja de la cuenca donde infiltra recargando al acuífero. Por otro lado, las salidas del sistema subterráneo se componen por la evaporación que ocurre en los salares, vegas, lagunas, y bofedales, así como las extracciones antrópicas que se efectúan en la cuenca.

8.1 Percolación

La percolación de los acuíferos altiplánicos tiene como fuente principal la precipitación que se infiltra en zonas de mayor permeabilidad, favorecida por eventos de mayor envergadura que son capaces de saturar el suelo y conducir agua hasta el acuífero (DGA-DIHA PUC, 2009). En la zona de estudio, la percolación se ha estimado de acuerdo a la metodología para la estimación de la recarga presentada por DGA-DIHA PUC (2009), que considera la litología superficial de las cuencas hidrográficas, la influencia de los cauces en la geomorfología y los montos de precipitación media anual. Se definieron los coeficientes de infiltración y escorrentía a partir de las características de las unidades litológicas presentes en las cuencas hidrográficas analizadas.

A continuación, se presenta la estimación de la percolación media anual, como la suma de una percolación directa en la zona acuífera (Per_D) dada por la precipitación que cae sobre los depósitos sedimentarios, y una percolación en la zona no acuífera (Per_L), producida por la precipitación que cae sobre la roca impermeable o semipermeable de la cuenca aportante. En este sentido las expresiones que se utilizaron para calcular el valor de la percolación son las siguientes:

- **Percolación directa (Per_D)**

$$Per_D = C_{ID} \cdot Pp \cdot A_D$$

- **Percolación lateral (Per_L)**

$$Per_L = C_{IL} \cdot C_{EL} \cdot Pp \cdot A_L$$

Donde Pp es precipitación en la cuenca hidrográfica (LT^{-1}), A_D es el área acuífera (L^2), A_L es el área no acuífera (LT^{-1}), C_{EL} es el coeficiente de escorrentía de la zona no acuífera. El valor del parámetro C_{EL} fue obtenido de los trabajos realizados por DGA-Amphos 21 (2016), en donde se calculó esta variable a partir de los parámetros geomorfológicos (superficie de la cuenca hidrográfica, longitud del cauce principal, ancho equivalente y factor de forma) usando ArcGIS versión 10.3. Finalmente, C_{ID} y C_{IL} son

el coeficiente de infiltración adimensional que DGA-DIHA PUC (2009) ha estimado entre 0,05 y 0,30 dependiendo del grado de permeabilidad y consolidación de la unidad litológica analizada (Tabla 8-1).

Permeabilidad cualitativa	**C_I**
Alta	0,30
Media a Alta	0,25
Media	0,20
Media Baja	0,15
Baja	0,10
Muy Baja	0,05

Tabla 8-1. Valores del coeficiente de infiltración (C_I) en función de la permeabilidad cualitativa.

Fuente: DGA-DIHA PUC (2009) a partir de Xu *et al.* (2005) y Wang *et al.* (2008).

Según el DGA-DIHA PUC (2009), la metodología presentada anteriormente no considera los efectos de la morfología local del terreno y las condiciones de almacenamiento en el suelo, introduciendo cierta incertidumbre a los valores obtenidos. Por lo tanto, se estableció una variación de entre un 5% y un 20% en los coeficientes C_I presentados en la Tabla 8-1, a fin de ajustar los valores medios anuales de la percolación en las cuencas hidrográficas analizadas.

Los valores de C_I de cada tipo de suelo se definió a partir de un cruce entre la calificación de la conductividad hidráulica mostrada en la caracterización hidrogeológica (Tabla 5-1) y los rangos de permeabilidades obtenidos para cada tipo de suelo. A partir de esa comparación se asignó una permeabilidad cualitativa según sea la litología. Considerando esta permeabilidad cualitativa y los valores propuestos en la Tabla 8-1, se asignó un valor de C_I. Finalmente los valores de C_I fueron ajustados como máximo un 20 % en consideración de la incertidumbre inherente a la técnica, asociada a la morfología local del terreno y las condiciones de almacenamiento en el suelo.

En la Tabla 8-2 y la Tabla 8-3 se presentan la litología, los coeficientes adoptados en cada unidad y el porcentaje del área en las cuencas hidrográficas Salar de Maricunga y Piedra Pómez. Posteriormente se calculó un coeficiente de infiltración para la zona acuífera (C_{ID}) y el coeficiente para la zona no acuífera (C_{IL}) de cada cuenca hidrográfica, realizando una suma ponderada por el área de los C_I. Los valores de C_{ID} y C_{IL} obtenidos en cada cuenca hidrográfica se muestran en la Tabla 8-4 y la Tabla 8-3.

Acuífero C_{ID}	**%**	**Permeabilidad**	**No acuífero C_{IL}**	**%**	**Permeabilidad**
Litología			**Litología**		
Aluvial moderno	37	0,20	Rx Sed antigua	35	0,08
Aluvial antiguo	38	0,16	Rx volcánica	60	0,08
Salar	25	0,08	Intrusivos	5	0,02
Promedio	100	0,15	Promedio	100	0,08

Tabla 8-2. Parámetros para la estimación de C_{ID} y C_{IL} en la cuenca hidrográfica Salar de Maricunga

Fuente: elaboración propia.

Acuífero C_{ID}	**%**	**Permeabilidad**	**No acuífero C_{IL}**	**%**	**Permeabilidad**
Litología			**Litología**		
Aluvial coluvial moderno	40	0,21	Aluvial coluvial moderno	15	0,22
Aluvial coluvial antiguos	30	0,16	Aluvial coluvial antiguos	5	0,20
Volcánico fracturado	30	0,12	Avalancha volcánica	1	0,08
-			Depósitos glaciares	1	0,04
			Ignimbrita no soldada	0	0,16
			Ignimbrita soldada	20	0,08
			Intrusivo	0	0,02
			Lavas sanas	32	0,03
			Lavas fracturadas	26	0,12
Promedio	100	0,17	Promedio	100	0,10

Tabla 8-3. Parámetros para la estimación de C_{ID} y C_{IL} en la cuenca hidrográfica de Piedra Pómez

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo a los parámetros calculados, se han obtenidos los valores de percolación en las cuencas hidrográficas en estudio, los cuales se muestran en la Tabla 8-4. En total la percolación en el área de estudio es igual a 716 l/s.

Cuenca hidrográfica	Área Acuífera (Km^2)	Área No Acuífera (Km^2)	P media anual (mm/año)	C_{ID} zona acuífera	C_{IL} zona no acuífera	C_{EL} zona no acuífera	P. profunda directa (l/s)	P. profunda lateral (l/s)	P. profunda total (l/s)
Salar de Maricunga	580	1.629	155	0,15	0,08	0,13	442	82	524
Piedra Pómez	176	740	165	0,17	0,10	0,13	155	50	205
								Total	728

Tabla 8-4. Estimación de la percolación.

Fuente: elaboración propia.

8.2 Escorrentía superficial

La escorrentía superficial se genera por la fracción de la precipitación que no se ha infiltrado ni evaporado al caer sobre el suelo. En este sentido, durante la temporada estival, la escorrentía se alimenta principalmente de los deshielos de la precipitación sólida caída durante el invierno anterior y, en menor medida, a eventos de precipitación líquida asociadas al denominado “Invierno Altiplánico” (DGA-Aquaterra, 2013). Por su parte, durante el invierno, la escorrentía se explica en eventos de precipitación líquida, asociados a contracciones de la isoterma cero, los cuales saturan los estratos superficiales del suelo, generando el escurrimiento superficial en los cauces. Pese a lo anterior, se optó por caracterizar el caudal medio anual del área de estudio, ya que el objetivo es caracterizar esta variable en el largo plazo, por lo que la variabilidad interanual del fenómeno no es considerada para elaborar el modelo conceptual.

Para estimar la escorrentía superficial neta en las cuencas hidrográficas se ha utilizado el método de precipitación-escorrentía descrito por DGA-Aquaterra (2013), el que guarda similitudes con el método DGA-DIHA PUC (2009) para la estimación de la recarga lateral. El método DGA-Aquaterra (2013) se basa en la siguiente relación:

$$Q = C_E \cdot A \cdot Pp$$

Donde Q es el caudal medio anual (L^3/T), C_E es un coeficiente de escorrentía, A (L^2) corresponde al área de la cuenca hidrográfica y Pp (L/T) es la precipitación media anual.

Para la determinación del coeficiente de escorrentía, DGA-Aquaterra (2013) propone:

$$C_E = 0{,}23 \cdot F$$

Con F el factor de forma de la cuenca hidrográfica, dado por:

$$F = \frac{M}{L}\ si\ M < L$$

$$F = \frac{L}{M}\ si\ L < M$$

Dónde L (L) es la longitud del cauce principal y M (L) es el ancho equivalente de la cuenca hidrográfica, definido como:

$$M = \frac{A}{L}$$

Con A (L^2) el área aportante de la cuenca hidrográfica.

Considerando la metodología expuesta, se ha estimado un valor de escorrentía superficial para las cuencas hidrográficas Salar de Maricunga y Piedra Pómez. Los caudales de escorrentía se muestran en la Tabla 8-5, donde se comparan con los valores obtenidos en estudios anteriores. En total el caudal de escorrentía generado en el área de estudio es igual a 1.365 l/s.

Cuenca hidrográfica	Área (km^2)	Pp media anual (mm/año)	C_E	Caudal de Escorrentía			
				DGA 2012 (l/s)	DGA-Aquaterra 2013 (l/s)	DGA-Amphos 2016 (l/s)	Amphos 2017 (l/s)
Salar de Maricunga	2.209	155	0,08	490	1.352	1.066	902
Piedra Pómez	916	165	0,10	231	439	494	463
						Total	1.365

Tabla 8-5. Estimación de escorrentía total y comparación con estudios previos.

Fuente: elaboración propia.

8.3 Balance hidrometeorológico

El balance hidrometeorológico constituye una parte fundamental del modelo hidrogeológico conceptual, ya que explica el comportamiento de las precipitaciones al caer sobre la cuenca aportante al salar. En la Figura 8-1 se presenta un esquema simplificado de la interacción de las variables involucradas en dicho balance. Para su determinación se tomaron en cuenta las variables hidrológicas de precipitación, percolación, evaporación en la superficie aportante y la escorrentía mediante siguiente la expresión:

$$(Pp) - (Per) - (Ev) - (Q) = (\Delta V)$$

Dónde:

Precipitación (Pp): Es el agua que precipita sobre la cuenca. Debido a las bajas temperaturas en la zona, la precipitación puede ocurrir en forma líquida o sólida (nieve). Cuando esta ocurre en forma sólida, se acumulará en la superficie hasta que se derrita o sublime. Cuando ocurre la fusión de nieve, el agua tiene la posibilidad de infiltrar o escurrir por la superficie.

Percolación (Per): Consiste en el agua que infiltra en el suelo y la zona no saturada, llegando hasta el nivel freático. Para el sistema determinado en este balance hidrometeorológico, la percolación sería una de las salidas.

Evaporación real (Ev): Es el proceso de evaporación desde la superficie del terreno. La evapotranspiración potencial (EVP) consiste en el valor máximo que puede tomar la evaporación real, en ausencia de limitantes de disponibilidad hídrica.

Escorrentía o exceso de precipitación (Q): Es la proporción de la precipitación que no se retiene en la superficie del suelo, no se evapora y tampoco se infiltra. El caudal formado por la escorrentía fluye a través de la superficie de la cuenca. Dentro del balance hidrometeorológico de las precipitaciones que caen sobre la cuenca aportante al salar, se considera como una salida.

En la Tabla 8-6 se presentan los resultados de los principales componentes del balance hidrometeorológico obtenidos en las cuencas hidrográficas.

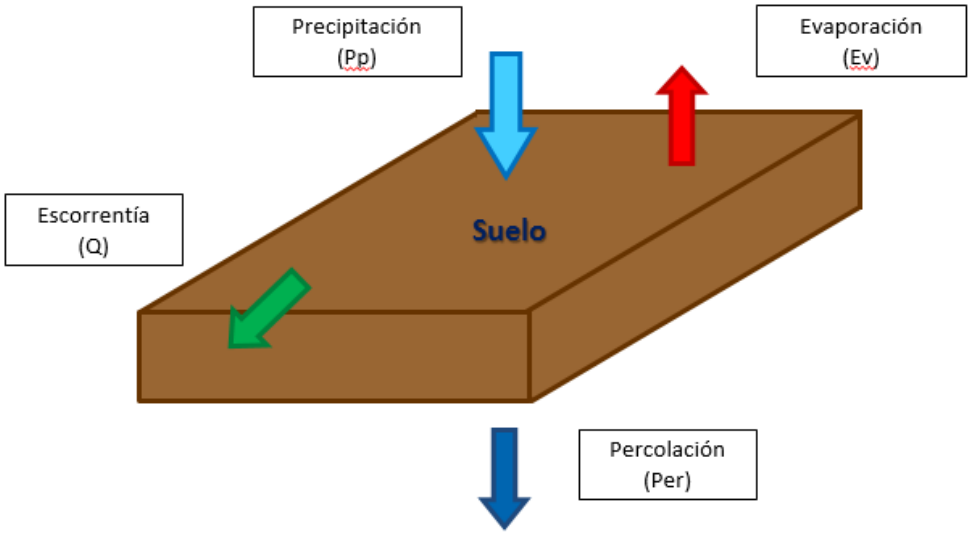


Figura 8-1. Sistema hidrometeorológico simplificado de la precipitación al caer al suelo.

Fuente: elaboración propia.

Cuenca hidrográfica	Área Total (Km^2)	Precipitación media anual (Pp) (l/s)	Percolación (Per) (l/s)	Caudal de Escorrentía (Q) (l/s)	Evaporación (Ev) (%)
Piedra Pómez	916	4.508	205	463	85,2
Salar de Maricunga	2.209	11.572	524	902	87,7

Tabla 8-6. Resultados del balance hidrometeorológico.

Fuente: elaboración propia.

8.4 Evaporación en el salar

Para estimar la evaporación que ocurre en el Salar de Maricunga, se han utilizado las curvas de evaporación presentadas por Johnson (2009), que consideró tres escenarios asociados a las distintas tasas de evaporación que se pueden producir. Cada uno de estos escenarios queda definido por sus respectivas curvas de evaporación en función de la profundidad del nivel freático, las cuales se extienden hasta una profundidad máxima de 2,5 [m]. Los escenarios descritos se presentan, respectivamente, en la Figura 8-2, Figura 8-3 y Figura 8-4.

La metodología descrita por Johnson (2009) fue validada por DGA-Amphos 21 (2016) en la cuenca del salar de Pedernales, contigua por el norte al área de estudio. La validación se realizó en base a mediciones de evaporación recopiladas en cuatro lisímetros.

Para caracterizar la evaporación en el Salar de Maricunga se ha elegido el escenario 3 (Figura 8-4), manteniendo la elección realizada por DGA-Amphos 21 (2016). Esta elección se basa en la ubicación, tipo de suelo y la altitud de la cuenca. De estas variables, la altitud de la cuenca es la que presenta una estrecha relación con la temperatura, la cual influye significativamente en la evaporación.

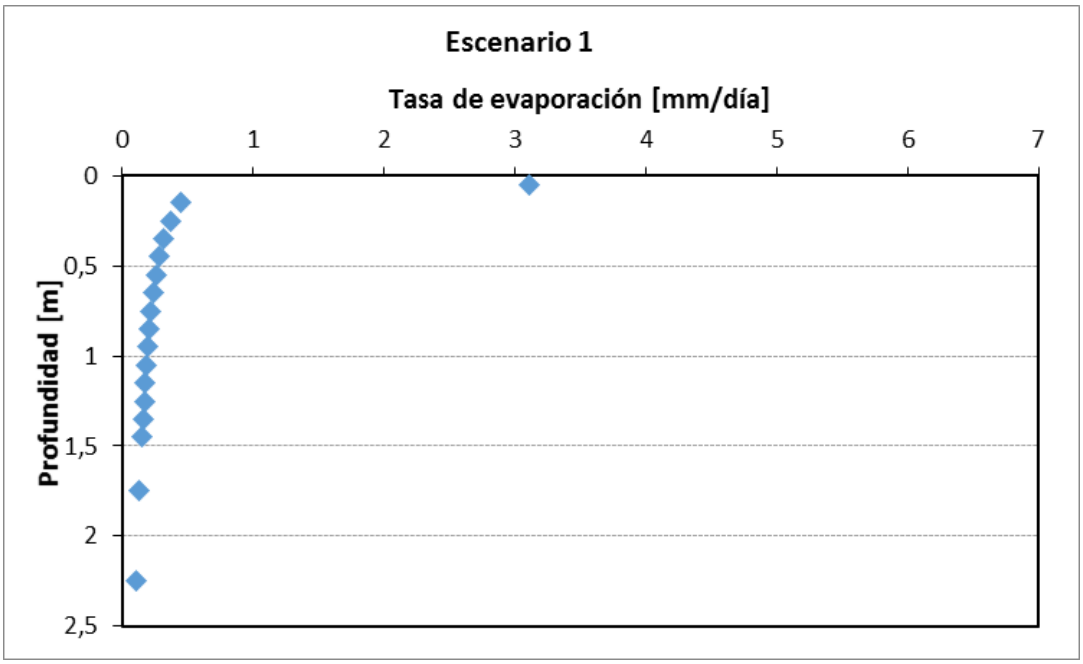


Figura 8-2. Curvas de evaporación v/s profundidad del Escenario 1.

Fuente: DGA-Amphos 21 (2016).

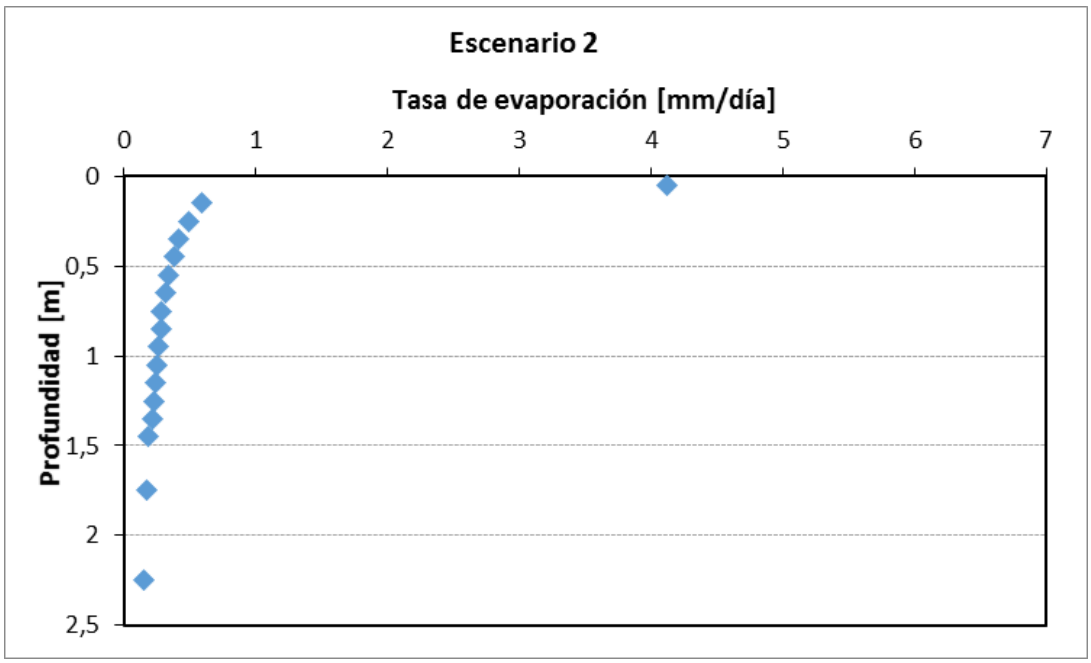


Figura 8-3. Curvas de evaporación v/s profundidad del Escenario 2.

