

# 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 Pedernales

Comité de Minería No Metálica CORFO

26 de enero 2018

Elaborado:	Revisado	Verificado:	Validado:
Isaac Cabezuelo Martin Lizama Fernanda Cereceda Adrián Muñoz Diego Pérez Doménico Sciolla	Pilar Enguita Laura Tapias Luciano Achurra	Pilar Enguita	Juan Castaño

# Índice

<b>RESUMEN EJECUTIVO .....</b>	<b>1</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>3</b>
1.1 OBJETIVOS .....	4
1.2 SITUACIÓN GEOGRÁFICA.....	5
1.3 METODOLOGÍA DE TRABAJO.....	7
1.3.1 <i>Recopilación y análisis de antecedentes</i> .....	7
1.3.2 <i>Catastro de puntos</i> .....	11
1.3.3 <i>Caracterización hidrológica y geológica</i> .....	14
1.3.4 <i>Análisis hidrogeológico</i> .....	14
1.3.5 <i>Análisis hidroquímico e isotópico</i> .....	16
1.3.6 <i>Elaboración del modelo hidrogeológico 3D (Leapfrog)</i> .....	16
1.3.7 <i>Integración de la información en un proyecto GIS</i> .....	24
1.3.8 <i>Balance hídrico</i> .....	24
<b>2. ANÁLISIS Y VALORACIÓN DE LOS ANTECEDENTES .....</b>	<b>25</b>
2.1 ANÁLISIS Y REVISIÓN DE LA GEOLOGÍA.....	25
2.2 ANÁLISIS Y REVISIÓN DE LA GEOMORFOLOGÍA.....	28
2.3 ANÁLISIS Y REVISIÓN DE LA METEOROLOGÍA .....	31
2.4 ANÁLISIS Y REVISIÓN DE LA HIDROLOGÍA.....	34
2.5 ANÁLISIS Y REVISIÓN DE LA GEOFÍSICA .....	36
2.6 ANÁLISIS Y REVISIÓN DE LA HIDROGEOLOGÍA .....	39
2.7 ANÁLISIS Y REVISIÓN DE LA HIDROGEOQUÍMICA.....	41
2.8 ANÁLISIS Y REVISIÓN DE LOS ISÓTOPOS .....	44
2.9 ANÁLISIS Y REVISIÓN DEL BALANCE HÍDRICO .....	45
2.10 ANÁLISIS Y REVISIÓN DE LOS MODELOS NUMÉRICOS.....	46
2.11 SÍNTESIS DE LA VALORACIÓN DE LOS ANTECEDENTES .....	47
<b>3. CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA.....</b>	<b>50</b>
3.1 CARACTERIZACIÓN HIDROGRÁFICA .....	50
3.1.1 <i>Cuenca hidrográfica Salar de Pedernales</i> .....	50
3.1.2 <i>Cuenca hidrográfica La Laguna</i> .....	52
3.1.3 <i>Cuenca hidrográfica Quebrada Maranceles</i> .....	52
3.2 CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA.....	52
3.3 ANÁLISIS HIDROLÓGICO.....	54