Fuente: DGA-Amphos 21 (2016).

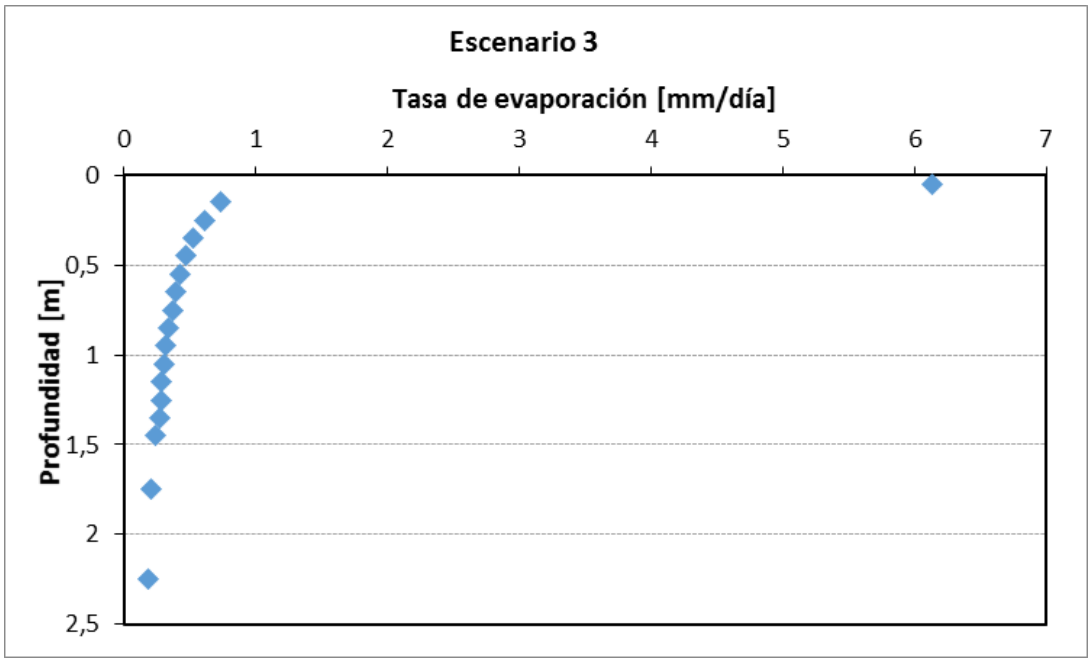


Figura 8-4. Curvas de evaporación v/s profundidad del Escenario 3.

Fuente: DGA-Amphos 21 (2016).

El nivel piezométrico dentro del Salar de Maricunga resulta difícil de caracterizar, ya que presenta una gran extensión (mayor a 100 km^2) y tan sólo cuenta con 13 mediciones de nivel piezométrico. De las 13 mediciones, 10 se ubican en su extremo sur del salar. Sin embargo, es posible aplicar técnicas de análisis de imágenes satelitales que permiten cuantificar partes del salar con presencia de aguas subterráneas someras (Ordoyne and Friedl, 2008; Li et al. 2015). Considerando lo anterior, se optó por caracterizar la superficie evaporante del Salar de Maricunga a partir de un análisis espectral de imágenes satelitales.

La imagen satelital fue obtenida desde el satélite Landsat 8 y fue descargada desde la página https://earthexplorer.usgs.gov/. La fecha de captura desde el satélite el 29-10-2016. Se seleccionó esta fecha ya que no se registraron precipitaciones previas a la fecha de captura de la imagen en más de 10 días. Se realizó una corrección radiométrica de la imagen, la corrección consiste en un proceso que permite convertir la información de las imágenes de cada pixel de “Niveles Digitales” a Niveles de reflectancia captada por el sensor en el tope de la atmosfera. Con esto se trata de disminuir y/o remover el efecto de diferentes ángulos de incidencia de la energía solar y de la distancia Tierra-Sol. Posteriormente se realiza una corrección atmosférica, la cual permite recuperar la radiancia intrínseca del objeto de estudio, obtenida de la señal recibida del sensor.

La primera técnica de análisis utilizada corresponde a una imagen RGB compuesta de infrarrojos (Houston, 2006) (Ver Figura 8-5 b). Esta composición resalta las zonas con abundante agua superficial en color negro, ya que el agua absorbe fuertemente la radiación del espectro infrarrojo. Otras zonas con

evaporación intensa se muestran en tonos de color rojo oscuro. En tonos de rosado y marfil se muestran zonas con una evaporación menor y con mayor presencia de sales. Lo anterior se explica ya que las superficies de suelo con costras salinas presentan una alta reflectancia espectral en las regiones del espectro visible y en el infrarrojo cercano (Howari et al. 2002; Koshal 2012). En tonos de oliva y verde se muestran las zonas de vegas y bofedales. Finalmente, en tonos de azul se muestran las zonas de suelo sin humedad relevante.

Por otra parte, también se calculó el índice normalizado (NDWI por sus siglas en inglés) desarrollado por McFeeters (1996), el cual se muestra en la Figura 8-5 c. Este índice ha sido utilizado ampliamente para detectar agua superficial (Bai *et al.* 2011; Rokni *et al.* 2014). El índice puede oscilar entre valores desde -1 a 1, teniendo en cuenta que resultados mayores a 0 representan cuerpos de agua, mientras que valores negativos cercanos a cero representan altos grados de humedad en el suelo, con napas someras.

Se realizó una clasificación de las áreas considerando la imagen satelital de la zona, las imágenes espectrales generadas (NDWI, composición RGB) y las firmas espectrales detectadas por el satélite. La reclasificación implementada en este estudio permitió determinar las áreas asociadas a superficie libre (NDWI mayor a 0,68), aguas someras (NDWI mayor a cero y menor a 0,68) y aguas profundas (NDWI mayor a -0,08 y menor a cero), ubicadas por sobre la profundidad de extinción de la evaporación. La Tabla 8-7 presenta un resumen con las áreas asociadas a cada zona.

Clase	**Área Total (Km^2)**
Agua superficial	3,68
Suelo con alto contenido de humedad	20,41
Suelo con bajo contenido de humedad	23,65

Tabla 8-7. Clasificación de zonas evaporantes en el Salar de Maricunga.

Fuente: elaboración propia.

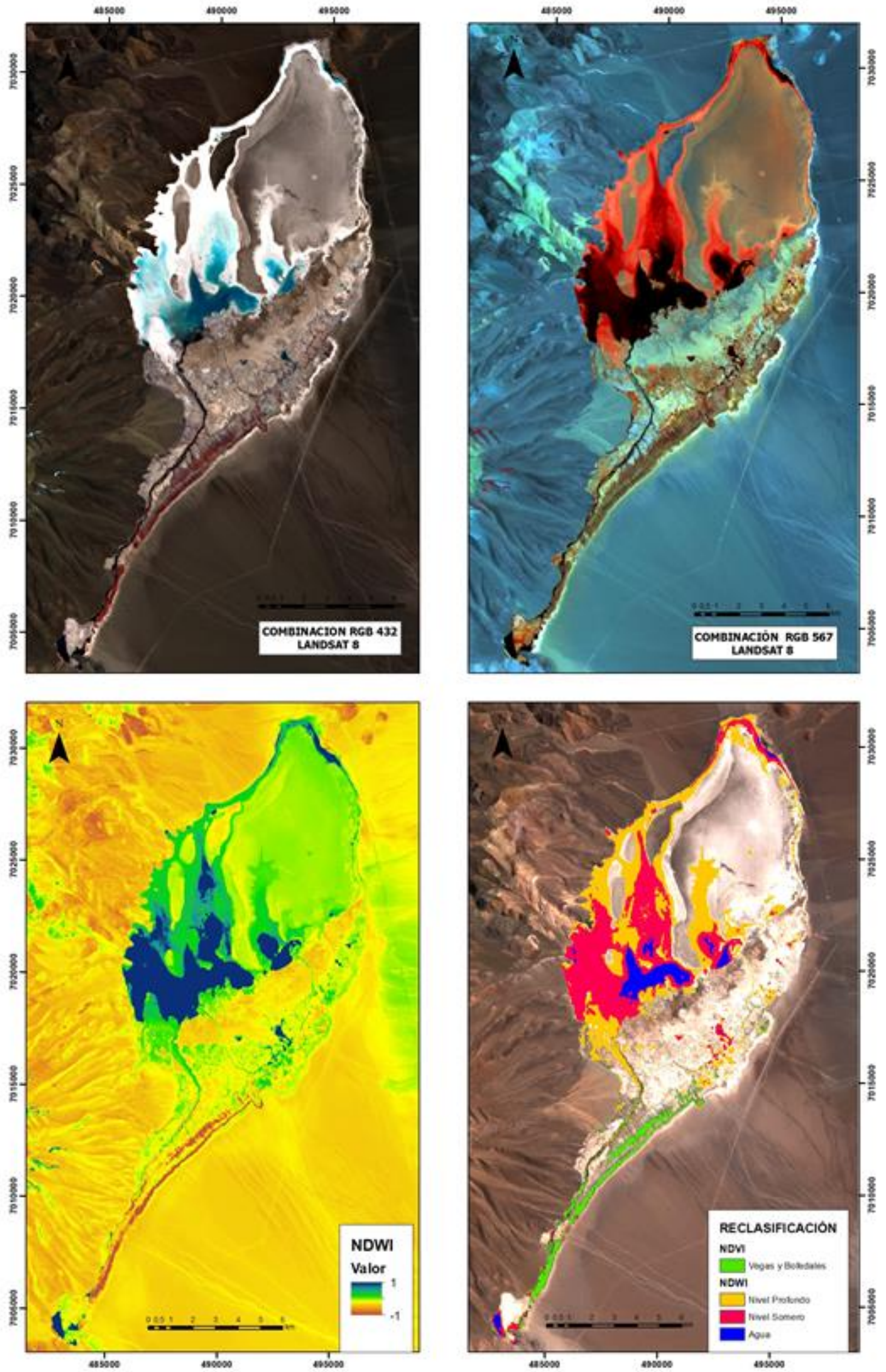


Figura 8-5. a) Imagen satelital. b) Composición RGB de infrarrojos. c) NDWI. d) Reclasificación.

Fuente: elaboración propia.

Se debe considerar que la técnica implementada constituye una herramienta que ayuda a clasificar las zonas de evaporación del salar con presencia de aguas superficiales o con alto contenido de humedad. Sin embargo, se recomienda realizar mediciones de campo de evaporación con domos o lisímetros y mediciones de la profundidad de la napa con punteras en el salar, a fin de mejorar la estimación realizada con esta reclasificación.

Para definir la tasa de evaporación de las zonas obtenidas en la reclasificación, se asocia una profundidad del nivel estático del agua a cada una de ellas. El agua superficial se encuentra representada por una profundidad igual a cero, mientras que, al suelo con alto contenido de humedad se le asignó una profundidad entre 0 y 10 cm. La evaporación en estas zonas se encuentra gobernada por la capacidad evaporante de la atmosfera y se sustenta en la alta absorción del espectro infrarrojo (zonas oscuras en la Figura 8-5 b) y en los valores positivos del NDWI. Finalmente, para los suelos con un bajo contenido de humedad, se asignó una profundidad media igual a un metro. En este último caso, la tasa de evaporación asignada se ve fuertemente influenciada por las características propias del suelo y es poco sensible a la profundidad asignada, debido al alta pendiente de la curva de evaporación (Figura 8-4).

El procedimiento de cálculo ha sido el siguiente:

a) Estimar el área asociada a la zona de evaporación determinada por cada clase i, A_i $[km^2]$.

b) Asociar a cada zona de evaporación una profundidad de la napa representativa.

c) Calcular con la curva del escenario tres, la tasa de evaporación asociada a dicha profundidad según la profundidad media asociada a cada clase, Ev_i $[\frac{mm}{día}]$.

d) Calcular el flujo de evaporación de cada zona, $F_i = A_i \cdot E_{vi}$

e) Estimar el flujo neto del total de las N clases:

$$F_{neto} = \sum_{i=1}^{N} F_i$$

La Tabla 8-8 presenta los valores obtenidos para la estimación de la evaporación desde el Salar de Maricunga. En total la evaporación calculada asciende a 1.797 l/s. Se ha considerado un rango posible de evaporación con el objetivo de abordar la incertidumbre que existe en la clasificación de las áreas y en la asignación de la profundidad asociada. Así, se estima que la evaporación del Salar de Maricunga se encuentra entre 1.750 y 1.900 l/s.

Clase	Área Total (Km^2)	Profundidad (m b.n.t.)	Tasa de Evaporación (mm/d)	Evaporación calculada (l/s)
Agua superficial	3,68	0,0	6,14	262
Suelo con alto contenido de humedad	20,41	0,1	6,14	1.450
Suelo con bajo contenido de humedad	23,65	1,0	0,31	85
			Total	1.797

Tabla 8-8. Evaporación estimada para el Salar de Maricunga.

Fuente: elaboración propia.

8.5 Evapotranspiración en humedales

Se identificaron las zonas de humedales (vegas y bofedales) que se ubican en las cuencas hidrográficas Salar de Maricunga y Piedra Pómez. Para realizar esta identificación se calculó el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI por sus siglas en inglés). Este índice multi espectral fue desarrollado por Tucker (1979) y combina las mediciones de reflectancia espectral de las bandas rojas e infrarrojo cercano (NIR por sus siglas en inglés). El índice NDVI entrega una medida de la actividad fotosintética de la vegetación verde y ha sido utilizado ampliamente para monitorear el comportamiento dinámico de la vegetación (Pettorelli *et al.* 2005; Beck *et al.* 2006; Vrieling *et al.* 2011). A partir de este índice se definieron las áreas con vegetación dispersa o poco vigorosa (NDVI entre 0,2 y 0,4) y áreas con vegetación abúndate y vigorosa (NDVI mayor a 0,4).

La evapotranspiración (ET_C) desde la vegetación se estimó con la ecuación propuesta en el documento FAO 56. La ecuación se presenta a continuación:

$$ET_C = K_c * ET_0$$

Dónde:

- E_{Tc}: Evapotranspiración del cultivo (mm/d).
- Kc: Coeficiente de cultivo (adimensional).
- E_{T0}: Evapotranspiración potencial del cultivo de referencia (mm/d).

Se utilizaron los coeficientes de cultivos reportados por Golder (2017), que fueron homologados desde el trabajo de Salazar *et al.* (1999). A las áreas con vegetación abundante y vigorosa se les asigna un coeficiente de cultivo igual a 1, que corresponde a formaciones vegetales hidrófilas estrictas y de transición. Por otro lado, el coeficiente de cultivo para las áreas con vegetación dispersa o poco vigorosa se les asigna un valor igual 0,5, correspondiente a formaciones vegetales ralas o muy ralas.

La Tabla 8-9 presenta los valores calculados de evapotranspiración en el área de estudio. En total la evapotranspiración es igual a 213 l/s.

Clase	Área Total (Km^2)	Coeficiente de cultivo	Tasa de Evapotranspiración (mm/d)	Evapotranspiración calculada (l/s)
Vegetación abúndate y vigorosa	1,56	1,00	6,14	111
Vegetación dispersa o poco vigorosa	5,73	0,50	3,07	102
			Total	213

Tabla 8-9. Evapotranspiración estimada en el área de estudio.

Fuente: elaboración propia.

8.6 Extracciones antrópicas

Según se indicado en el apartado 7.2, los derechos de aguas constituidos en las cuencas hidrográficas Salar de Maricunga y Piedra Pómez no están siendo explotados actualmente, ya que los proyectos a los cuales están asociados se encuentran con diferentes restricciones ya que o bien no se han iniciado, se encuentran desistidos, sancionados ambientalmente o en paralización temporal de sus actividades. Lo anterior se traduce en que las extracciones antrópicas actuales pueden considerarse iguales a cero, valor que se adopta para el balance.

Ante un eventual escenario en el cual comience la explotación de los derechos constituidos en el acuífero de Piedra Pómez, la disponibilidad de recursos hídricos en el área de estudio podría verse afectada, modificando el balance hídrico de la cuenca.

9. Balance hídrico

Para analizar el balance hídrico de largo plazo en el acuífero de la cuenca Salar de Maricunga (incluyendo la cuenca hidrográfica de Piedra Pómez), se han considerado los principales componentes de la recarga y la descarga, los cuales se detallan a continuación:

Entradas al sistema:

- Percolación: Se distinguen dos casos, la recarga por precipitación que infiltra directamente sobre el suelo permeable y alcanza luego el acuífero (percolación directa) y la recarga por precipitación que cae sobre roca impermeable, fluye sin formar cursos superficiales de importancia, y finalmente se infiltra en el pie de monte (percolación lateral). La suma de ambas según se calculó en el capítulo 8.1 alcanza los **728 l/s.**
- Escorrentía: Constituye una entrada al sistema subterráneo no contabilizada en la percolación y constituye una entrada tratándose de una cuenca endorreica. El término también incluye los flujos superficiales capaces de alimentar directamente al salar (cuando ocurren crecidas importantes). El caudal total por escorrentía según se calculó en el capítulo 8.2 es igual a **1.365 l/s.**

Salidas del sistema:

- Evaporación directa: Se ha efectuado una estimación de la evaporación desde lámina libre y desde el nivel freático somera en el Salar de Maricunga (ver capítulo 8.4), obteniéndose un rango para esta variable de entre **1.750 a 1.900 l/s (1.797 l/s).**
- Evapotranspiración en humedales: Se estimó la evapotranspiración que ocurre en los sectores de humedales en la cuenca aportante al salar (ver capítulo 8.5). Esta variable es igual a **213 l/s.**

El balance hídrico para la cuenca Salar de Maricunga se presenta en la Tabla 9-1. La evaporación desde el salar corresponde a la componente principal de las salidas y presenta una incertidumbre importante en su estimación, debido a la escasa información piezométrica ubicada dentro de la cuenca.

Entradas (l/s)			**Salidas (l/s)**		
Percolación	728	700-765	Evaporación en el salar	1.797	1.750 a 1.900
Escorrentía	1.365	1300-1430	Evaporación en humedales	213	200-225
Total		2000-2195	Total		1950-2125

Tabla 9-1. Balance hídrico en el acuífero del área de estudio.

Fuente: elaboración propia.

La Figura 9-1 muestra una vista esquemática del balance hídrico de la cuenca Salar de Maricunga. A su vez, la Tabla 9-2 presenta una comparación de las estimaciones históricas de la recarga aportante al Salar de Maricunga. Se observa una consistencia en cuanto al porcentaje de la precipitación que aporta al salar, la cual estaría entre un 10 % y un 12 %, con la excepción del estudio DGA-Aquaterra (2013), que propone un valor menor (7 %). Esta discrepancia se explica ya que el estudio de 2013 no considera un aporte desde la cuenca hidrográfica Piedra Pómez hacia el Salar de Maricunga. Así, el estudio DGA-Aquaterra (2013) estimo que 680 l/s se evapotranspiran desde la napa de la cuenca hidrográfica Piedra Pómez, lo que fue descartado en estudios posteriores. Por otro lado, la estimación de la precipitación total sobre la cuenca se mueve en un rango que va de entre 15.500 y 17.300 l/s, con la excepción del estudio elaborado por DGA-DIHA PUC (2009), que entrega caudales menores. Nuevamente la diferencia puede explicarse ya que el estudio citado no considera un aporte desde Piedra Pómez al Salar de Maricunga, por lo que la precipitación total es menor.