3.3.1	<i>Análisis de la precipitación</i> .....	54
3.3.2	<i>Distribución espacial de las precipitaciones</i> .....	60
3.3.3	<i>Análisis de escorrentía</i> .....	62
3.3.4	<i>Evaporación</i> .....	66
<b>4.</b>	<b>CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA</b> .....	<b>69</b>
4.1	MARCO GEOLÓGICO.....	69
4.2	UNIDADES GEOLÓGICAS.....	70
4.2.1	<i>Depósitos no consolidados</i> .....	71
4.2.2	<i>Rocas estratificadas</i> .....	74
4.2.3	<i>Rocas intrusivas</i> .....	79
4.3	GEOLOGÍA ESTRUCTURAL.....	82
4.4	COLUMNAS ESTRATIGRÁFICAS REPRESENTATIVAS .....	85
<b>5.</b>	<b>CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA</b> .....	<b>102</b>
5.1	PARÁMETROS HIDRÁULICOS .....	102
5.1.1	<i>Permeabilidad y Transmisividad</i> .....	102
5.1.2	<i>Coeficiente de almacenamiento</i> .....	107
5.2	UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS (UH) .....	109
5.2.1	<i>Unidad hidrogeológica 1 (UH 1)</i> .....	110
5.2.2	<i>Unidad hidrogeológica 2 (UH 2)</i> .....	111
5.2.3	<i>Unidad hidrogeológica 3 (UH 3)</i> .....	112
5.2.4	<i>Unidad hidrogeológica 4 (UH 4)</i> .....	113
5.2.5	<i>Unidad hidrogeológica 5 (UH 5)</i> .....	117
5.2.6	<i>Unidad hidrogeológica 6 (UH 6): Sustrato rocoso / basamento</i> .....	119
5.3	GEOMETRÍA DE LOS ACUÍFEROS (3D LEAPFROG).....	123
5.3.1	<i>Prospecciones geofísicas</i> .....	124
5.3.2	<i>Identificación de la salmuera e interfaz salina</i> .....	132
5.3.3	<i>Geometría de los acuíferos y basamento</i> .....	134
5.4	PIEZOMETRÍA.....	147
5.4.1	<i>Inventario de puntos de agua</i> .....	147
5.4.2	<i>Evolución de niveles</i> .....	152
5.4.3	<i>Funcionamiento del flujo en la zona de estudio</i> .....	153
5.5	VOLUMEN ALMACENAMIENTO TOTAL DEL ACUÍFERO SATURADO.....	158
<b>6.</b>	<b>HIDROGEOQUÍMICA E ISÓTOPOS</b> .....	<b>159</b>
6.1	INFORMACIÓN DISPONIBLE.....	159

6.2	CLASIFICACIÓN DE LOS PUNTOS DE AGUA Y SECTORIZACIÓN .....	159
6.3	VALIDACIÓN DE LOS DATOS .....	163
6.4	PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS.....	166
6.5	COMPONENTES MAYORITARIOS Y FACIES .....	170
6.5.1	<i>Sector Áreas de Recarga La Ola y Juncalito</i> .....	172
6.5.3	<i>Sector Llanos Leoncito-La Ola-Pedernales</i> .....	174
6.5.4	<i>Sector La Laguna</i> .....	175
6.5.5	<i>Sector Salar de Pedernales</i> .....	176
6.6	PARÁMETROS REPRESENTATIVOS DE SALARES.....	177
6.6.1	<i>Evolución temporal</i> .....	178
6.6.2	<i>Distribución espacial</i> .....	182
6.7	RELACIONES IÓNICAS.....	189
6.7.1	<i>Na/Cl</i> .....	189
6.7.2	<i>Ca/SO<sub>4</sub></i> .....	191
6.7.3	<i>Ca/HCO<sub>3</sub></i> .....	194
6.9	ISÓTOPOS .....	196
6.9.1	<i>Evolución temporal <math>\delta^2H</math> y <math>\delta^{18}O</math></i> .....	196
6.9.2	<i>Relación <math>\delta^2H</math> / <math>\delta^{18}O</math></i> .....	199
6.9.3	<i>Relación Altitud / <math>\delta^{18}O</math></i> .....	201
6.9.4	<i>Relación <math>B^{3+}/Cl</math> / <math>\delta^{18}O</math></i> .....	205
6.10	MODELO HIDROGEOQUÍMICO .....	207
<b>7.</b>	<b>SITIOS DE PROTECCIÓN AMBIENTAL Y SECTORES DE EXPLOTACIÓN.....</b>	<b>210</b>
7.1	SITIOS DE PROTECCIÓN AMBIENTAL.....	210
7.2	SECTORES DE EXPLOTACIÓN Y DERECHOS DE AGUAS .....	213
<b>8.</b>	<b>DETERMINACIÓN DE FLUJOS DE ENTRADA Y SALIDA .....</b>	<b>215</b>
8.1	PERCOLACIÓN .....	215
8.2	ESCORRENTÍA SUPERFICIAL.....	218
8.3	BALANCE HIDROMETEOROLÓGICO.....	220
8.4	EVAPORACIÓN EN EL SALAR DE PEDERNALES Y LA LAGUNA.....	222
8.4.1	<i>Curvas de isoprofundidad</i> .....	222
8.4.2	<i>Clasificación de tipos de suelo</i> .....	224
8.4.3	<i>Curvas de evaporación contra profundidad</i> .....	225
8.4.4	<i>Calculo de evaporación</i> .....	225
8.5	EVAPOTRANSPIRACIÓN EN HUMEDALES.....	229

8.6	EXTRACCIONES ANTRÓPICAS.....	230
<b>9.</b>	<b>BALANCE HÍDRICO.....</b>	<b>231</b>
<b>10.</b>	<b>POTENCIAL DE LITIO EN EL SALAR DE PEDERNALES.....</b>	<b>234</b>
10.1	EL LITIO COMO RECURSO.....	234
10.2	TECNOLOGÍAS DE EXTRACCIÓN DEL LITIO Y SUBPRODUCTOS .....	235
10.3	PUREZA DEL CONCENTRADO Y SUBPRODUCTOS.....	236
10.4	ANTECEDENTES DE LA ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE LITIO .....	237
10.5	ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE LITIO EN EL SALAR DE PEDERNALES .....	238
<b>11.</b>	<b>SECTORES HIDROGEOLÓGICOS DE APROVECHAMIENTO COMÚN (SHAC).....</b>	<b>242</b>
<b>12.</b>	<b>EVALUACIÓN DE LA PLATAFORMA PARA LA MODELIZACIÓN NUMÉRICA DE FLUJO</b>	<b>245</b>
<b>13.</b>	<b>INCERTIDUMBRES DEL MODELO CONCEPTUAL Y GEOMETRÍA 3D.....</b>	<b>247</b>
13.1	INCERTIDUMBRES GENERALES .....	247
13.2	INCERTIDUMBRES CON RESPECTO AL MODELO EN LEAPFROG .....	247
13.3	INCERTIDUMBRES CON RESPECTO A LA IDENTIFICACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LOS ACUÍFEROS DEL SALAR DE PEDERNALES Y CONEXIÓN CON OTRAS CUENCAS. ....	248
13.4	INCERTIDUMBRES CON RESPECTO AL BASAMENTO .....	249
13.5	INCERTIDUMBRES CON RESPECTO AL BALANCE HÍDRICO (ENTRADAS Y SALIDAS) .....	249
13.6	POTENCIAL DE LITIO .....	250
<b>14.</b>	<b>SÍNTESIS Y CONCLUSIONES.....</b>	<b>251</b>
<b>15.</b>	<b>RECOMENDACIONES DE LA ZONA DE ESTUDIO.....</b>	<b>254</b>
15.1	RECOPIACIÓN DE ANTECEDENTES .....	254
15.2	RECOMENDACIONES DE GEOLOGÍA.....	254
15.3	RECOMENDACIONES DE GEOFÍSICA .....	256
15.4	RECOMENDACIONES DE HIDROLOGÍA Y METEOROLOGÍA .....	257
15.5	RECOMENDACIONES DE HIDROGEOLOGÍA .....	261
15.6	RECOMENDACIONES DE HIDROQUÍMICA .....	263
15.7	RECOMENDACIONES DE LOS MODELOS NUMÉRICOS.....	265
<b>16.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>269</b>