Autor	**Precipitación total sobre la cuenca**	**Recarga al salar**	**Porcentaje de precipitación como aporte al salar**	**Evaporación salar**
	(l/s)	**(l/s)**	**(%)**	**(l/s)**
BHCh (1987)	16.663	-	-	-
DGA-DIHA PUC (2009) (*)	11.183	1.280	11	850-1.165
DGA-Aquaterra (2013)	17.334	1.292	7	1.292
DGA- Amphos 21 (2016)	15.648	1.721	11	1.505-1.910
Amphos 21	15.648	1.880	12	1.750-1.900

Tabla 9-2. Estimaciones de recarga al salar.

Fuente: elaboración propia.

(*) El estudio no incluye la cuenca hidrográfica Piedra Pómez.

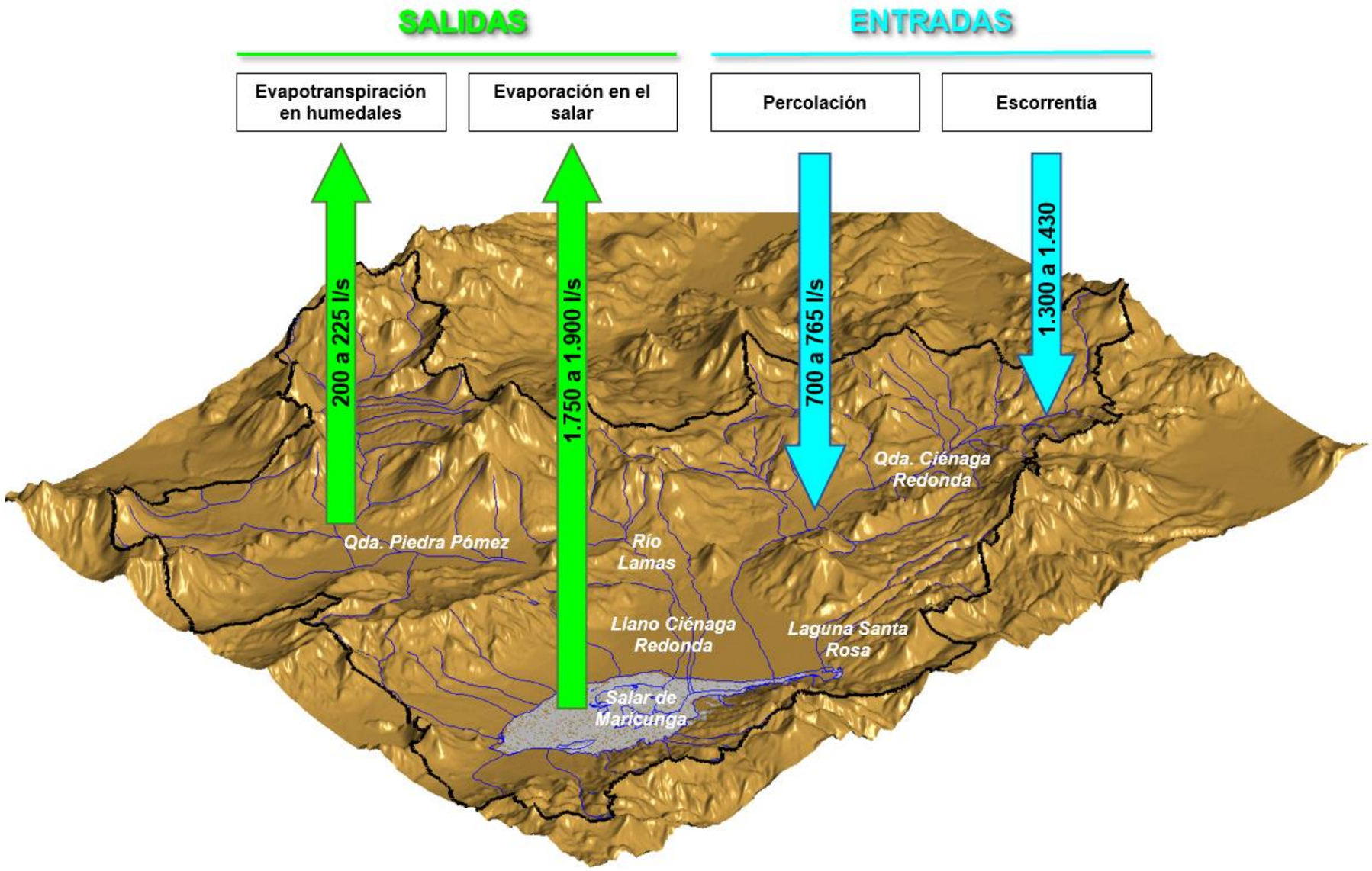


Figura 9-1: Vista esquemática del balance hídrico.

Fuente: elaboración propia.

10. Estimación del potencial de Litio

Los salares constituyen depósitos salinos continentales, los cuales se han formado en cuencas endorreicas y ambientes áridos con tasas de evaporación elevadas. El carácter endorreico y el clima en las cuencas pre-andinas y andinas del norte de Chile han dado lugar a un aumento de la concentración en sales del agua.

En un sistema hidrológico cerrado, la composición de las salmueras depende de las litologías que están siendo lixiviadas en la cuenca de drenaje que rodea los salares (Eugster & Hardie, 1978). Los componentes disueltos en las aguas de aporte en los salares tienen un doble origen: esencialmente, alteración de rocas volcánicas o a la presencia de fluidos de origen hidrotermal (Alonso & Risacher, 1996).

10.1 El litio como recurso

El litio es un metal alcalino que se encuentra naturalmente en compuestos minerales en rocas pegmatíticas, sedimentarias y mayoritariamente en salmueras naturales continentales. Este metal posee propiedades físico-químicas únicas que lo hacen indispensable para aplicaciones de alto nivel tecnológico en la sociedad actual. Se trata del metal sólido más liviano y junto con su alto potencial electroquímico lo convierten en el componente más preciado para las baterías recargables. Además, también tiene importantes usos en la producción de cerámicas y vidrios y en la industria metalúrgica (Figura 10-1-1). A nivel mundial, se estima que Bolivia, seguido por Chile y Argentina son los países con más potencial explotable de Litio, con el 24,2, 21,9 y 19,3 % de los recursos (Figura 10-1-2).

A Nivel de Chile, los salares de Atacama, Maricunga y Pedernales presentan costras salinas bien desarrolladas y las salmueras que contienen son ricas en sólidos disueltos. Concretamente el salar de Atacama corresponde al yacimiento de Li más importante a nivel mundial en dónde se han estimado de 6 a 6,7 millones de toneladas de Li (Enviros, 2008) para la zona en explotación que corresponde a SQM. En este mismo sentido CODELCO ha estimado una potencialidad de 56.000 toneladas de Li en Maricunga y 21.000 toneladas en Pedernales.

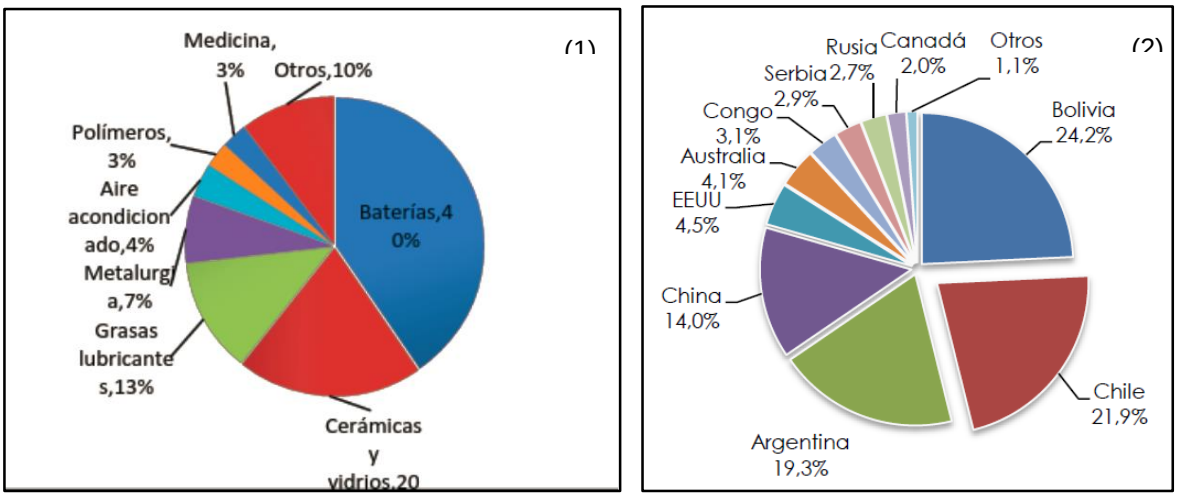


Figura 10-1. (1) Usos de compuestos de Litio por aplicación en 2014. (2) Distribución de los recursos de Litio por país.

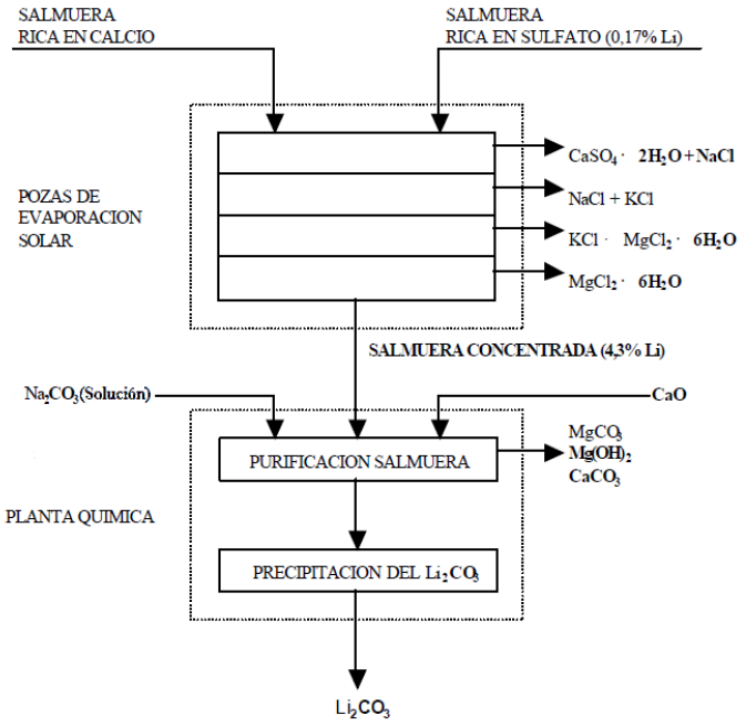
Fuente: (1) SignumBOX Inteligencia de Mercados, 2013. (2) CODELCO-Chile.

A Nivel de Chile, los salares de Atacama, Maricunga y Pedernales presentan costras salinas bien desarrolladas y las salmueras que contienen son ricas en sólidos disueltos. Concretamente el Salar de Atacama corresponde al yacimiento de Li más importante a nivel mundial en dónde se han estimado de 6 a 6,7 millones de toneladas de Li (ENVIROS, 2008) para la zona en explotación que corresponde a SQM. En este mismo sentido CODELCO ha estimado una potencialidad de 56.000 toneladas de Li en Maricunga y 21.000 toneladas en Pedernales.

10.2 Tecnologías de extracción del litio y subproductos

Existen diversas fuentes de explotación de Li, se puede extraer en salmueras, en rocas pegmatíticas o directamente del mineral de Li. A continuación se exponen las diferentes técnicas de extracción de Li en salmueras nivel internacional:

- **Evaporación en pozas**: este es el método más popular y económico, el único usado de Chile, concretamente en el Salar de Atacama. Las salmueras de los salares son extraídas mediante pozos de bombeo y almacenadas en pozas dónde se evaporan y se concentra el litio en varias etapas hasta conseguir una salmuera concentrada con más de 4% de litio. La salmuera concentrada es tratada en una planta química para obtener el precipitado de carbonato de litio Como punto desfavorable, es el método más lento, ya que este proceso se demora de 12 a 24 meses (SERNAGEOMIN 2013).



**1 tonelada Li metálico=5,28 toneladas Li_2CO_3 equivalente.*

Figura 10-2. Proceso de producción de carbonato de litio a partir de salmuera.

Fuente: Cisternas (1999) basado en Lagos (1986).

- **Osmosis inversa**: esta técnica consiste en tratar una salmuera previamente concentrada, con equipos de procesamiento que se encargan de filtrar las sales contenidas en la solución. Posteriormente se purifica creando un carbonato de litio de alta pureza.

  Un ejemplo de salmuera previamente concentrada, podría ser aquella que se obtiene después de usarla como refrigeración den una planta generadora de energía eléctrica. La salmuera queda enriquecida en sólidos disueltos a causa de la evaporación por las elevadas temperaturas y se le puede aplicar osmosis inversa posteriormente para obtener carbonato de litio concentrado.

- **Extracción química**: la multinacional surcoreana POSCO ha desarrollado una tecnología para extraer con un proceso químico el litio de una salmuera, con una efectividad de recuperación de entre el 80 y 99% y reducción del tiempo de recuperación de meses a horas. Esta misma tecnología puede utilizarse para extraer otros sólidos disueltos presentes como son el Mg, K, Ca y B, por ejemplo.

- **Extracción por solvente (SX):** con este método se obtiene a través de la extracción por solventes orgánicos desde salmueras, en el cual se disuelven los iones de litio. Esta tecnología ha sido desarrollada por Bateman Lithium Projects.

10.3 Pureza del concentrado y subproductos

Además del litio, existen subproductos derivados de su producción con cierto valor de mercado que ayudan a abaratar costes de explotación del litio. El potasio, presente como KCl (Figura 10-2), surge como subproducto en las pozas de evaporación y, por lo tanto, la potencialidad del potasio es un factor a tener en cuenta en el momento de valorar la explotación de litio en un salar.

Sin embargo, la pureza del concentrado de litio depende en gran medida de la presencia de cationes de magnesio (Mg^{2+}) ya que, al contrario que con el potasio, éstos encarecen la producción de litio.

Una vez concentrada la salmuera en las pozas, se debe purificar extrayendo el magnesio como hidróxido de magnesio –Mg $(OH)_2$- y Magnesita –Mg CO_3- (Figura 10-2). Este proceso se realiza añadiendo CaO (cal) a la salmuera concentrada al 4% en Li.

Asimismo, el consumo de CaO introduce en la disolución cationes de calcio que igualmente deberán ser extraído ya que, en los procesos finales de carbonatado, las trazas de Mg^{2+} y Ca^{2+} que no hayan podido ser eliminadas, actúan como radicales que precipitan con el carbonato de sodio (Na_2CO_3) más fácilmente que el carbonato de litio (Li_2CO_3), el cual es el producto deseado.

Por lo tanto, cuanto mayor sea el contenido de magnesio, más cantidad de CaO y de Na_2CO_3 se deberá añadir y, por ende, más aumentarán los costes de producción.

10.4 Antecedentes de la estimación del potencial de Litio en el Salar de Maricunga

En el presente apartado, se recogen los antecedentes bibliográficos de los que se dispone en cuanto a la estimación del potencial de litio en el Salar de Maricunga. En la cuenca Salar de Maricunga, se dispone de dos antecedentes, ambos de la Dirección General de Aguas (DGA).

En el año 1982, CORFO realizó un estudio cuyo objetivo era estimar preliminarmente el potencial de Litio en el Salar de Maricunga. Para ello se construyó una malla de catas a 0,5 m de profundidad a lo largo de la costra salina de las cuales se tomaron muestras de las soluciones en cada una de ellas con el objetivo de analizarlas químicamente. Adoptando un coeficiente de almacenamiento de 0,1 constante hasta los 30 m de profundidad y un área de 70,53 km^2 se cubicó de forma preliminar una potencialidad de Litio de 224.000 toneladas con una ley media de 1.060 mg/l.

Posteriormente, en mayo de 2012, Li3ENERGY publicó un reporte en el cual se exploró la salmuera del Salar de Maricunga para estimar la potencialidad del Litio y el Potasio. Las pruebas para obtener valores de porosidad efectiva se realizaron en “Daniel B Stephens Laboratory” en EEUU y se obtuvieron valores de 3,4% para los niveles superiores de halita, 6,1% para las unidades arenosas y 1,2% para los sedimentos arcillosos. En este estudio se resuelve que la Ley de Li es de 1250 mg/l y que en un intervalo de 150 m de profundidad y en un área de 14,38 km^2 existe un potencial de Li de 107.850 toneladas (Tabla 10-1).

K	Li	Mg	Ca	SO_4	B	Mg/Li	K/Li	$(SO_4+2B)/(Ca+Mg)$
8.97	1.25	8.28	12.42	0.72	0.61	6.63	7.18	0.184

g/l

	Lithium		Potassium	
	Measured	Inferred	Measured	Inferred
Area (km^2)	14.38	7.06	14.38	7.06
Depth interval (m)	0-150	150-180	0-150	150-180
Aquifer volume (km^3)	2.157	0.212	2.157	0.212
Avg grade (g/m^3)	50	50	360	360
Lithium metal (t)	107,850	10,590		
Potassium (t)			776,250	76,320

Tabla 10-1. Leyes en mg/l de los diferentes elementos clave y resumen del potencial de Li y K.
Fuente: Li3ENERGY, 2013.

En diciembre de 2013, el SERNAGEOMIN realizó el informe "*Mercado Internacional del Litio*" en el cual se presentó la concentración de Litio en diferentes salares a nivel mundial (Tabla 10-2). Se estimó que en el Salar de Maricunga la concentración media de Litio es de 800 mg/l.

	Salar	País	Li (ppm)	K (ppm)	Mg/Li	Evaporación (mm/a)	Superficie (km2)	Altura (msnm)
1	**Atacama**	**Chile**	**1.500**	**18.500**	**6,4**	**3.700**	**3.000**	**2.300**
2	Pastos Grandes	Bolivia	1.033	7.766	2,2	1.500	100	4.200
3	La Isla	Chile	860	3.170	5,1	1.000	152	3.950
4	Maricunga	Chile	800	7.480	6,6	1.200	145	3.760
5	Salinas Grandes	Argentina	795	9.547	2,7	2.600	212	3.450
6	Olaroz	Argentina	690	5.730	2,4	2.600	120	3.900
7	**Hombre Muerto**	**Argentina**	**690**	**6.100**	**1,4**	**2.775**	**600**	**4.300**
8	**Zhabuye**	**China**	**680**	**s/a**	**0,001**	**2.300**	**243**	**4.420**
9	Sal de Vida	Argentina	660	7.370	2,2	s/a	s/a	4.025
10	Diablillos	Argentina	556	6.206	3,7	s/a	40	3.760
11	Pedernales	Chile	400	4.200	8,7	1.200	335	3.370
12	Diangxiongcuo	China	400	s/a	0,2	2.300	56	4.475
13	Caucharí	Argentina	380	3.700	2,8	2.600	350	3.950
14	Uyuni	Bolivia	350	7.200	19	1.500	12.000	3.650
15	Rincón	Argentina	330	6.200	8,5	2.600	260	3.700
16	Coipasa	Bolivia	319	10.600	45,7	1.500	2.218	3.650
17	**Xitai**	**China**	**310**	**s/a**	**65**	**3.560**	**s/a**	**2.790**
18	**Dongtai**	**China**	**300**	**s/a**	**40-60**	**3.560**	**s/a**	**2.790**
19	SilverPeak	EEUU	230	5.300	1,5	900	80	1.300

Tabla 10-2. Comparaciones relevantes en salares en el mundo.
Fuente: Modificado de CODELCO-Chile con datos de Garrett (2004), Gruber et al. (2011), Mohr et al. (2012), Risacher et al. (1999), Roskill (2013), Yasik&Tilton (2009) e información de empresas mineras.