## ANEXOS

ANEXO I. ANTECEDENTES Y BASES DE DATOS

ANEXO II. GEOLOGÍA Y GEOFÍSICA

ANEXO III. HIDROGEOLOGÍA

ANEXO IV. HIDROQUÍMICA

ANEXO V. BALANCE HÍDRICO

ANEXO VI. LEAPFROG

ANEXO VII. GEODATABASE SIG

## Índice de figuras

Figura 1-1. Ubicación de la zona de estudio.....	6
Figura 1-2. Mapa de la zona de estudio con la representación de los puntos que componen el catastro.....	13
Figura 1-3. Perfiles TEM realizados en el año 2016. Exageración vertical de 6x.....	23
Figura 2-1. Imagen LANDSAT del Salar de Pedernales.....	26
Figura 2-2. Mapa geomorfológico dominio Salar de Pedernales.....	30
Figura 2-3. Ubicación de los perfiles de geofísica disponible y no disponible.....	38
Figura 3-1. Cuencas y red hidrográfica de la cuenca Salar de Pedernales. Fuente: elaboración propia.....	51
Figura 3-2. Curvas hipsométricas.....	53
Figura 3-3. Ubicación estaciones meteorológicas.....	56
Figura 3-4. Serie de tiempo de precipitación anual (periodo 1971-2016).....	58
Figura 3-5. Relación de altura contra precipitación media anual.....	60
Figura 3-6. Isoyetas de precipitación media anual en el área de estudio.....	61
Figura 3-7. Ubicación de estaciones fluviométricas en el área de estudio.....	64
Figura 3-8. Curvas de variación estacional de caudales para distintas probabilidades de excedencia (%).....	65
Figura 3-9. Gradiente de la evaporación media anual.....	66
Figura 4-1. Localización regional de la Cuenca de Pedernales,.....	69
Figura 4-2. Mapa Geológico cuenca Salar de Pedernales.....	81
Figura 4-3. Mapa de estructura de la cuenca Salar de Pedernales.....	83
Figura 4-4. Cortes Geológicos esquemáticos A-A' y B-B' de la cuenca Salar de Pedernales.....	84
Figura 4-5. Distribución de las columnas litológicas usadas en la descripción estratigráfica divididas en sectores.....	86
Figura 4-6. Columnas estratigráficas SON-1, 3, 5 y 6.....	87
Figura 4-7. Columnas estratigráficas S-4, S-5, SPD-1, 2 y 3.....	88
Figura 4-8. Columnas estratigráficas B-2, P-15 y P-17.....	90
Figura 4-9. Sondaje Los Llanos 1 (EXA). 2593 m.....	92