Paralelamente al estudio anterior, la misma institución realizó el *"Estudio del Potencial de Litio en Salares del Norte de Chile"* (SERNAGEOMIN, 2013) que corresponde al único en su tipo realizado por una institución del estado el cual abarcó 18 salares andinos. En el año 2010, CODELCO-Chile realizó una reevaluación del potencial de Litio existente en el Salar de Maricunga. Según lo recogido por Puig et al. (2012) se tomaros las concentraciones más favorables para un área de 30 km^2 con una potencia saturada en salmuera de 50 m y se le asignó una porosidad del 8%, dando lugar a un potencial de Li de 174.096 toneladas. Además, se indicó también de concentración de Li en la salmuera del salar de Pedernales, estas concentraciones van de 1 mg/l a máximo 1050 mg/l de Li (Tabla 10-3).

SALARES ZONA SUR								
salar	Li (mg/L)		K (mg/L)		Li/K		Li/Mg	
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Aguas Calientes Sur Sur	0,1	8,5	3	1.050	0,03	0,04	0,01	0,09
Pajonales	4,5	57,5	285	2.825	0,02	0,03	0,01	0,03
Gorbea	5	500	25	5.000	0,06	0,2	0,01	0,01
Agua Amarga	13,7	60,5	185	2.035	0,03	0,08	0,01	0,05
La Isla	13	1.150	42	108.000	0,01	0,31	0,14	0,22
Aguilar	350	375	2.600	2.600	0,14	0,14	0,05	0,06
Parinas	7	400	41	6.000	0,07	0,19	0,1	0,11
Grande	4	123	176	2.770	0,0004	0,02	-	-
Pedernales	130	423	-	-	0,07	0,08	-	-
Maricunga	1	1.050	-	-	0,14	0,18	-	-

Tabla 10-3. Concentraciones de Li y K en los salares del norte de Chile, sector zona S.

Fuente: modificado de SERNAGEOMIN, 2013.

Más recientemente en 2017, LITHIUMPOWER INTERNATIONAL LTD realizó una exploración en la zona norte del Salar de Maricunga de la cual se valoró el potencial de Li en dos escenarios, condicionados por la porosidad efectiva y el volumen de salmuera (Tabla 10-4).

- Rango superior: se consideró una porosidad efectiva del 10% y un volumen de salmuera en la zona oeste y central de 428,3 m^3 y 42,3 m^3 respectivamente. A partir de estos datos se estimó que el potencial de Li es de 470.000 toneladas.
- Rango inferior: se consideró una porosidad efectiva del 6% y un volumen de salmuera en la zona oeste y central de 257 m^3 y 25,4 m^3 respectivamente. A partir de estos datos se estimó que el potencial de Li es de 195.000 toneladas.

Subarea	Area km^2	Thickness m	Mean drainable porosity %	Brine volume million m^3	Lithium Concentration mg/L	Contained Lithium tonnes
						UPPER RANGE SCENARIO
Western	4.23	100	10%	42.3	1,000	40,000
Central	21.41	200	10%	428.0	1,000	430,000
	Continues from directly below the resource					**470,000**
						LOWER RANGE SCENARIO
Western	4.23	100	6%	25.4	600	15,000
Central	21.41	200	6%	257.0	700	180,000
	Continues from directly below the resource					**195,000**

Tabla 10-4. Estimación del potencial de litio en función de la porosidad efectiva y el volumen de salmuera.

Fuente: modificado de Li3ENERGY 2017.

Después de exponer los antecedentes disponibles, se procede a indicar en una tabla resumen (Tabla 10-5) los potenciales de litio expuestos por cada autor/institución y los parámetros utilizados por cada uno de ellos.

	Ley de Li (mg/l)	Porosidad efectiva (%)	Área contemplada (km2)	Espesor (m)	Volumen salmuera (km3)	Potencial de litio (t)
CORFO (1982)	1060	10	70,53	30	2,1159	**224285**
Li3ENERGY (2012)	1250	4	14,38	150	2,157	**107850**
Puig et al. (2012)	1450	8	30	50	1,5	**174000**
LITHIUMPOWER (2017)	600	6	4,23	100	0,423	**195000 (suma de los dos volúmenes contemplados)**
	700	6	21,41	200	4,282	

Tabla 10-5. Tabla resumen del potencial de litio recopilado en los antecedentes.

Fuente: elaboración propia.

Como se observa en la Tabla 10-5, existen diferencias entre la porosidad efectiva adoptada, las áreas y espesores de salmuera contempladas y las Leyes de Li. Sin embargo, el potencial de Li coincide en su mayoría alrededor de las **200.000 toneladas de Li metálico**.

10.5 Estimación del potencial de litio en el Salar de Maricunga

La estimación preliminar del potencial de litio se ha realizado teniendo en cuenta el modelo conceptual hidrogeológico de la cuenca (funcionamiento y geometría de los acuíferos e identificación de la salmuera), las porosidades efectivas recopiladas y las concentraciones de litio obtenidas con la hidroquímica recopilada y revisada.

El volumen del acuífero que contiene a la salmuera se ha definido a partir de la información recopilada de los sondajes, la geofísica disponible y de la proyección de la cuña salina. Una vez conocido el volumen de salmuera se ha aplicado el coeficiente de almacenamiento (en acuíferos libres el coeficiente de almacenamiento es similar a la porosidad efectiva) para determinar el volumen de almacenamiento del acuífero. Los valores adoptados de porosidad provienen mayoritariamente del estudio de Li3ENERGY realizado en 2012, en el cual se recopilaron un total de 318 ensayos con datos de porosidad efectiva (Tabla 10-6).

Tipología de litologías dominante en el Salar	**Potencia valorada (m)**	**Porosidad efectiva (%) Fuente Li3ENERGY**	
halita + limos	35 m	Valor unitario mín.	0,2
		Valor unitario máx.	20,3
		Promedio total	3,1
sedimentos finos	65 m	Valor unitario mín.	0,1
		Valor unitario máx.	6,6
		Promedio total	1
costra halita profunda	Cuerpo de halita situado entre medio de los sedimentos finos (20 m)	.	4
Sedimentos detríticos profundos	100 m	.	0,0005*
Número de datos			318
*Se considera que estos materiales se encuentran confinados por las arcillas/limos de base de la formación aluvial del Llano Ciénaga Redonda y de la Pampa Maricunga. Por ello se considerarán los rangos de porosidad efectiva/coeficiente de almacenamiento próximas de un acuífero confinado (0,001 a 0,0001).			

Tabla 10-6. Porosidades efectivas adoptadas para las diferentes litologías.

Fuente: elaboración propia a partir de datos de Li3ENERGY 2012.

Nota: El promedio se realizó con todas las muestras de las cuales se disponían datos de porosidad efectiva.

Para la estimación del potencial del litio se debe considerar el contenido de litio en la salmuera, dicha información se ha obtenido con los datos de hidroquímica que se encuentran detallados en el capítulo 6 del presente informe. De la información hidroquímica recopilada se ha observado que la concentración de litio es muy variable en las diferentes partes que conforman el salar por ello se han considerado tres sectores (sector Norte, Sur y Oriental) en función de las concentraciones de litio (Tabla 10-7 y Figura 10-3).

Sectores de distribución de litio	Área (Km^2)	Valores promedio concentración de litio (mg/l)
Sector Norte	83,6	928
Sector Sur	61,5	14
Sector Oriental	87,2	

Tabla 10-7. Áreas y concentraciones de litio para los diferentes sectores.

Fuente: elaboración propia.

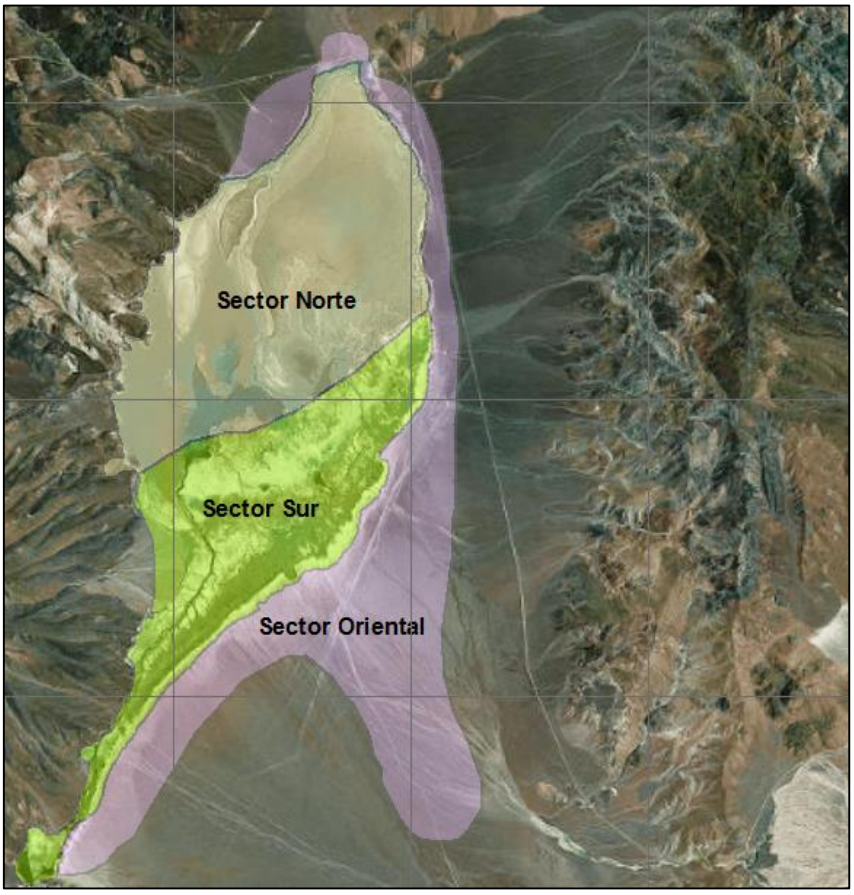


Figura 10-3. Distribución de la sectorización del litio en salar.

Fuente: elaboración propia.

En el volumen almacenado total de salmuera resultante se ha diferenciado en 5 volúmenes (I al V) en función de su litología y porosidad efectiva/coeficiente de almacenamiento (Figura 10-4) y teniendo en cuenta la sectorización en relación a la concentración de litio. A continuación se definen las características de los volúmenes mencionados:

- **Volumen I:** este volumen abarca la capa más superficial y está formado por una secuencia de halita y limos cuya potencia es de 35 m. La porosidad efectiva asignada es de 3,1 % (Tabla 10-6). En su distribución en planta, se encuentra en los sectores denominados Norte y Sur en relación a su concentración en litio (Tabla 10-7). Asumiendo la potencia, porosidad y sectorización mencionados se obtiene como resultado un Volumen I de salmuera almacenada de 0,0907 Km3 en el Sector Norte y 0,0668 Km^3 en el Sector Sur (Tabla 10-8).
- **Volumen II:** subyacente al Volumen I se encuentra una secuencia de materiales finos los cuales se dimensionan en profundidad hasta los 100 m y cuyo espesor es de 65 m. La porosidad efectiva asignada es del 1%. El Volumen II presenta una concentración de litio atribuible a los sectores Nortes y Sur. El Volumen II de los Sectores Norte y Sur es de 0,0543 Km^3 y 0,04 Km^3 respectivamente (Tabla 10-8).
- **Volumen III:** este volumen corresponde a una secuencia detrítica que se extiende hasta los 200 m desde la base del Volumen II, su potencia es de 100 m. En cuanto a la porosidad efectiva, se ha considerado que estos materiales podría comportarse como confinados debido a las características de finos materiales suprayacentes y/o a la presión que ejercen, por ello se le ha asignado un coeficiente de almacenamiento entre 0.001 a 0,0001, siendo el valor promedio 0,0005. El Volumen III en el Sector Norte es de 0,0042 Km^3 y de 0,0031 Km^3 en el Sector Sur (Tabla 10-8).
- **Volumen IV:** está representado por un cuerpo de halita que se encuentra intercalado dentro del Volumen II con un espesor de 20 m (M_REF.060 y M_REF.069). La porosidad efectiva adoptada para este volumen es del 4% (Li3ENERGY, 2012 M_REF.060). Este Volumen IV se ha identificado únicamente en el Sector Norte y representa un volumen almacenado de salmuera de 0,0032 Km^3 (Tabla 10-8).
- **Volumen V:** este volumen se sitúa en la zona oriental del salar, donde se ha proyectado en planta la cuña salina, y su espesor es de 200 m a partir de los rellenos aluviales del Llano de Ciénaga Redonda y Pampa Maricunga (perfil TEM 29, KINROSS 2010, M_REF.028). Adicionalmente, se ha considerado que estos materiales están confinados por la base de arcilla de la formación de los materiales aluviales que los sobreyacen en el Llano de Ciénaga Redonda, por ello se le ha asignado un coeficiente de almacenamiento de 0.001 a 0,0001, siendo el valor promedio 0,0005. Este Volumen V representa un volumen almacenado de salmuera de 0,009 Km^3 (Tabla 10-8).

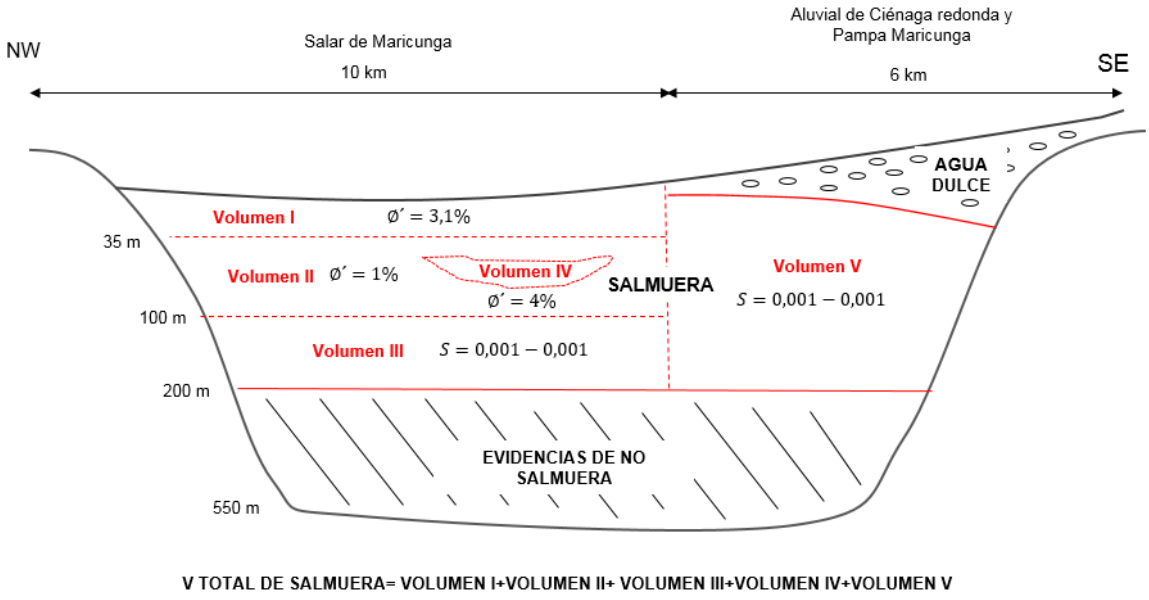


Figura 10-4. Esquema en profundidad de los volúmenes definidos.
Fuente: elaboración propia.

Una vez conocidos volúmenes almacenados de salmuera se ha estimado el potencial realizando un promedio de las concentraciones en los diferentes sectores.

- Sector Norte: en este sector se ha realizado un promedio con 44 datos los cuales han dado una concentración de litio de 928 mg/l.
- Escenario Sectores Sur y Oriental: en este caso se ha realizado el promedio con los dos sectores ya que se ha observado en la química que los rangos de valores son similares. El promedio de concentración de litio que se atribuye de los 42 datos de los que se dispone es de 14 mg/l de litio.

Una vez realizados los cálculos, se ha obtenido un potencial de **143.128 toneladas (Tn) de litio**. El desglose de los cálculos realizados se presenta en una tabla resumen (Tabla 10-8).

Cabe destacar que por la falta de información geológica e hidroquímica ha sido necesario interpretar determinados aspectos de esta estimación. Las incertidumbres existentes tienen que ver principalmente con los espesores de la litología que contiene a la salmuera, la porosidad a asignar a cada uno de ellos y la concentración de litio adoptada en cada caso. Las potencias de los Volúmenes I, II y IV han sido asignadas a partir de los sondajes de los pozos que llegan máximo hasta los 200 m de profundidad (Li3ENERGY, 2012 M_REF.060), mientras que los Volúmenes III y V se han interpretado a partir de información geofísica. Asimismo, la concentración de litio se ha extrapolado a partir de la información hidroquímica existente y no es suficiente para poder hacer una estimación en detalle de la potencialidad del litio en el Salar de Maricunga.

POTENCIALIDAD DE LITIO	**Sector Norte (928 mg/l)**	**Área asignada (Km^2)**	**Volumen almacenado de salmuera (Km^3)**	**Tonelaje (mg)**	**Tonelaje (Tn)**	**TOTAL Tn SECTOR NORTE**
	Volumen I (35 m halita con finos con 3,1% de porosidad)	83,61	0,0907	8,42E+13	84.185	**141.468**
	Volumen II (65 m de sedimentos finos con 1% de porosidad)		0,0543	5,04E+13	50.434	
	Volumen III (100 m de sedimentos detríticos con 0,0005 de S)		0,0042	3,88E+12	3.880	
	Volumen IV (20 m de cuerpo de halita profunda con 4% de porosidad)	4	0,0032	2,97E+12	2.970	
	Sector Sur (14 mg/l)	**Área asignada (Km^2)**	**Volumen almacenado de salmuera (Km^3)**	**Tonelaje (mg)**	**Tonelaje (Tn)**	**TOTAL Tn SECTOR SUR**
	Volumen I (35 m halita con finos con 3,1% de porosidad)	61,53	0,0668	9,35E+11	935	**1.538**
	Volumen II (65 m de sedimentos finos con 1% de porosidad)		0,040	5,60E+11	560	
	Volumen III (100 m de sedimentos detríticos con 0,0005 de S)		0,0031	4,31E+10	43	
	Sector Oriental (14 mg/l)	**Área asignada (Km^2)**	**Volumen almacenado de salmuera (Km^3)**	**Tonelaje (mg)**	**Tonelaje (Tn)**	**TOTAL Tn SECTOR ORIENTAL**
	Volumen V (200 m de halita-finos confinados con 0,0005 de porosidad)	87,2	0,009	1,22E+11	122	**122**
					TONELAJE TOTAL (Tn)	**143.128**

Tabla 10-8. Desglose de los cálculos realizados para estimar la potencialidad del Li en el Salar de Maricunga

Fuente: elaboración propia.

11. Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común (SHAC)

Según Reglamento sobre normas de exploración y explotación de aguas subterráneas (Decreto Supremo N° 203, de 20 de mayo de 2013) define como Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común (SHAC) como "*Acuífero o parte de un acuífero cuyas características hidrológicas espaciales y temporales permiten una delimitación para efectos de su evaluación hidrogeológica o gestión en forma independiente".*

En el presenta capítulo se presentan los antecedentes que existen sobre los SHAC de la cuenca Salar de Maricunga, la definición de los distintos SHACs propuesta, para este informe, por Amphos 21 y la comparación entre ambas.

11.1 Zonificación de la DGA (2006)

La Dirección General de Aguas (DGA), en su informe "Análisis de la Situación Hidrológica e Hidrogeológica de la Cuenca del Salar de Maricunga, III Región" (S.D.T. N°225, año 2006), presenta zonificaciones con el objetivo de realizar un balance hídrico, precisando la disponibilidad de aguas tanto a nivel local como de la cuenca completa. Estas zonificaciones han sido definidas por criterios hidrológicos e hidrogeológicos. A continuación, se describen las características de las 5 zonas definidas por la DGA y que se presentan en la Figura 11-1:

- Zona Z0: parte de la cuenca Laguna del Negro Francisco, aledaña a nuestra zona de estudio, que aporta escorrentía subterránea hacia la cabecera de Ciénaga Redonda. Por este último motivo, se contempla en el análisis.
- Zona Z1: define la subcuenca de cabecera de Ciénaga Redonda y se prolonga hasta un poco después de las estaciones fluviométricas: "Barros Negros antes junta con Valle Ancho" y "Valle Ancho antes junta con Barros Negros".
- Zona Z2: corresponde a la subcuenca baja de Ciénaga Redonda y se extiende hasta su desembocadura, en las cercanías de la estación fluviométrica "Valle Ancho en Barrera".
- Zona Z3: corresponde al resto de la cuenca aportante al Salar de Maricunga, descontada la subcuenca de Ciénaga Redonda.
- Zona Z4: corresponde al área del Salar donde es posible cuantificar la evaporación para cerrar el balance hídrico.

11.2 Propuesta de SHAC por Amphos 21 (2018)

De los resultados y conclusiones del estudio de caracterización y modelación conceptual en la cuenca hidrogeológica Salar de Maricunga (constituida por las cuencas hidrográficas de Maricunga y Piedra Pómez) se proponen los siguientes Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común (SHAC) representados en la Figura 11-1.

- **SHAC 1 (Sector Salar de Maricunga):**

  El sector SHAC 1 representa la zona de menor elevación topográfica de la cuenca y las aguas de escorrentía superficial, procedentes de las precipitaciones y el flujo subterráneo, convergen y descargan en la zona del Salar de Maricunga:

  - El N del salar es drenado por la recarga distribuida tanto al N, como NE del Salar (Llano de quebrada Caballo Muerto y Pampa Salar Maricunga).
  - La parte S del Salar, donde se localiza la Laguna de Santa Rosa y el Llano de Ciénaga Redonda, es alimentada subterráneamente por el SHAC 2, además de las quebradas Santa Rosa, La Coipa y Pastillos y la zona de recarga procedente del SE, que incluye al río Lamas.

  Con la finalidad de gestionar el SHAC 1 sería necesario realizar un monitoreo de los niveles de agua a lo largo del margen E del salar y de la Laguna Santa Rosa.

  Es importante mencionar que en este SHAC coexisten aguas dulces a salobres, provenientes de las zonas de recarga, con salmueras derivadas del mismo Salar. Para la gestión del agua en las cercanías del Salar, se debe tener en cuenta que estas últimas se distribuyen por debajo del agua dulce, formando una cuña salina en profundidad donde el agua dulce, menos densa que la salmuera, tiende a flotar y permanecer por sobre ésta. En la Figura 11-1 se presenta, también, la extensión de la cuña salina en profundidad (ver capítulo 5.3.2 para mayor detalle).

- **SHAC 2 (Sector Ciénaga Redonda):**

  Este sector se encuentra al S del Salar de Maricunga, limitado al W por la Cordillera Domeyko y al E por el Cordón Andino. En la zona central del SHAC 2 se sitúan los materiales no consolidados que dan lugar a un acuífero aluvial, con una morfología estrecha, ubicado en la quebrada Ciénaga Redonda. Las precipitaciones en esta zona se evaporan o convergen en la misma quebrada, descargando por el N, hacia el Salar de Maricunga.

  En esta zona, los derechos de agua existentes están asociados a la empresa minera Kinross. Para gestionar la cuenca se deben monitorear los niveles de agua en el entorno de los humedales que afloran a lo largo de todo el SHAC 2, para vigilar que no se afecten.

- **SHAC 3 (Sector Piedra Pómez):**

  La extensión del sector SHAC 3 está representado por la cuenca hidrográfica Piedra Pómez, situada al E del Salar de Maricunga. El acuífero presente en este SHAC está conectado hidráulicamente con el acuífero aluvial de Maricunga al E y al S y existe cierto flujo que pasa de Piedra Pómez a Maricunga.

  Mencionar que en la cuenca hidrográfica de Piedra Pómez tiene derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas solicitadas por Cerro Casale, pero no se encuentran en fase de explotación debido a que aún no disponen con los permisos ambientales. Por ello, es necesario monitorear el flujo subterráneo midiendo los niveles en el epicentro de la Subcuenca de Piedra Pómez y además en la zona de conexión con la Subcuenca Salar de Maricunga.

11.3 Comparación Zonificación de DGA y SHAC de Amphos 21

Se han realizado una serie de observaciones a las zonificaciones propuestas por la DGA (2006) con el objetivo de mejorar y simplificar el manejo del agua en los SHAC.

- **Respecto a la Z0:** Si bien se ha identificado por diversos autores un leve desplazamiento hacia el NE de la divisoria hidrogeológica respecto a la hidrológica (e.g. Sernageomin, 1998 en su mapa Hidrogeológico de la Laguna del Negro Francisco; DGA, 2006 y en DGA-Amphos 21, 2016) debido a una singularidad geológica, detectada mediante geofísica e interpretada como coladas de lavas miocenas que conformarían una barrera hidrogeológica entre ambas cuencas (DGA-Amphos 21, 2016), el caudal aportante hacia la cabecera de Ciénaga Redonda no sería significativo (80 l/s, según DGA, 2006).

  Teniendo en consideración lo recién descrito, se sugiere que esta zonificación forme parte de un SHAC específico para la cuenca de la Laguna del Negro Francisco, debido a que prácticamente la totalidad del caudal del río Astaburuaga se infiltra en el llano del Negro Francisco para luego descarar en la laguna homónima.

- **Respecto a la Z1 y Z2:** Se sugiere la unificación de estas zonificaciones debido a que ambas pertenecen al SHAC 2 definido en la sección previa. La justificación viene dada por el funcionamiento hidrológico e hidrogeológico común de todo el sector denominado Ciénaga Redonda, con lo que cualquier afectación de una de las dos zonas perturbará inevitablemente al funcionamiento de la otra.

- **Respecto a la Z3:** La definición original incluye parte del extremo occidental de la cuenca hidrográfica Piedra Pómez. A pesar de que, efectivamente, se propone una conexión subterránea entre ésta y la cuenca hidrográfica del Salar de Maricunga, en el estrechamiento que ocurre en las nacientes del río Lamas, se sugiere una modificación a los límites de la Z3.

El límite natural entre las cuencas hidrográficas Piedra Pómez y Salar de Maricunga corresponde a la Cordillera Claudio Gay: un cordón montañoso con orientación N-S compuesto por una compleja sucesión de rocas afectadas por fallamientos inversos de escama gruesa, también de orientación N-S, que han expuesto parte del basamento paleozoico en el sector (rocas muy antiguas que datan hasta 350 millones de años). Esta particularidad geológica define una barrera natural que impide el flujo de agua en dirección perpendicular a la Cordillera Claudio Gay, es decir en dirección E-W. Sin embargo, diferentes autores (e.g. Sernageomin, 2006; DGA-Amphos 21, 2016) han sugerido una conexión puntual entre las cuencas en el sector de las nacientes del río Lamas, cuyo caudal real aún es motivo de discusión.

En base a este argumento, se sugiere modificar los límites de la Z3, ajustándolos al límite hidrográfico entre las cuencas. De esta manera, la gestión del agua en la cuenca hidrográfica Piedra Pómez quedaría supeditado al SHAC 3, mientras que el de la cuenca hidrográfica Salar de Maricunga al SHAC 1.

- **Respecto a la Z4:** Se sugiere considerar e incluir la proyección de la cuña salina en profundidad. Esto en base a que cualquier extracción de agua en el perímetro cercano al salar deberá tener en cuenta una posible contaminación de la salmuera profunda.

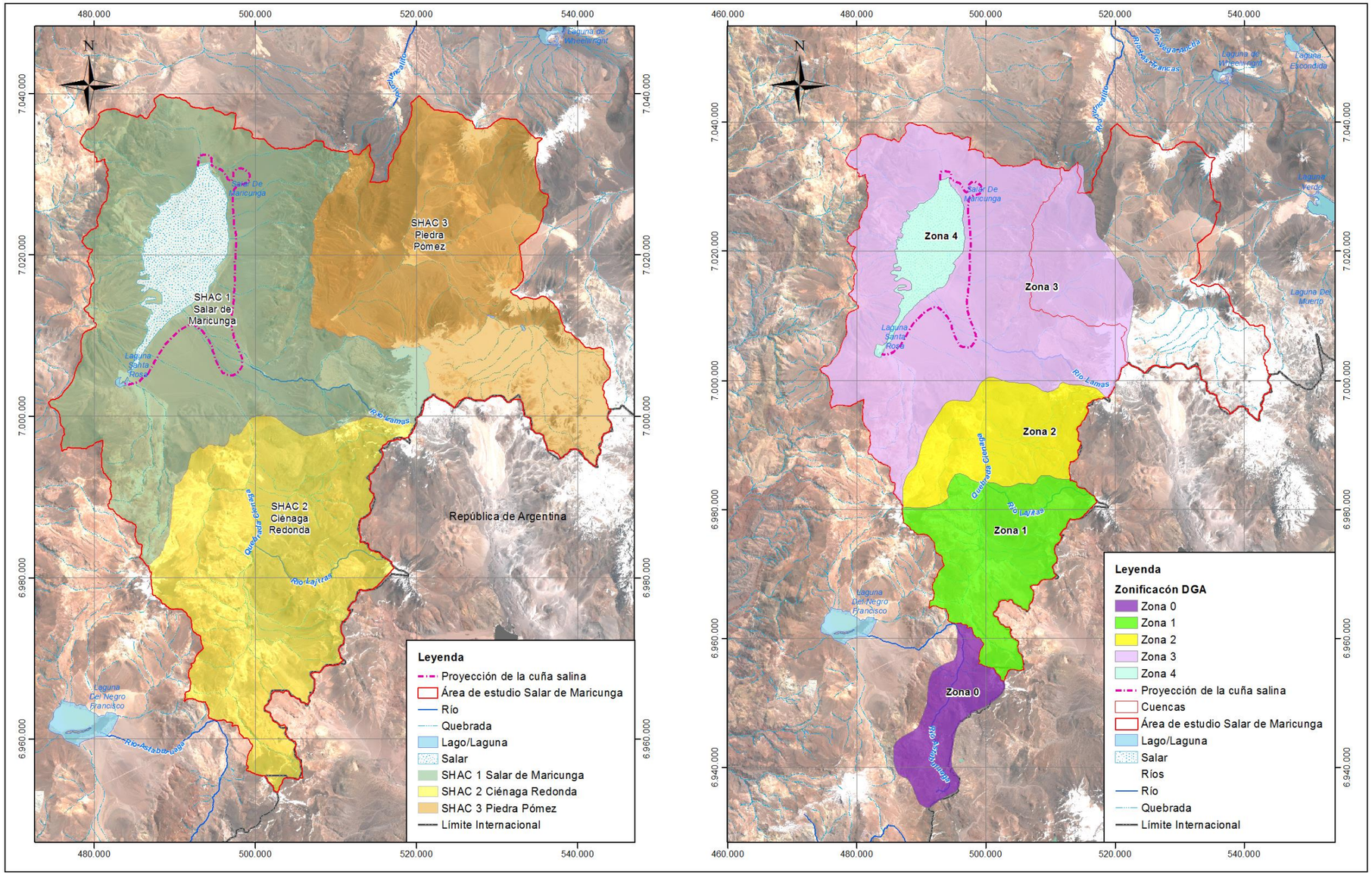


Figura 11-1: Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común (SHAC) y Zonificación de la DGA (2006) en la cuenca Salar de Maricunga
Fuente: elaboración propia

12. Evaluación de la plataforma para la modelización numérica de flujo

En cuencas como la del Salar de Maricunga, donde coexisten acuíferos de salmuera y de agua dulce-salobre se generan zonas de densidad variable. En estos casos es necesario modelizar teniendo en cuenta dichas condiciones, además de caracterizar otras particularidades de la cuenca como la existencia de diferentes tipos acuíferos (poroso, fisurado y kársticos) y presencia de aguas superficiales (lagunas, ríos, etc).

Las plataformas de modelización numérica que pueden contemplar en su estructura las particularidades anteriormente descritas son, por ejemplo, FEEFLOW, VISUAL MODFLOW y GROUNDWATER VISTA, los dos últimas con el código SEAWAT del USGS. La utilización de uno u otro dependerá de la metodología del modelo numérico y el objetivo para el cual se construye (gestión de recursos hídricos a nivel de cuenca, modelización de zonas protegidas sensibles a cambios del nivel de agua subterránea, comportamiento hidráulico del acuífero frente a un campo de pozos de bombeo). En la Tabla 12-1 se presentan una comparativa de los 3 software con algunas de las características que debería contemplar un modelo numérico de cuenca y además se incluyen, algunas especificaciones particulares de cada software. Adicionalmente, se realizado una comparación con otros softwares como el SUTRA-MS (ModelMuse), TRANSDENS, COMSOL Multiphysics, iCP (Interfaz COMSOL-PHREEQC).

El SEAWAT y el Feflow modelan en concentraciones de mg/l de TDS –total de sólidos disueltos- o de conductividad eléctrica (CE). Cabe destacar que la CE y los TDS tienen una relación directa con la densidad del fluido. Es recomendable que el modelo numérico de flujo que se utilice para la gestión de recursos hídricos en la cuenca, contenga todos los acuíferos definidos y que las dimensiones de éste coincidan con las del modelo conceptual. Para casos particulares, como por ejemplo, gestión de sistemas ecológicos protegidos, como la Laguna Santa Rosa o los humedales del sector Ciénaga Redonda, se recomienda construir modelos numéricos específicos de escala local que contengan mallas de mayor refinamiento (menor dimensión de celda), cuyas condiciones de borde correspondan a las del modelo de flujo de gestión de cuenca. En el capítulo 15.7 se recomiendan más aspectos sobre modelos numéricos.

Además, cuando existan condiciones de densidad variable, como, por ejemplo, en el acuífero aluvial del sureste del Salar, en la parte norte del Llano de Ciénaga Redonda, debe realizarse un modelo numérico con un dominio menor, acotado a la zona objeto de estudio y modelizar la densidad variable aumentando la discretización espacial y por lo tanto obteniendo mayor resolución de los datos obtenidos del modelo.

Características	Feeflow	Visual Modflow/ Seawat	Groundwater vista/Seawat	SUTRA-MS (ModelMuse)	TRANSDENS	COMSOL Multiphysics	iCP (Interfaz COMSOL-PHREEQC)	Obs.
Modelización flujo en 3D	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	
Modelización de transporte de sal	SI	SI	SI	SI	SI	Si	SI	
Modelación de transporte multiespecie	SI	NO	NO	SI	NO	SI	SI	
Modelación de transporte reactivo	SI	NO	NO	NO	NO	NO	SI	
Modelización de transporte de calor	SI	SI	SI	SI (pero no simultaneo con el transporte de solutos)	SI (pero no simultaneo con el transporte de solutos)	SI	SI	
Modelización de densidad variable en 2D (cuña salina)	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	Se recomienda modelar en secciones acotadas
Modelización de densidad variable en 3D (cuña salina)	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	Modelización compleja y larga.
Modelización de acuíferos, fisurados y/o kársticos y porosos	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	
Modelización en fracturas discretas	SI	NO	NO	NO	SI	SI	SI	
Modelización de la zona no saturada	SI	NO	NO	SI	NO	SI	SI	
Modelización de flujo multifase	SI	NO	NO	NO	NO	SI	SI	
Plataforma de pre-postproceso amigable	SI	SI	SI	SI	NO	SI	SI	
Especificaciones	Modelización óptima de la geometría de rajos y túneles (elementos finitos) y en condiciones saturadas y no saturadas.	Recomendable para modelos numéricos de flujo en condiciones saturadas.	Modelización óptima de la geometría de rajos (elementos finitos) y en condiciones saturadas y no saturadas.					

Tabla 12-1: Comparativa de software para modelización numérica.

Fuente: elaboración propia.

Finalmente, para futuros trabajos se recomienda desarrollar con MODFLOW para el modelo de flujo y SEAWAT para modelar zonas de densidad variable como es el caso que nos ocupa, por ser una plataforma más económica y estandarizada y ofrece los mismos resultados para el objetivo del proyecto.

13. Incertidumbres del modelo conceptual y geometría 3D

En este capítulo se detallan las incertidumbres y las brechas de información detectadas durante la elaboración del modelo conceptual hidrogeológico y la construcción del modelo 3D en Leapfrog.

A continuación, se detallan las principales incertidumbres del modelo conceptual, agrupadas según diferentes categorías.

13.1 Incertidumbres generales

Finalmente, las incertidumbres generales del Salar de Maricunga, son las siguientes:

- A medida que aumente el conocimiento de la geometría y características de los acuíferos, podrá realizarse un mayor ajuste de las condiciones de borde y en consecuencia, del volumen de almacenamiento de los acuíferos. Cabe señalar que se podrían producir grandes variaciones de volumen, a causa de valores actualizados del espesor saturado del acuífero.
- No se tiene información en el núcleo del salar referente a parámetros hidráulicos. Por ello, sería recomendable la realización de ensayos de bombeo en pozos o piezómetros para despejar esta incertidumbre. En el presente trabajo, para la construcción del modelo ha sido necesaria la realización de ciertas aproximaciones y estimaciones para la determinación de los espesores representativos y la realización de los cálculos del volumen saturado en los acuíferos. Lo anterior es coherente con aspectos teóricos como, por ejemplo, que la porosidad debe disminuir con la profundidad y por lo tanto, también debería de disminuir la permeabilidad hidráulica en condiciones de densidad homogénea.
- Se desconoce el comportamiento hidrogeológico de las fallas a nivel de cuenca. No existe o no se dispone de bibliografía y antecedentes que logren interrelacionar la geología estructural con la hidrogeología en la zona de estudio. Esta determinación resulta necesaria, para mejorar el conocimiento con respecto a la conexión entre las cuencas hidrográficas del Salar de Maricunga y Piedra Pómez.

13.2 Incertidumbres con respecto al modelo en Leapfrog

A modo de organizar la información, a continuación se indican las incertidumbres por zonas. La incertidumbre principal identificada corresponde a la ausencia de información litológica que permita validar los supuestos del modelo. A continuación se señalan las zonas prioritarias a mejorar:

- Salar, Llano Ciénaga Redonda y Pampa Salar de Maricunga. Las perforaciones realizadas no alcanzan el substrato rocoso, por lo que no existe información de detalle que permita identificar con certeza la morfología y profundidad del basamento de la cuenca. Para la determinación del basamento únicamente se han utilizado perfiles geofísicos y plantas gravimétricas; sin disponer de pozos que alcancen el basamento, causando que la delimitación del basamento devenga interpretativa y poco precisa.
- Conexión Maricunga-Piedra Pómez. No existen sondajes en este punto crítico del modelo. Solamente se cuenta con unos pocos perfiles geofísicos, aunque con deficiente resolución en profundidad y mal distribuidos para este objetivo. La mejor forma de garantizar y validar definitivamente la conexión del acuífero entre ambas cuencas es la perforación de pozos, los cuales además aportarían información que ayude a validar la interpretación de los espesores de las unidades geológicas en el sector.

13.3 Incertidumbres con respecto a la identificación y características de los acuíferos del Salar de Maricunga y conexión con otras cuencas.