Figura 4-10. Columnas litológicas SPB-16 y SPB-7. ....	93
Figura 4-11. Columnas litológicas SPB-10 y SPB-13. ....	94
Figura 4-12. Columna litológica SPB-8. ....	95
Figura 4-13: Columnas litológicas J-7, PO-1 y PO-3. ....	97
Figura 4-14: Columnas litológicas J-3 y J-4. ....	98
Figura 4-15. Columnas litológicas de los pozos CP-05B y CP-10. ....	100
Figura 4-16. Columna litológica del pozo CP-01A. ....	101
Figura 5-1. Mapa de distribución de los datos permeabilidad (m/d) más significativos.....	104
Figura 5-2. Clasificación de las Unidades Hidrogeológicas en la cuenca. ....	110
Figura 5-3. Mapa hidrogeológico cuenca Salar de Pedernales. ....	122
Figura 5-4. Perfiles geofísicos utilizados para la descripción de la geometría acuífera. ....	125
Figura 5-5. Perfil Geofísico Llano de Pedernales.....	126
Figura 5-6. Perfil TEM L1E Salar de Pedernales (Geodatos 2004). Orientación S-N. ....	128
Figura 5-7. Perfil TEM L2N Salar de Pedernales. Orientación W-E.....	128
Figura 5-8. Perfil TEM L5E Llano El Leoncito. Orientación SE-NO.....	129
Figura 5-9. Perfil TEM L4 en sector Llano Los Arroyos. Orientación SW-NE. ....	130
Figura 5-10. Perfil TEM P2 en sector Llano Los Pajaritos. ....	131
Figura 5-11 Identificación de áreas del salar y salmuera. ....	133
Figura 5-12. Vista 3D de los volúmenes de la cuenca. ....	136
Figura 5-13. Vista 3D de los volúmenes acuíferos de la cuenca. ....	137
Figura 5-14. Corte hidrogeológico 1-1' Leapfrog SW-NE zona Salar de Pedernales. Exageración vertical: x3... 138	138
Figura 5-15. Corte hidrogeológico 2-2' Leapfrog SW-NE zona Llano de Pedernales. Exageración vertical: x3. . 139	139
Figura 5-16. Corte hidrogeológico 3-3' Leapfrog W-E zona La Ola. Exageración vertical: x3 ..... 140	140
Figura 5-17. Corte hidrogeológico 4-4' Los Pajaritos SW-NE zona Los Leoncitos. Exageración vertical: x3. .... 141	141
Figura 5-18. Corte hidrogeológico 5-5' Leapfrog W-E zona Llano de los Arroyos. Exageración vertical: x3. .... 142	142
Figura 5-19. Corte hidrogeológico A-A' zona Salar de Pedernales. ....	144
Figura 5-20. Corte hidrogeológico B-B' zona Pedernales-La Laguna.....	145
Figura 5-21. Perfil hidrogeológico C-C' zona Llano de los Arroyos. ....	146
Figura 5-22. Mapa con los puntos con información de nivel agrupados por tipo de punto. ....	151
Figura 5-23. Evolución de los niveles de agua para los pozos J-2, J-3 y J-7, promedios anuales. ....	152
Figura 5-24. Evolución de los niveles de agua en los pozos SON-2 y SON-6.....	153
Figura 5-25. Mapa piezométrico (sector norte, 2016) con direcciones del flujo subterráneo en la parte septentrional de zona de estudio.....	155
Figura 5-26. Mapa piezométrico (sector sur, 2016) con direcciones del flujo subterráneo en la parte meridional de zona de estudio.....	156
Figura 5-27. Piezometría cuenca Salar de Pedernales.....	157
Figura 6-1: Tipos de Punto del área de estudio. ....	161
Figura 6-2: Sectorización Hidroquímica. ....	162
Figura 6-3: Relación entre la CE y TDS.....	168
Figura 6-4: Distribución espacial de la conductividad hidráulica. ....	169