Las incertidumbres se encuentran relacionadas con los siguientes puntos:

- Se desconocen las características de la conexión entre la cuenca hidrográfica de Maricunga y Piedra Pómez ya que solamente se tienen un par de datos hidroquímicos e isotópicos que muestren una continuidad en el flujo. Tampoco se tiene suficiente conocimiento de la morfología del basamento en profundidad, ni de la relación entre las estructuras presentes en este sector con el flujo de agua. Finalmente, tampoco se ha podido estimar con precisión el caudal que circula de una cuenca a la otra.
- La extensión de la cuña salina, expuesta en el presente informe, es meramente interpretativa y se basa, esencialmente, en la información geofísica disponible. No existen perfiles verticales de conductividad eléctrica - densidad que permitan describir en profundidad la interfaz entre el agua dulce presente en el aluvial del Llano Ciénaga Redonda con la salmuera. Además, no se conocen las profundidades de las muestras de agua tomadas en esta zona y la densidad del muestreo hidroquímico es escasa.
- No existe una distribución en planta, o en profundidad, de la conductividad eléctrica, ni tampoco del total de sólidos disueltos. A partir de lo expuesto, se recomienda generar una mayor información en caso que se pretenda construir un modelo numérico para la simulación de determinadas zonas con densidad variable.

13.4 Incertidumbres con respecto al basamento

Existe incertidumbre en la definición de los siguientes ítems:

- Profundidad y morfología del basamento en el Salar. Solamente se disponen de sondajes poco profundos que no alcanzan el basamento y no es posible correlacionarlos a cabalidad con la geofísica disponible (planta gravimétrica y perfiles TEM). A partir de 250 m en la zona más distal del salar y de 550 m en su parte central, aumentan las incertidumbres acerca de sus características, debido a que la resolución de la geofísica ejecutada no alcanzó las profundidades mencionadas.
- Profundidad y morfología del basamento en el SE de la quebrada Ciénaga Redonda (Pampa de Valle Ancho) y en la conexión de las cuencas hidrográficas Salar de Maricunga y Piedra Pómez.

13.5 Incertidumbres con respecto al balance hídrico (entradas y salidas)

Las principales incertidumbres son las determinadas en los siguientes puntos:

Las principales incertidumbres son las determinadas en los siguientes puntos:

- A partir de los datos disponibles, se puede cuantificar de forma bastante completa la evaporación en la zona de estudio. Para mejorar el grado de precisión sería recomendable la instalación de un nuevo lisímetro en el sector W del salar, y actualizar los datos de los cuatro lisímetros existentes en el ´propio salar.
- Si bien la información meteorológica acerca de la zona no es completa, los datos disponibles en otras áreas cercanas permiten la extrapolación de las precipitaciones a la cuenca de Maricunga.
- A pesar de que la información hidrológica disponible permite conocer o interpolar la totalidad de datos fluviométricos de la zona de estudio, la realización de aforos en los cauces presentes en el salar permitiría mejorar la precisión de los datos.
- Las diferentes variables del balance hídrico deberían encontrarse ajustadas de forma más precisa. El cálculo de la recarga podría ser especificado con un mayor grado de precisión a partir de la determinación de, por ejemplo, las tasas de infiltración, mediante el ensayo de infiltración con doble anillo. En el capítulo de recomendaciones se especifican más detalles con respecto a esta metodología.

13.6 Incertidumbres de la estimación del Potencial de litio

Las incertidumbres con respecto a la estimación del potencial de litio se encuentran relacionadas con los siguientes puntos:

- No se ha podido caracterizar la composición hidroquímica de la salmuera con el suficiente grado de precisión, debido a que los datos de los antecedentes no se encuentran distribuidos de forma homogénea, tanto en superficie como en profundidad. La estimación propuesta del potencial de litio podría variar a medida que se dispusiera de un mayor número de datos en los diferentes emplazamientos del salar. Por otra parte, se necesita complementar la información litológica de los sondajes existentes con la realización de geofísica superficial, y perfiles de densidad-conductividad en las perforaciones.
- Para realizar una óptima estimación del potencial de litio sería necesario disponer de mayor cantidad datos de porosidad efectiva, tanto superficial como en profundidad, para obtener una aproximación más realista de este potencial. La realización de ensayos de bombeo sería de gran ayuda para estimar el coeficiente de almacenamiento y para obtener las transmisividades del acuífero.
- Los espesores, utilizados para el cálculo del potencial de Li, son estimativos. Se necesita una mayor cantidad de sondajes profundos para poder validar la geofísica existente y así disminuir la incertidumbre actual.
- A medida que se obtenga un mayor conocimiento de los acuíferos del salar y su geometría, la estimación del volumen de acuífero podría presentar importantes variaciones. En todo caso, se debería actualizar la estimación del potencial de litio.

14. Síntesis y conclusiones

A continuación, se presentarán las conclusiones y recomendaciones más importantes derivadas de la conceptualización del funcionamiento hidrológico, tanto superficial como subterráneo, de la cuenca del Salar de Maricunga.

- La franja de Maricunga corresponde a una importante región geológica y metalogénica emplazada en la cordillera de los Andes, la cual se encuentra dividida en tres subfranjas con materiales geológicos más modernos emplazados desde el Oeste hacia el Este: La subfranja intermedia, de edades comprendidas entre el Oligoceno superior y el Mioceno, presenta ambientes deposicionales denominados salares.
- En el caso de la zona de estudio, se ha conseguido una notable caracterización de la misma a partir de las cartografías geológicas superficiales y la gran cantidad de prospecciones geológicas. Esta ha servido como principal herramienta para el buen desarrollo de la caracterización hidrogeológica.
- El área de estudio se compone por la cuenca Salar de Maricunga y de Piedra Pómez y presenta una extensión de 3.125 km^2.
- Se determinó la relación existente entre la altura y la precipitación media anual a partir de los valores de precipitación de las estaciones de la zona. A partir de esto, se definió un patrón de precipitación para cada una de las alturas topográficas. Estos datos se compararon con los determinados en estudios anteriores, viendo que los resultados resultan favorablemente coincidentes, por lo que se adoptaron las isoyetas desarrolladas en el estudio DGA (2016) para distribuir espacialmente la precipitación en el área de estudio.
- Se calculó la evaporación media mensual en las tres estaciones pertenecientes a la DGA obteniendo unos resultados concordantes con los determinados en estudios previos.
- A partir de los parámetros hidráulicos de los materiales, se ha podido caracterizar hidrogeológicamente los materiales de la zona de estudio, a partir de la metodología definida por STRUCKMEIER, W. F. y MARGAT, J. (1995):
    - Unidad hidrogeológica 1, formada por materiales sedimentarios aluviales recientes.
    - Unidad hidrogeológica 2, formada por materiales sedimentarios coluviales y piroclásticos modernos, además de los depósitos de vegas y bofedales.
    - Unidad hidrogeológica 3, formada por depósitos evaporíticos y precipitados carbonáticos, fracturados y disueltos.
    - Unidad hidrogeológica 4, formada por materiales sedimentarios antiguos y volcánicos modernos, fracturados.

  - Unidad hidrogeológica 5, formada por tobas, lavas, ignimbritas y depósitos piroclásticos, que conforman potentes secuencias sedimentarias fracturadas.
  - Unidad hidrogeológica 6, formada por rocas intrusivas, pórfidos y las potentes series sedimentarias más antiguas.

- A partir del análisis de los perfiles geofísicos disponibles, de la información geológica (sondajes, estructuras y cartografía en superficie) y de la interpretación hidrogeológica realizada, se ha construido un modelo 3D en el software Leapfrog Hydro (v 2.7.2) que muestra la geometría del sistema acuífero.
- Por norma general, en los pozos que se construyan con el objetivo de caracterizar la hidrogeología y la geometría del Salar de Maricunga, debiesen realizarse perfiles verticales de conductividad eléctrica, gamma-natural, ensayos de permeabilidad a diferentes profundidades y ensayos de bombeo. La información anterior junto con perfiles TEM y NanoTEM permitirá tener información espacial robusta y tener una mejor aproximación del modelo conceptual a la realidad.
- La recarga se produce a partir del deshielo y por infiltración directa del agua de precipitación en las cotas más altas de la cuenca.
- El flujo se produce principalmente en los materiales de naturaleza aluvial del fondo de los valles.
- La cota de la piezometría desciende hacia los puntos topográficos más deprimidos del fondo de la cuenca.
- La salida de agua del sistema hídrico se produce por evaporación del agua más superficial del salar.
- La cuenca del Salar de Maricunga posee un comportamiento hidrogeoquímico complejo debido a su gran extensión, diversas fuentes de aporte y procesos involucrados a lo largo del recorrido de sus aguas. Sin embargo, es posible determinar direcciones de flujo en base a la composición química e isotópica de las aguas y su distribución geográfica.
- Las aguas del sector Ciénaga Redonda se recargan desde las zonas altas para luego fluir por el valle homónimo con una dirección de flujo de sentido sur-norte. La composición de las aguas es bastante heterogénea en este sector, variando entre sulfatadas cálcicas a cloruradas sódicas.
- En cuanto al sector Cordillera de Claudio Gay, sus aguas tienen tendencia composicional al tipo bicarbonatadas sódicas, indicando una similitud con aguas-lluvias de las zonas de recarga. Adicionalmente, sus conductividades son bajas (<1.000 µS/cm), y cuyas líneas de flujo son en dirección NO-SE y E-O.
- Las aguas del sector Río Lamas y Llano de Tres Cruces son, principalmente, cloruradas sódicas. El incremento de las conductividades hacia el oeste, sugiere un enriquecimiento de sólidos disueltos a lo largo del curso del río, el que se infiltra al llegar al Llano Ciénaga Redonda.

- Los puntos ubicados en el sector de Piedra Pómez son únicamente subterráneos y presentan conductividades bajas (<4.000 µS/cm). Las temperaturas de las aguas subterráneas son las más elevadas de la cuenca, sobre todo en el extremo oriental y norte alcanzando los 30°C. La composición sulfatda-cálcica, las altas temperaturas y anomalías en la concentración de boro en los pozos nor-orientales, sugieren una posible influencia geotermal profunda que sustente estas condiciones.
- Existe una posible conexión química entre el sector Piedra Pómez con el de Río Lamas – Llano de Tres Cruces. Es posible advertir una similitud en todos sus valores y composiciones, sugiriendo una línea de flujo continua entre estos dos puntos.
- Las aguas de los sectores Ciénaga Redonda, Río Lamas-Tres Cruces y Cordillera de Claudio Gay, descargan en el sector del Salar de Maricunga. Las evidencias hidroquímicas corresponden a las elevadas conductividades (>250.000 µS/cm) y al alto enriquecimiento de isótopos pesados en las aguas del Salar, indicando que los procesos predominantes en esta zona son de evaporación desde una superficie libre, reconcentración mineral y el consecuente enriquecimiento de isótopos pesados en las aguas remanentes.
- La relación iónica rNa/rCl del sector Salar de Maricunga indica que las concentraciones de Na y Cl provienen, esencialmente, de la disolución de halita (NaCl). Adicionalmente, no es de extrañar que las aguas sean del tipo cloruradas sódicas y que en el salar se encuentren las mayores concentraciones de Li, B, K y Mg.
- Destacar que todas las muestras del sector Salar de Maricunga se alejan de las rectas meteóricas y presentan valores enriquecidos en isótopos pesados. Esto se condice con los procesos reiterativos de evaporación desde una superficie libre y reconcentración mineral que afectan al Salar y el consecuente enriquecimiento de isótopos pesados en las aguas remanentes.
- En la siguiente tabla se resumen los valores de los diferentes componentes del balance hídrico de la zona de estudio:

Entradas (l/s)			**Salidas (l/s)**		
Percolación	728	700-765	Evaporación en el salar	1.797	1.750 a 1.900
Escorrentía	1.365	1300-1430	Evaporación en humedales	213	200-225
Total		**2000-2195**	**Total**		**1950-2125**

- Para facilitar la comprensión de toda la información de interés disponible, se ha diseñado un proyecto GIS (Geographic Information System). La información se encuentra en formato vectorial y raster y se ha referenciado en coordenadas WGS84 Huso 19S.
- A lo largo del estudio desarrollado han surgido una serie de recomendaciones que tendrán como finalidad arrojar información en las zonas con mayor incertidumbre y mejorar el modelo hidrogeológico conceptual.

15. Recomendaciones de la zona de estudio

Una vez llevado a cabo el modelo hidrogeológico conceptual han surgido una serie de recomendaciones que tienen como finalidad arrojar mayor información en las zonas con mayor incertidumbre y mejorar el modelo hidrogeológico conceptual.

15.1 Recomendaciones de recopilación de antecedentes

El modelo conceptual planteado está basado en los estudios que han sido recopilados y analizados. Para mejorar y robustecer el modelo hidrogeológico es necesario realizar trabajos de terreno, entre otros que se especifican en las recomendaciones de este capítulo. Además, se recomienda incorporar algunos antecedentes más relacionados con el potencial de litio, geoquímica de salmueras y pruebas de bombeo, cuyo conocimiento de su existencia se ha adquirido en las etapas finales del proyecto y no se lograron recopilar e integrar en el presente proyecto.

Los antecedentes que se requieren incorporar en trabajos futuros son:

- EDRA, 1999. Hidrogeología sector quebrada Piedra Pómez (inédito), Compañía Minera Casale, 74 p.
- EDRA 1998. Estudio hidrogeológico del Salar de Maricunga (Inédito). TECK-MDO, Compañía Minera Mantos de Oro, 59 p., Copiapó.
- Troncoso V. Rosa; Ercilla H.; Oscar; SERNAGEOMIN. Caracterización geoquímica superficial de aguas y sales de los principales salares andinos (22° 50’- 26° 05’ S), regiones de Antofagasta y Atacama [monografías]. Santiago: SERNAGEOMIN, 2016. 2 v. + 1cd (anexos) (Informe Registrado: IR-16-65).

15.2 Recomendaciones de Geología

En relación a la cartografía geológica en superficie se dispone de suficiente información y no se propone realizar nuevos trabajos. Sin embargo, a la hora de elaborar el modelo hidrogeológico en 3D se observó que en algunos sectores no hay información litológica debido a que no existen pozos de exploración para disponer de una buena caracterización geológica/hidrogeológica.

Los objetivos son:

- Definir la geología del subsuelo y la geometría del basamento en aquellas zonas donde no hay abundante información (sector Salar y en la zona de conexión entra Piedra Pómez y el Salar de Maricunga). La construcción de estos pozos servirá, a su vez, para interpretar con mayor detalle la información geofísica existente y para caracterizar geológicamente e hidrogeológicamente las zonas mencionadas.

Trabajos a realizar:

- **Perforación de 12 pozos (3 pozos de bombeo y 9 pozos de observación)** distribuidos estratégicamente de la siguiente manera:
    - 4 pozos de observación de 400 m de profundidad en el Salar de Maricunga y 1 pozo de bombeo próximo a alguno de observación.
    - 5 pozos situados en el límite entre la conexión de cuencas (Piedra Pómez) con 2 pozos de bombeo asociados.

Debido a la naturaleza de los materiales existentes sería conveniente usar técnicas de perforación como la entubación simultánea o bien el aire reverso o similar pero habría evitar el uso que lodos de perforación (en ningún caso bentonita). La habilitación de los sondajes sería en PVC y los diámetros se recomiendan entubarlos a 3-4“en los pozos de observación y los diámetros de habilitación de 8-12” para los de bombeo.

En el caso de llevar a cabo los trabajos de ejecución de sondajes, se recomienda realizar la supervisión y control de los trabajos por expertos o profesionales en hidrogeología con la finalidad de obtener la máxima información geológica, geoquímica e hidrogeológica.

Duración/Frecuencia: 4 meses de ejecución de los trabajos.

Monto aproximado: 2-2,5 mil millones de pesos chilenos.

- Para reconocer si las estructuras influyen en el comportamiento hidrogeológico de los acuíferos y en especial en acuífero del núcleo que contienen la salmuera, se recomienda realizar un **estudio estructural en el Salar de Maricunga que contenga las siguientes investigaciones:**
    - Perfiles sísmicos para determinar estructuras en profundidad (re-analizar los existentes y/o realizar más perfiles sísmicos).
    - Perforación de pozos de exploración para calibrar los perfiles sísmicos (extraer información litológica, realizar ensayos de porosidad en los materiales de interés, determinar las características litológicas, etc.).
    - Realizar perfiles verticales en los pozos de exploración con sonda televiewer, para obtener orientaciones predominantes de fracturación.
    - Realizar ensayos de trazador (ensayos de inyección/extracción) en pozos de bombeo con punteras de observación para determinar velocidades de flujo, conexiones entre puntos y parámetros de porosidad y dispersividad del terreno (parámetros que necesita el modelo numérico).

- Integrar toda la información anterior, concluir si existen zonas de fallas que determinen flujos subterráneos preferenciales y determinar la implicancia regional de las zonas de falla estudiadas.

Duración/Frecuencia: 4-7 meses de ejecución de los trabajos.

Monto aproximado: 60-70 mil millones de pesos chilenos.

15.3 Recomendaciones de Geofísica

Se recomienda **realizar nuevas prospecciones geofísicas** para actualizar el conocimiento sobre el terreno con pruebas no destructivas (método indirecto). Estas prospecciones contribuirán a la mejora de la representación geométrica del sistema acuífero y de la cuña salina y además permitirán caracterizar las condiciones subterráneas.

Los objetivos son:

- Caracterizar con mayor precisión la proyección del Salar y los llanos que lo bordean en profundidad.
- Determinar la conexión de cuencas (Piedra Pómez y Salar de Maricunga)
- Conocer la geometría y profundidad del basamento.

Trabajos a realizar:

- 7 perfiles TEM dirección W-E y N y S (relación con el Salar y los Llanos).
- 1 perfil TEM para ver la interconexión de cuencas.
- 5 -8 perfiles NanoTEM a los humedales existentes y lagunas.

Duración/frecuencia: 1-2 mes de trabajo

Monto aproximado: 71 millones de pesos chilenos.

15.4 Recomendaciones de Hidrología y Meteorología

Disponer de información hidrológica en la zona de estudio es fundamental para poder estimar con precisión los caudales de entrada y salida de la cuenca, especialmente la recarga y la evaporación desde el salar. Para lograr esto, se proponen las siguientes recomendaciones:

- **Instalación de estaciones meteorológicas y nivométricas en el área de estudio:**

Se propone la instalación de estaciones meteorológicas y nivométricas en el área de estudio, a fin de estimar con mayor precisión el aporte de la precipitación sólida y líquida en el área de estudio. En

particular, las estaciones nivométricas deben ser capaces de estimar el aporte de la precipitación sólida como nivel equivalente de agua. Considerando este punto, se podría negociar un acuerdo con alguna de las mineras privadas que operan en el sector, solicitando que reporten de manera pública y periódica las mediciones de sus estaciones pluviométricas. Lo anterior permitirá disponer de datos para implementar modelos hidrológicos conceptuales que consideren de forma separada las precipitaciones líquidas y sólidas.

Trabajos a realizar:

- Instalación una estación nivométrica en la parta alta de la cuenca (Piedra Pómez).
- Recuperar la información de la estación instalada de la DGA (dicha estación se encuentra en funcionamiento pero sus datos deben ser descargados en terreno)

Duración/frecuencia: la duración estimada para la instalación de las estaciones es de 1 mes. Se recomienda que las estaciones midan por lo menos 15-20 años a contar de su fecha de instalación.

Monto aproximado: 27-31 millones de pesos chilenos (en función de la calidad de la estación pero debido a las condiciones de viento y frío que presentan estas cuencas los sensores deben aguantar muy bajas temperaturas).

- **Estimación de los parámetros de coeficientes de escorrentía (Ce) a partir de mediciones sistemáticas de aforos:**

Se recomienda mejorar la estimación de los **parámetros de coeficientes de escorrentía (Ce) a partir de mediciones sistemáticas de aforos** extendidas a lo largo de las cuencas aportantes y la incorporación de la información fluviométrica disponible. Se deben seleccionar puntos en que los cauces se encuentre sobre los basamentos, ya que así se podrá estimar la porción de la precipitación que se traduce en recarga en la cuenca aportante al punto aforado. Se recomienda realizar los aforos con una frecuencia mensual durante el primer año de medición, seguido por mediciones con frecuencia trimestral en los años posteriores.