Figura 6-5: Diagrama Piper para todos los puntos según su tipología.....	171
Figura 6-6: Diagrama Piper, Sector Áreas de Recarga La Ola y Juncalito. ....	173
Figura 6-7: Diagrama Piper, Sector Llanos de Leoncito-La Ola-Pedernales. ....	174
Figura 6-8: Diagrama Piper, Sector La Laguna.....	175
Figura 6-9: Diagrama Piper, Sector Salar de Pedernales. ....	176
Figura 6-10: Evolución temporal de B.....	178
Figura 6-11: Evolución temporal de Li. ....	179
Figura 6-12: Evolución temporal de Mg. ....	180
Figura 6-13: Evolución temporal de K.....	181
Figura 6-14: Concentración de B, Li, Mg y K según tipología y sector geográfico. ....	184
Figura 6-15: Distribución de B.....	185
Figura 6-16: Distribución de Li. ....	186
Figura 6-17: Distribución de Mg. ....	187
Figura 6-18: Distribución de K.....	188
Figura 6-19: Relación Na/Cl de las aguas de la cuenca salar de Pedernales. ....	190
Figura 6-20: Ejemplo de relación rCa/rSO4 con vías evolutivas (sulfatada y cálcica). ....	191
Figura 6-21: Relación Ca/SO4 de las aguas de la cuenca salar de Pedernales.....	193
Figura 6-22: Relación Ca/HCO3 de las aguas de la cuenca salar de Pedernales. ....	195
Figura 6-23: Evolución temporal de δ18O en las aguas estudiadas. ....	197
Figura 6-24: Evolución temporal de δ2H en las aguas estudiadas. ....	198
Figura 6-25: Composición isotópica δ2H v/s δ18O de las aguas analizadas.....	200
Figura 6-26: Ejemplo de una relación entre diferentes muestras de aguas y la recta altitudinal local. Fuente: FCIHS (2009). ....	202
Figura 6-27: Relación de la cota topográfica de muestreo v/s δ18O de las aguas analizadas. ....	203
Figura 6-28: Relación B3+/Cl- / δ18O en las aguas de estudio. ....	206
Figura 7-1. Sitios de protección ambiental de la zona de estudio.....	212
Figura 7-2. Derechos de agua otorgados por la DGA y caudales de extracción. ....	214
Figura 8-1. Sistema hidrometeorológico simplificado de la precipitación al caer al suelo.....	221
Figura 8-2. A) Imagen satelital. B) Índice de humedad (TCWI). C) Índice de brillo (TCBI). D) Reclasificación....	223
Figura 8-3. Comparación de datos de lisímetro CODELCO con evaporación en puntos Z9 y Z10 de los estudios de Johnson (2009 y 2010). ....	226
Figura 8-4: Curvas de evaporación v/s profundidad del Tipo de Suelo I (Salino reciente).....	226
Figura 8-5: Curvas de evaporación v/s profundidad del Tipo de Suelo II.....	227
Figura 8-6: Curvas de evaporación v/s profundidad del Tipo de Suelo III (Núcleo Salino). ....	227
Figura 9-1. Vista esquemática 3D del balance hídrico cuenca Salar de Pedernales. ....	233
Figura 10-1. (1) Usos de compuestos de litio por aplicación en 2014. (2) Distribución de los recursos de litio por país.....	234
Figura 10-2. Proceso de producción de carbonato de litio a partir de salmuera. ....	235
Figura 10-3. Esquema en profundidad de los volúmenes definidos.....	239
Figura 11-1. Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común cuenca Salar de Pedernales.....	244

Figura 15-1. Propuesta de instalación de los anillos de infiltración..... 260  
 Figura 15-2. Ubicación del dominio modelado de CHP y zona que se recomienda a ser modelada. .... 266

## Índice de tablas

Tabla 1-1. Inventario de columnas litológicas proyectadas en Leapfrog (continuación 2). .... 21  
 Tabla 1-2. Perfiles geofísicos usados para definir la geometría 3D. .... 22  
 Tabla 2-1. Valoración de los antecedentes. .... 49  
 Tabla 3-1. Parámetros morfológicos principales del área de estudio..... 53  
 Tabla 3-2. Estaciones meteorológicas. .... 55  
 Tabla 3-3. Disponibilidad de información pluviométrica. .... 57  
 Tabla 3-4. Estadígrafos principales de la precipitación anual. .... 59  
 Tabla 3-5: Precipitación media anual en el área de estudio. .... 62  
 Tabla 3-6. Estaciones fluviométricas. .... 63  
 Tabla 3-7. Disponibilidad de información fluviométrica. .... 63  
 Tabla 3-8. Estaciones con medición de evaporación de tanque. .... 67  
 Tabla 3-9. Disponibilidad de información de evaporación de tanque..... 68  
 Tabla 5-1. Tabla de conductividad hidráulica y UH..... 102  
 Tabla 5-2. Parámetros hidráulicos históricos zona norte de la cuenca en estudio. .... 105  
 Tabla 5-3. Parámetros hidráulicos históricos zona norte de la cuenca en estudio. .... 106  
 Tabla 5-4. Coeficiente de almacenamiento para la zona norte y central-sur de la cuenca Salar de Pedernales. 108  
 Tabla 5-5. Tabla resumen de Unidades Hidrogeológicas y parámetros hidráulicos. .... 121  
 Tabla 5-6. Estudios geofísicos conocidos en la cuenca Salar de Pedernales. .... 124  
 Tabla 5-7. Puntos de agua con información de nivel. .... 150  
 Tabla 5-8. Volumen de almacenamiento total del sistema acuífero dulce y salmuera de la cuenca Salar de Pedernales..... 158  
 Tabla 6-1: Tipos y subtipos de punto para clasificación hidroquímica. .... 159  
 Tabla 6-2: Muestras con BI fuera de rango..... 165  
 Tabla 6-3: Muestras no consideradas para diagrama Piper. .... 166  
 Tabla 6-4: Concentraciones Li, B, K y Mg..... 177  
 Tabla 8-1. Valores del coeficiente de infiltración (CI) en función de la permeabilidad cualitativa. .... 216  
 Tabla 8-2. Parámetros para la estimación de CID y CIL en la cuenca hidrográfica Salar de Pedernales..... 217  
 Tabla 8-3. Parámetros para la estimación de CID y CIL en la cuenca hidrográfica la Laguna. .... 217  
 Tabla 8-4. Parámetros para la estimación de CID y CIL en la cuenca hidrográfica Quebrada los Maranceles. ... 217  
 Tabla 8-5. Estimación de la percolación. .... 218  
 Tabla 8-6. Estimación de escorrentía total y comparación con estudios previos. .... 219  
 Tabla 8-7. Resultados del balance hidrometeorológico. .... 221  
 Tabla 8-8. Evaporación estimada para el salar de Pedernales..... 228  
 Tabla 8-9. Evapotranspiración estimada en el área de estudio. .... 229  
 Tabla 8-10. Derechos y extracciones antrópicas actuales. .... 230