Trabajos a realizar:

- Para validar las estimaciones de coeficientes de escorrentía (Ce) realizas en la zona se recomienda la determinación de puntos de aforos sistemáticos. Se dará prioridad a los puntos que tengan estaciones fluviométricas ya instaladas que permitan estimar el aporte de la recarga en la cuenca aportante. Recolección, validación y publicación de los datos medidos.

Duración/frecuencia: se recomienda que la frecuencia de muestreo de los puntos propuestos sea mensual durante el primer año, posteriormente la frecuencia podría ser trimestral.

Monto: 36-39 millones de pesos para el primer año, 16 millones por año posterior de medición (se recomienda extender la campaña por 5 años en total).

- **Validar y completar las tasas de evaporación:**

Realizar mediciones de **terreno de la evaporación en el sector del Salar de Maricunga.** El objetivo de estas mediciones es generar datos que permitan estimar de mejor manera la evaporación dentro del salar. Esta recomendación se fundamenta en las dificultades que existen al medir la evaporación en este sector, debido al espesor y heterogeneidad de la costra salina.

Las técnicas de medición recomendadas son *Scintillometer* y/o *Microwave Scintillometer* (Meijninger *et al.* 2002; Lüdi *et al.* 2005; de Bruin y Wang, 2017). Estás técnicas se han aplicado en diversas zonas áridas y semiáridas como el desierto del Gobi (Xu et al., 2013), Australia (Yee et al., 2015) y África Occidental (Schüttemeyer et al., 2006).

Se proponen estás técnicas ya que son capaces de medir la evaporación de amplios sectores (a escala de km^2) de forma integrada. Así, las técnicas son menos susceptible a cometer errores en la medición asociados a fenómenos locales derivados de la heterogeneidad de la costra salina. Lo anterior supone una ventaja frente a las técnicas tradicionales, que realizan mediciones puntuales, las que posteriormente deben ser interpoladas y extrapoladas para determinar la evaporación del salar. Otra de las ventajas de estas técnicas es que se fundamentan en solucionar la ecuación de conservación de la energía, a diferencia de las técnicas tradicionales que se basan en un balance de masa. Finalmente, está técnicas no produce ninguna alteración de la costra salina, a diferencia de otras técnicas como los lisímetros.

A continuación se indican algunas empresas proveedoras de los instrumentos: 1) Scintec, 2) Campbell Scientific y 3) Kipp & Zonen.

<u>El objetivo es:</u>

- Mejorar la estimación de la evaporación dentro del salar.

<u>Trabajos a realizar:</u>

- Realizar mediciones de terreno de la evaporación en el Salar de Maricunga para validar y completar las tasas de evaporación estimadas a partir de datos de terreno. Las técnicas de medición recomendadas son Scintillometer y/o Microwave Scintillometer y se debe cubrir todo el Salar de Maricunga.
- Desarrollar campañas de terreno de medición de la evaporación en al menos 2-3 sectores por cada tipo de suelo en el salar.
- Levantamiento de datos meteorológicos (principalmente dirección del viento y evapotranspiración potencial) e imágenes satelitales espectrales para definir en detalle los sectores en que se desarrollaran las mediciones y la evaporación de referencia de las mediciones.

- Corregir las mediciones de acuerdo a la ocurrencia de días con precipitación y nubosidad. Lo que se busca es determinar la evaporación del sector normalizada por la evapotranspiración potencial en la zona.
- Recuperar los datos de 3-4 lisímetros de la DGA instalados en el Salar de Maricunga que se encuentran activos y se debe de ir a terreno a descargar los datos.

Duración/frecuencia: la duración estimada para las campañas de mediciones es de 2-3 meses.

Monto aproximado: 67-69 millones de pesos chilenos. El valor referencial de compra del *Scintillometer* es €25.600 más IVA.

- **Estudio de imágenes satelitales espectrales**

Se recomienda realizar un estudio de imágenes satelitales espectrales (estudio base) que permita estimar la evolución histórica de las áreas evaporantes en el Salar de Maricunga. Por otro lado, se recomienda realizar una actualización del estudio base cada 3 años, a fin de ir monitoreando la evolución de las áreas evaporantes e ir integrando las nuevas mediciones de profundidad que estén disponibles.

El objetivo es:

- Determinar la evolución histórica de las zonas evaporantes en el Salar de Maricunga, generar una relación entre índice de humedad y profundidad e incorporar nueva información de profundidad registrada en campañas de terreno.

Trabajos a realizar:

- Levantar imágenes satelitales históricas desde el año 1986 a la actualidad con una frecuencia de 1 cada 3 años. La fecha de las imágenes debe corresponder con el fin del año hidrológico, procurando que no hayan ocurrido precipitaciones de gran magnitud previas captura de la imagen.
- Levantar imágenes que coincidan con la fecha de las campañas de medición de profundidad históricas.
- Calcular índices de brillo y humedad para el conjunto de imágenes satelitales levantadas.
- Generar una relación entre índice de humedad y profundidad en función de las imágenes levantadas y de los nuevos registros de profundidad.
- Evaluar el impacto sobre las áreas evaporantes del fenómeno ENSO (Niño-Niña).
- Reportar los posibles cambios y tendencias encontrados en las áreas evaporantes.

Duración/frecuencia: la duración estimada del estudio es de 3 meses y se recomienda actualizarlo con nueva información cada 3 años.

Monto aproximado: 30 millones de pesos chilenos para el estudio base y 10 millones de pesos para cada actualización.

- **Estudio de las tasas de infiltración con el método del doble anillo**

Las variables del balance hídrico deben ser ajustadas en la medida de lo posible. El cálculo de la recarga puede ser precisado mediante un mayor conocimiento de las tasas de infiltración mediante el ensayo de infiltración con doble anillo.

El objetivo es:

- Determinar las tasas de infiltración mediante el ensayo del doble anillo.

Trabajos a realizar:

- Identificar los distintos tipos de suelo en la cuenca y seleccionar sitios representativos para realizar los ensayos de infiltración, teniendo en cuentas las áreas de recarga definidas, etc.
- Instalar los anillos de infiltración en terreno según la estructura propuesta en la Figura 15-1.
- Realizar la prueba de carga hidráulica en terreno (constante o variable en función de la capacidad de infiltración) una vez instalado el anillo.
- Analizar en gabinete la curva empírica de infiltración basada en el modelo de Kostiakov (1932) y obtener las tasas de infiltración.

Figura 15-1. Propuesta de instalación de los anillos de infiltración.

Duración/frecuencia: la duración estimada para el estudio es de 1 mes y se recomiendan al menos 20-30 ensayos.

Monto aproximado: 18-20 millones de pesos chilenos.

15.5 Recomendaciones de Hidrogeología

Las siguientes recomendaciones están orientadas a conocer con más exactitud el comportamiento hidrogeológico del sistema acuífero obteniendo datos de nivel y parámetros hidráulicos en aquellas zonas con mayor incertidumbre:

Trabajos a realizar:

- **Campaña de inventario de pozos en terreno y revisión del estado de los mismos** mediante video-inspecciones en pozos o perfilaje del pozo mediante la sonda caliper.

  Duración/frecuencia: 2 meses de trabajo.

  Monto aproximado: 36-45 millones de pesos chilenos.

- Monitoreo de niveles de agua para verificar la información disponible y proponer un Plan de monitoreo.

  Duración/frecuencia: 2 semanas de trabajo en gabinete interpretando y proyectando toda la información recopilada de la campaña de terreno.

  Monto aproximado: 9-12 millones de pesos chilenos.

- **Incorporar 12-14 punteras** (pozos de poca profundidad) en las zonas cercanas a sectores de explotación o zonas vulnerables (en La Laguna, sistemas vegetaciones azonales hídricos terrestres (SVAHT), Ojos de la Ola y Leoncito).

  Duración/frecuencia: 1-2 meses de trabajo.

  Monto aproximado: 17-21 millones de pesos chilenos.

- Plan de Vigilancia de niveles: una vez levantado el inventario de pozos de la cuenca de estudio e incorporados los más representativos, realizar compañas periódicas, al menos, cada 6 meses, con la medición de 85-90 niveles en cada una de ellas.

  Duración/frecuencia: 4 campañas semestrales.

  Monto aproximado: 71-79 millones de pesos chilenos.

- **Instrumentar algunos puntos más relevantes con sensores/divers** de nivel para que se trasfieran los datos en línea.

  Duración/frecuencia: 1 día por punto.

  Monto aproximado: 1,9-2,3 millones de pesos chilenos por sensor instalado (por pozo).

- Aprovechando la campaña de perforación de exploración geológica/hidrogeológica (21 pozos, 9 de ellos habilitados para realizar pruebas de bombeo, la menos de 24 horas de bombeo y su correspondiente recuperación) se recomienda **la ejecución de 3 ensayos de bombeo** en el

sector del Salar y en la zona de conexión entra Piedra Pómez y el Salar de Maricunga. El objetivo principal de los ensayos de bombeo es la obtención de parámetros hidráulicos (T, K y S) a partir de ensayos hidráulicos.

Duración/frecuencia: 2-3 meses

Monto aproximado: 100-140 millones de pesos chilenos para los 3 ensayos.

- **Referenciar bajo una misma cota topográfica la cota del nivel piezométrico**, ya que es muy común que haya diferencias entre los niveles medidos por los distintos autores. Por el momento no se ha detectado este tipo de diferencias, no obstante es una incidencia muy común.

A continuación, se presentan diferentes técnicas para obtener una topografía de detalle y los precios por Ha aproximados (Tabla 15-1). Se debe de tener en cuenta que para el núcleo del salar la precisión topográfica que se necesita es de orden centimétrico pero que a nivel de zona marginal y de cuenca la precisión podría ser suficiente de orden métrico. Toda la información de terreno (pozos, piezómetros, puntos de medición, etc.) debería referenciarse sobre la misma cota topográfica. La información topográfica que se obtenga se puede utilizar en el modelo 3D y en el modelo numérico. En terreno deberá medirse la profundidad de nivel de agua y obtener el nivel piezométrico (m s.n.m.) mediante coordenadas X e Y referenciadas sobre el DEM.

Ítem	Lidar fino	Lidar Grueso	Aerofotogrametría	Dron
Escala	1 a 500	1 a 500	-	1 a 25.000
Tamaño de celda	0,5 m	-	-	-
Curvas de nivel	0,5 m	5 m	-	10
Precisión	5 a 10 cm	1,5 a 2 m	-	-
Costo ($/Ha)	3.500 a 5.000	-	1.000	17.500

Tabla 15-1. Costos y métodos de obtención de una topografía.

Fuente: elaboración propia.

15.6 Recomendaciones de Hidroquímica

Con el objetivo de **verificar la información existente y para determinar los procesos químicos** que suceden en las aguas subterráneas a lo largo del año hidrológico se propone un plan de monitoreo integrado de las aguas subterráneas y superficiales, que contemple un análisis químico de los componentes mayoritarios del agua y los elementos minoritarios más significativos.

Asimismo, el plan debería incluir la recopilación de nuevos datos con los que actualizar y complementar los cálculos de concentración de litio del salar y conocer su variación tanto en planta como en profundidad. Estas medidas permitirían recalcular el potencial de litio de la cuenca eliminando las incertidumbres asociadas a la escasa malla de datos hidrogeoquímicos disponible en la actualidad.

Los objetivos son:

- Caracterizar con mayor precisión la salmuera en el salar.
- Establecer orígenes del agua con más detalle.
- Caracterizar química e isotópicamente el agua de recarga y ajustar la recta meteórica local (LMWL).
- Generar una base de datos robusta de contenido en litio en planta y profundidad en el Salar.

Trabajos a realizar:

- Plan de Vigilancia de Calidad: monitoreo de la calidad química e isotópica del agua superficial, subterránea, de precipitación (sólida-líquida) y salmuera en los pozos y/o piezómetros donde se mida el nivel piezométrico.
- Como parte integral del monitoreo de calidad, se reportarán los siguientes parámetros fisicoquímicos *in situ* de cada muestra: T, pH, EC, TDS y ORP. Para esto se utilizará una sonda multiparámetro Hanna 9828 o similar.
- Para ello se recomienda tomar muestras de 45 puntos de agua. Las muestras serán ambientadas, filtradas y preservadas en terreno. Los parámetros físico-químicos y resto de parámetros a analizar en laboratorio se incluyen en la Tabla 15-2.
- Los análisis anteriores serán complementados con la determinación de la composición isotópica en $\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$ de todas las muestras de agua.
- **Realización de calicatas y sondajes** para ampliar los puntos de toma de muestra de agua para monitoreo de los parámetros físico-químicos y, específicamente, la distribución de concentración de litio en la salmuera.

Duración/frecuencia: 4 campañas semestrales.

Monto aproximado: 145-150 millones de pesos chilenos.

Parámetros Físico-Químicos							
Conductividad Eléctrica	SM 2510 B Ed.22	µS/cm a 25ºC	10	pH	SM 4500 H		0.1
Sólidos Totales Disueltos	SM 2540C Ed.23	mg/L	10				
Cationes +							
Calcio Disuelto	SM 3120 B Ed.22	mg/L	2.5	Magnesio Disuelto	SM 3120 B Ed.22	mg/L	0.3
Potasio Disuelto	SM 3120 B Ed.22	mg/L	2	Potasio Disuelto	SM 3120 B Ed.22	mg/L	2
Sodio Disuelto	SM 3120 B Ed.22	mg/L	2.5				
Aniones -							
Alcalinidad Total	IT-610	mg/L CaCO3	10	Bromuros	PE-2090	mg/L	0.1
Carbonatos	IT-610	mg/L CaCO3	10	Cloruros	PE-2090	mg/L	0.5
Fluoruros	PE-2090	mg/L	0.05	Fosfatos	PE-2090	mg/L	0.5
Nitratos	PE-2090	mg/L	0.2	Nitritos	PE-2090	mg/L	0.025
Sulfatos	PE-2090	mg/L	0.5				
Metales Disueltos							
Aluminio Disuelto	PE-303	mg/L	0.005	Antimonio Disuelto	PE-303	mg/L	0.00025
Arsénico Disuelto	PE-303	mg/L	0.00025	Bario Disuelto	PE-303	mg/L	0.00025
Berilio Disuelto	PE-303	mg/L	0.00025	Bismuto Disuelto	PE-303	mg/L	0.00025
Boro Disuelto	PE-303	mg/L	0.005	Cadmio Disuelto	PE-303	mg/L	5e-005
Cobalto Disuelto	PE-303	mg/L	5e-005	Cobre Disuelto	PE-303	mg/L	0.00025
Cromo Disuelto	PE-303	mg/L	0.00025	Escandio Disuelto	PE-303	mg/L	5e-005
Estaño Disuelto	PE-303	mg/L	0.00025	Estroncio Disuelto	PE-303	mg/L	0.00025
Fósforo Disuelto	PE-303	mg/L	0.005	Galio Disuelto	PE-303	mg/L	0.0001
Hierro Disuelto	PE-303	mg/L	0.005	Litio Disuelto	PE-303	mg/L	0.00025
Manganeso Disuelto	PE-303	mg/L	0.0005	Mercurio Disuelto	PE-303	mg/L	0.00010
Molibdeno Disuelto	PE-303	mg/L	0.00025	Níquel Disuelto	PE-303	mg/L	0.00025
Plata Disuelta	PE-303	mg/L	0.0005	Plomo Disuelto	PE-303	mg/L	0.00025
Selenio Disuelto	PE-303	mg/L	0.00025	Talio Disuelto	PE-303	mg/L	5e-005
Teluro Disuelto	PE-303	mg/L	0.0001	Titanio Disuelto	PE-303	mg/L	0.00025
Torio Disuelto	PE-303	mg/L	5e-005	Uranio Disuelto	PE-303	mg/L	5e-005
Vanadio Disuelto	PE-303	mg/L	0.00025	Wolframio Disuelto	PE-303	mg/L	0.00025
Zinc Disuelto	PE-303	mg/L	0.005				

Tabla 15-2. Listado de parámetros posibles a analizar en laboratorio.

Fuente: elaboración propia.

15.7 Recomendaciones Modelos numéricos

Los documentos más relevantes los que existe modelación numérica de la cuenca del Salar de Maricunga, son los siguientes:

- *Estudio hidrogeológico Salar de Maricunga, proyecto Volcán. Andina Minerals (2012).*

  En este trabajo se discretizaron los elementos de la geometría en una malla de 200 x 200, con una sola capa vertical. La zona cubierta por el estudio corresponde al sector sur del Salar de Maricunga. La recarga se definió únicamente por el aporte del río Lamas y de la quebrada Ciénaga Redonda. Según el escenario actual, se produce un ligero descenso con los bombeos actuales, para posteriormente recuperar los niveles a largo plazo.

  En el mismo trabajo se puede consultar otro modelo numérico representativo del acuífero de la zona Barros Negros – Ciénaga Redonda. De la misma manera que el anterior, este se realizó en VISUAL MODFLOW, representando una superficie de aproximadamente 15 x 5 km, con una capa vertical. El tamaño de la malla es de 50 x 50 m.

  En una visión preliminar, se puede observar que se determinan unas buenas condiciones de contorno, con la generación de las entradas en el modelo a partir de aportes laterales por pozos de inyección, y las salidas a través del nivel de carga constante del norte del modelo y la evaporación por las vegas de Barros Negros y la Ciénaga Redonda. De la misma manera, en la calibración, se consigue un buen intervalo de confianza a partir de la reproducción de niveles en los 32 sondajes donde se tiene registro de niveles.

- *Estudio hidrológico del Salar de Maricunga. Exploración y desarrollo de recursos de agua S.A. Teck-MDO (1998).*

  En el estudio se utilizó el código MODFLOW para evaluar los efectos a corto y largo plazo causado por el bombeo de unos pozos instalados de MDO y MSR. Con esta finalidad, se desarrolló, calibró y utilizó un modelo para realizar unas simulaciones de bombeo y recuperación en el área. La zona cubierta por el estudio corresponde al sector sur del Salar de Maricunga. Las características principales del modelo realizado son las siguientes:

  - Las entradas al acuífero se definieron con de manera bastante completa (Quebrada Pastillos, Q. Ciénaga Redonda, Río Lamas, Q. Colorado y Zonas intermedias).
  - Los mecanismos de descarga del agua subterránea (evapotranspiración y flujos subterráneos hacia el centro del salar), también fueron definidos de forma correcta.
  - La geometría del modelo se definió a partir de unos perfiles geofísicos gravimétricos, una serie de sondajes de resistividad, la topografía y seis perforaciones, a partir de las cuales, se definieron los niveles geológicos presentes en la zona.

- En el mallado del modelo se intercalaron zonas de mayor tamaño de la cuadricula (230 m) con otras mejor discretizadas (40 m) en los lugares de mayor variación del nivel freático.
- Se definieron diferentes zonas de recarga y condiciones de borde, además del bombeo de unos pozos, para representar de forma correcta las condiciones existentes en los límites del modelo.
- A partir de los resultados obtenidos, se puede observar que el modelo simula de forma correcta las condiciones del nivel freático.

Asimismo, los modelos, realizados en la plataforma VISUAL MODFLOW, resultan correctos, sencillos y son capaces de dar respuesta a la inquietud por la que fueron generados. Las condiciones de contorno implementadas resultan válidas para cumplir con el objetivo del trabajo. Utilizan diferentes puntos de observación y de bombeo, y se logra reproducir la piezometría en la zona de estudio. Sin embargo, debido a la sencillez y al limitado alcance de ambos modelos, no resultarían reciclables para el presente estudio.

Trabajos a realizar:

- **Elaboración de un nuevo modelo numérico hidrológico:**

Cuando se cuente con las mediciones sistemáticas de precipitación y registros de aforos sobre la cuenca descritos en el capítulo del análisis hidrológico se recomienda implementar un modelo hidrológico que permita calcular la recarga a una escala temporal diaria u horaria. El modelo debe ser calibrado a fin de que pueda reproducir los registros de caudales en la cuenca, tanto en las estaciones fluviométricas como los aforos puntuales. Se recomienda que el modelo resuelva las ecuaciones del modelo *Continuos Soil-moisture Accounting* (SMA por sus siglas en inglés) (Bennett, 1998), el cual puede implementarse en planillas de cálculo, softwares de programación o bien en el software Hec-HMS, u otro que considere al menos el grado de detalle del modelo SMA. El modelo debe ser capaz de representar el congelamiento que puede ocurrir en los cauces superficiales ubicados a gran altura, así como el almacenamiento y derretimiento de nieve sobre la cuenca.

El objetivo es:

- Establecer con precición la magnitud, distrubución espacial y temporal de la recarga.

Trabajos a realizar:

- Estimar la precipitación sobre la cuenca diferenciando si esta cae en forma sólida (nieve) o bien de forma líquida.
- Calibrar los parámetros del modelo considerando las carateristicas de los suelos en la cuenca, los registros fluviométricos y los aforos de caudales en el área de estudio.

- Determinar la recarga media de largo plazo, la recarga para años con influencia del niño y la niña y calcular la recarga transciente en el tiempo.

Duración/frecuencia: la duración estimada para la elaboración del modelo es de 4 meses.

Monto aproximado: 25-27 millones de pesos.

- **Revisión y validación del Modelo subregional de flujo numérico existente:**

En la zona de estudio se dispone de un modelo subregional que representa el flujo subterráneo del área definida en los puntos anteriores. La modelación se realiza en VISUAL MODFLOW, con una discretización de las celdas comprendida entre 300 x 300 m en las zonas de menor refinado, hasta 100 x 100 m en las zonas de mejor discretización. El modelo presenta 4 capas verticales: las dos primeras en las que se representa el relleno aluvial, y las otras dos en donde se encuentra representado el basamento rocos volcánico e intrusivo.

En el modelo numérico existente analiza por separado las diferentes subcuencas representadas, realizándose un análisis de sensibilidad para los parámetros que eran más importantes para controlar el flujo de agua subterránea y determinar la representatividad de cada uno de los parámetros en los resultados de la modelación. Los valores determinados en las proximidades de la vega de Ciénaga Redonda, sirvieron para introducir las condiciones de contorno en el modelo local.

Trabajos a realizar:

- Revisar y validar el modelo subregional de la subcuenca de Salar de Maricunga para aporvechar el modelo numerico existente.
- Se requiere la actualización del modelo numérico existente de manera de incorporar los nuevos antecedentes recopilados.

Duración/frecuencia: la duración estimada para la elaboración del modelo es de 2-3 meses.

Monto aproximado: 32 millones de pesos.

- **Elaboración de un nuevo modelo numérico hidrogeológico:**

En la zona de estudio los acuíferos existentes presentan conexión hidráulica por ello se recomienda la construcción de un nuevo modelo numérico que integre la totalidad del sistema acuífero (cuenca Salar de Maricunga y cuenca Piedra Pómez).

Por ello se requiere la elaboración de un modelo numérico que integre los acuíferos existentes. El proyecto a desarrollar podría construirse a partir de la utilización acoplada de los códigos MODFLOW y SEAWAT.

El informe a entregar se realizará en función de los requerimientos que se especifican en la Guía para el Uso de Modelos de Aguas Subterráneas en el SEIA (2012). Estos requerimientos tendrán

en cuenta que los criterios estadísticos (MAE/RMS) se encuentren por debajo del 5%, y el error de cierre del balance hídrico se la cuenca esté por debajo del 2%. Tanto los parámetros hídricos como las propiedades del transporte, se calibrarán en función de los datos recopilados en la campaña de terreno.

La información generada se entregará en formato GIS, en coordenadas WGS 84 Datum 19S y los archivos del modelo de flujo en la plataforma MODFLOW junto a toda la información digital base ordenada bajo una estructura temática acordada.

En la elaboración del modelo numérico de la cuenca hidrogeológica (cuencas Salar y Maricunga), se debe considerar al menos, lo siguiente:

- *Actualización de la geometría*: para esta actualización se utilizará el software de modelación Leapfrog Hydro construido a partir del modelo conceptual (aprovechar el modelo en 3D que está construido), exportándolo al modelo numérico de forma íntegra evitando así, nuevas interpolaciones en la geometría de la zona (2-3 capas).
- *Actualización de los datos hidrológicos*: para lo cual se revisarán los datos hidrometeorológicos registrados hasta la actualización del modelo. Además, se revisarán las recargas por precipitación y por escorrentía superficial en función del balance hídrico realizado en el modelo conceptual.
- *Discretización*: se realizará una discretización espacial y temporal de acuerdo a la información reportada por las campañas de terreno y de acuerdo a las perforaciones de los nuevos pozos dentro del dominio del modelo (recomendaciones de perforación). Inicialmente 200x200 y en las zonas de pozos, río y humedales con un mayor detalle.
- *Definición y determinación de las condiciones de borde*: se revisarán y validarán las condiciones de borde utilizadas en el modelo numérico en función de los datos hidrológicos definidos anteriormente y los datos hidrogeológicos valorizados en el modelo conceptual.
- *Determinación de los parámetros hidráulicos*: definidos a partir de los ensayos realizados durante las campañas de terreno ejecutadas durante el presente proyecto y la información histórica.
- *Análisis del balance hídrico de la cuenca*: elaborado como parte del modelo conceptual y se calibrará el modelo en base a los datos entregados por este.
- *Calibración estacionaria*: se revisará y validará la información utilizada para la calibración en régimen estacionario en función de los valores reflejados en el modelo conceptual.

- *Calibración transiente*. Se realizará la actualización del modelo numérico con los últimos datos recopilados en las campañas de terreno de registro de niveles en los pozos registrados en el modelo numérico.
- *Análisis de Sensibilidad y Validación*: es necesario la evaluación de los parámetros utilizados en la calibración a modo ajustar estas variables simuladas de una buena forma con las observadas.

Actualización Escenarios y/o Períodos de Simulación Predictiva del Modelo:

A partir del modelo numérico de flujo calibrado realizado para evaluar el comportamiento del acuífero se realizarán escenarios a modo de establecer la situación futura probable de los niveles. En relación a lo anterior se realizarán 3 escenarios: 1.-con un mayor bombeo que incluya todos derechos posibles, no los reales; 2.-con bombeo adicional si se ponen en marcha terceros usuarios y 3.-con periodo de menor recarga (años secos).

Finalmente, se realizará un análisis de sensibilidad de los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas con el fin de validar los resultados y entregar un modelo robusto el cual aclare y reafirme la situación futura dentro de la cuenca de estudio.

Duración/frecuencia: 6 meses

Monto aproximado: 75-81 millones de pesos chilenos para la realización del modelo numérico de transporte en Modflow.

16. Bibliografía

- Aguirre, I., Fonseca A. (2000). Interpretación gravimétrica y geoeléctrica de la cuenca de Ciénaga Redonda, Altiplano, III región
- AMPHOS 21 (2016). Diagnóstico de disponibilidad hídrica en cuencas alto andinas de la región de Atacama. Fase 3. DGA
- AQUATERRA (2013). Estudio geofísico mediante TEM, Diagnóstico de Disponibilidad hídrica en cuencas alto-andinas de la Región de Atacama, Fase I, Anexo 10-1 (Geodatos).
- Aravena, R., O. Suzuki, H. Peña, A. Pollastri, H. Fuenzalida y A. Grilli. (1999). Isotopic composition and origin of precipitation in Northern Chile. Applied Geochem. 14 (4) 411-422.
- Arcadis (2015). Diagnóstico de disponibilidad hídrica en cuencas alto andinas de la región de Atacama. Fase 2. DGA.
- Bai, J; Chen, X; Li, J; et al. (2011). Changes in the area of inland lakes in arid regions of central Asia during the past 30 years. Environmental Monitoring and Assessment 178.
- Beck, PSA; Atzberger, C; Hogda, KA; et al. (2006). Improved monitoring of vegetation dynamics at very high latitudes: a new method using MODIS NDVI. Remote Sensing of Environment 100.
- Clark I. and P. Fritz, (1997). Environmental isotopes in hydrogeology.
- Clavero, J.; Mpodozis, C.; Gardeweg, M.; Valenzuela, M. (2012). Geología del área Laguna Wheelwright y paso San Francisco, escala 1:100.000. Carta Geológica de Chile, SERNAGEOMIN.
- Conejo P.; Mpodozis C.; Tomlinson, A. (1998). Hoja Salar de Maricunga, escala 1:100.000. Carta Geológica de Chile, SERNAGEOMIN.
- De Bruin, HAR; Wang, J. (2017). Scintillometry: a review.
- DGA (2011). Estimación de recargas en cuencas altiplánicas y precordilleranas de vertiente pacífica.
- DGA (2012). Estimación de recarga en cuencas altiplánicas, Región de Atacama. Versión Corregida. División de estudios y planificación, SDT N°334.
- DGA-DIHA PUC (2009).Levantamiento hidrogeológico para el desarrollo de nuevas fuentes de agua en áreas prioritarias de la zona norte de Chile.
- EDRA (1999). Hidrogeología quebrada Piedra Pómez
- EIA Cerro Casale (2011). Optimización Proyecto Minero Cerro Casale. MWH Chile
- EIA Proyecto Lobo Marte (2011). Kinross

- EIA Proyecto Volcán (2012). Andina Minerals
- Escuder R.; Fraile, J.; Jordana, S. Ribera, F. Sánchez, V. y Vázquez, E. (2009). Hidrogeología. Conceptos Básicos de Hidrología Subterránea. Editores: Comisión Docente Curso Internacional de Hidrología Subterránea. Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea (FCIHS). Primera Edición. Barcelona (España).
- Espinoza, C (2015). Caracterización Hidrogeológica Sistema acuífero Ciénaga Redonda.
- Geodatos (2009). Estudio de Conductividad GEM-2 Sector Nacimiento Río Peñas Blancas Altiplano III Región de Chile
- Geodatos (2009). Estudio Geofísico Transiente Electromagnético (TEM) Sectores Río Lamas, Barrancas Blancas, Peñas Blancas y Piedra Pómez. Altiplano III Región de Atacama.
- Geodatos (2010). Estudio de Gravimetría Sector Laguna Verde, III Región de Atacama.
- Geodatos (2010). Estudio Geofísico Transiente Electromagnético (NanoTEM) Sector Río Lamas, Altiplano III Región de Atacama.
- Geodatos (2010). Estudio Geofísico Transiente Electromagnético (TEM). Re-inversión de Sondeos TEM, Sector Río Lamas, Altiplano III Región de Atacama.
- Geodatos (2010). Gravimetría Quebrada Piedra Pómez, Sector Piedra Pómez, Altiplano III Región de Atacama.
- Geodatos (2010). Perfilaje Geofísico de Pozos Sector Quebrada Piedra Pómez, III Región de Atacama.
- Golder (2012). Construcción y calibración del Modelo Proyecto Lobo Marte - modelos de flujo subterráneo. Anexo P-T010, Anexo P-T011, Anexo P-T012 y Anexo P-T013.
- Henríquez, Hugo; Montti, Silvia; Falcón, Eduardo (1975). Estudio Hidrogeológico de la Cuenca del Salar de Pedernales. Provincia de Atacama. Instituto de Investigaciones Geológicas.
- Houston, John (2006). Evaporation in the Atacama Desert: An empirical study of spatio-temporal variations and their causes. International Journal of Hyrology 330.
- Houston, John (2006). Variability of precipitation in the Atacama Desert: its causes and hydrological impact. International Journal of Climatology 26.
- Howari, F; Goodell, P; Miyamoto, S. (2002). Spectral properties of salt crusts formed on saline soils. Journal of Environmental Quality 31.
- IPLA Ingenieros Consultores (1984). Balance hidrológico nacional regiones III y IV. DGA.

- Iriarte, S. (1999). Mapa hidrogeológico de la cuenca del Salar de Maricunga: sector Salar de Maricunga, escala 1:100.000. SERNAGEOMIN.
- Johnson, J. (2009). Evaporación desde napas freáticas someras en cuencas endorreicas del altiplano chileno. Tesis de Magister en Ciencias de la Ingeniería. Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Kinross-Amec (2011). Proyecto Lobo Marte. Línea base medio físico.
- Koshal, AK. (2012). Spectral characteristics of soil salinity areas in parts of South-West Punjab through Remote Sensing and GIS. International Journal of Remote Sensing and GIS 1.
- Li, Linlin; et al. (2015). Evaluation of MODIS Spectral Indices for Monitoring Hydrological Dynamics of a Small, Seasonally-Flooded Wetland in Southern Spain. Wetlands 35.
- Li3Energy. (2012) Technical report on the Maricunga lithium project region III, Chile.
- Lizama, M.; Payano, R.; Escorcia, J.; Sendra, G.; Jiménez, N.; Pérez, D.; Benavente, O. (2016). Diagnóstico de disponibilidad hídrica en cuencas Alto-Andinas de la región de Atacama, fase 3. Informe final. AMPHOS 21. S.I.T. Nº 398.
- Lüdi, A; Beyrich, F; Matzler, C. (2005). Determination of the turbulent temperature-humidity correlation from scintillometric measurements. Boundary-Layer Meteorol. 117.
- McFeeters, SK. (1996). The use of the normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features. International Journal of Remote Sensing 17.
- Meijninger, WML; Green, AE; Hartogensis, OK; Kohsiek, W; Hoedjes, JCB; Zuurbier, RM; De Bruin, HAR. (2002). Determination of area-averaged water vapour fluxes with large aperture and radio wave scintillometers over a heterogeneous surface - flevoland field experiment. Boundary-Layer Meteorol. 105.
- Mpodozis, C.; Iriarte, S. Gardeweg, M.; Valenzuela, M. (2012). Carta Laguna del Negro Francisco, escala 1:100.000. Carta Geológica de Chile, SERNAGEOMIN.
- Muñoz J. et al., (2009). Mapa geológico Salar de Maricunga, escala 1:150.000. Levantamiento hidrogeológico para el desarrollo de nuevas fuentes de Agua en áreas prioritarias de la zona norte de Chile, Regiones I, II y III. Etapa II, Parte Final. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental Pontificia Universidad Católica de Chile. S.I.T. N°195, DGA.
- Muñoz Pardo, J. (2009). Levantamiento hidrogeológico para el desarrollo de nuevas fuentes de agua en áreas prioritarias de la zona norte de Chile, regiones XV, I, II Y III. Etapa 2. Salares de Maricunga y Pedernales. Pontificia Universidad Católica de Chile. PUC. S.I.T. N°195, DGA.

- Muñoz, J. et al., (2008) Levantamiento hidrogeológico para el desarrollo de nuevas fuentes de agua en áreas prioritarias de la zona norte de Chile, regiones XV, I, II y III. Etapa 1. Parte III. Hidrología Regional del Altiplano de Chile. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental Pontificia Universidad Católica de Chile. S.I.T. N°157, DGA. GHD-ANDINA, (2012). Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Minero Volcán.
- Ordoyne, C; Friedl, MA. (2008). Using MODIS data to characterize seasonal inundation patterns in the Florida Everglades. Remote Sensing of Environment 112.
- Pettorelli, N; Vik, JO; Mysterud, A; et al. (2005). Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. Trends in Ecology & Evolution 20.
- Pontificia Universidad Católica de Chile (2009). Mapa Diagramas de Stiff Salares de Pedernales y Maricunga, escala 1:150.000. DGA.
- Risacher, F., Alonso, H., Salazar, C. (1999). Geoquímica de aguas en cuencas cerradas: I, II y III regiones-Chile. DGA-UCN-IRD. S.I.T. N°51.
- Rokni, K; Ahmad, A; Selamat, A; et al. (2014). Water feature extraction and change detection using multitemporal landsat imagery. Remote Sensing 6.
- Salazar, C; Rojas, L; Lillo, A; Aguirre, E. (1999). Análisis de requerimientos hídricos de vegas y bofedales en el norte de Chile. Revista Vertiente, Volumen 7, p. 19-25.
- Santibáñez, I., Venegas, M., Espinoza, C. (2006). Hidrogeología de la cuenca campo de Piedra Pómez - Laguna Verde, escala 1:100.000. SERNAGEOMIN.
- Schüttemeyer, D; Moene, AF; Holtslag, AAM; De Bruin, HAR; De Giesen, NV. (2006). Surface fluxes and characteristics of drying semi-arid terrain in west africa. Boundary-Layer Meteorol. 118.
- SEA, 2012. Guía para el uso de modelos de aguas subterráneas en el SEIA.
- SERNAGEOMIN (1999). Mapa hidrogeológico de la cuenca del Salar de Maricunga.
- SRK Consulting (2011). Actualización Estudio Hidrogeológico Piedra Pómez. Apéndice B.Geofísica. Estudio de Impacto Ambiental Optimización Proyecto Minero Cerro Casale. MWHCía. Minera Cerro Casale.
- Struckmeier, W.F. y Margat, J. (1995). Hydrogeological Maps. A guide and a standar legend. International Association of Hydrogeologists (IAH). International contributions to Hydrogeology; Vol. 17, 177 p. Hannover, Alemania.
- Tassara, A. (1997). Mapa geológico del Salar de Maricunga, región de Atacama, escala 1:50.000. Informe registrado IR-97-10. SERNAGEOMIN.

- Teck-MDO (1998). Estudio hidrológico del Salar de Maricunga. Exploración y desarrollo de recursos de agua S.A.
- Tucker, CJ. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. Remote Sensing of Environment 8.
- Vargas, J. (2013). Diagnóstico de disponibilidad hídrica en cuencas alto-andinas de la región de Atacama. AQUATERRA. S.I.T. 329, DGA.
- Vargas, J. et al., (2011). Estimación de recarga en cuencas altiplánicas, región de Atacama. AQUATERRA ING. Ltda. S.I.T. N°251, DGA.
- Venegas, M., Iriarte, S., Aguirre, I. (2000). Mapa hidrogeológico de la cuenca del Salar de Maricunga: sector Ciénaga Redonda, escala 1:100.000. SERNAGEOMIN.
- Vrieling, A; de Beurs, KM; Brown, ME. (2011). Variability of African farming systems from phenological analysis of NDVI time series. Climatic Change 109.
- Wang, B; Jin, W; Nimmo, J; Lei Yang, L; Wang, W. (2008). Estimating groundwater recharge in Hebei Plain, China under varying land use practices using tritium and bromide tracers. Journal of Hydrology 356.
- Xu, Y; Mo, Y; Cai, Y; Li, X. (2005). Analysis on groundwater table drawdown by land use and the quest for sustainable water. Agricultural Water Management 75.
- Xu, ZW; Liu, SM; Li, X; Wang, JM; Zhu, ZL; Xu, TR; Wang, WZ; Ma, MG. (2013). Intercomparison of surface energy flux measurement systems used during the HiWATER-MUSOEXE. JGR Atm. 118.
- Yee, MS; Pauwels, VRN; Daly, E; Beringerb, J; Rudiger, C; McCabe, MF; Walker, JP. (2015). A comparison of optical and microwave scintillometers with eddy covariance derived surface heat fluxes. Agri. Forest Meteorol. 213.