Tabla 9-1. Balance hídrico en el acuífero del área de estudio. ....	232
Tabla 9-2. Estimaciones de recarga al salar en régimen natural. ....	232
Tabla 10-1. Comparaciones relevantes en salares en el mundo. ....	237
Tabla 10-2. Concentraciones de Li y K en los salares del norte de Chile, sector zona S. ....	238
Tabla 10-3. Resumen estimación en toneladas del potencial de Litio. ....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Tabla 12-1: Comparativa de software para modelización numérica. ....	246
Tabla 14-1. Balance hídrico cuenca Salar de Pedernales. ....	253
Tabla 15-1: Costos y métodos de obtención de una topografía. ....	262
Tabla 15-2. Listado de parámetros posibles a analizar en laboratorio. ....	264

## 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 minerales 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 ha establecido 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 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 (Etapa I), del modelo hidrogeológico conceptual hidrogeológico (Etapa II) y la construcción del modelo Leapfrog 3D y de la información en un proyecto SIG (Etapa III).

La zona de estudio engloba la cuenca hidrogeológica Salar de Pedernales. Esta cuenca está conformada por las cuencas hidrográficas Salar de Pedernales, La Laguna y Quebrada Maranceles. Dichas cuencas hidrográficas se encuentran ubicadas en el sector cordillerano de la III Región, en la Provincia de Chañaral, a 150 km al NE de la capital regional, Copiapó. El conjunto del área de estudio presenta unas dimensiones aproximadas de 90 km de ancho por 90 km de largo, y ocupa una superficie en torno a 4.156 km<sup>2</sup>.

El Salar de Pedernales es el más grande de esta región, cubriendo una superficie aproximada de 446 km<sup>2</sup> y se encuentra ubicado en el extremo norte de la cuenca. Está formado por una costra de yeso y

halita, donde se identifican pequeñas lagunas ubicadas, generalmente, en los márgenes del salar. Aquellas ubicadas en el margen noreste del salar son profundos “ojos” en la costra de sal, mientras que las demás corresponden a lagunas superficiales.

Desde el punto de vista hidrográfico, la cuenca del Salar de Pedernales consta de tres ríos principales, el Leoncito, el Juncalito y el río La Ola, con un sentido de flujo que va desde el sur de la cuenca hacia el norte. El río Juncalito vierte la mayor parte de sus aguas al río Leoncito, tributario de La Ola, de forma artificial, a través del tranque El Juncal. Finalmente, el agua circula por el río la Ola hasta el sector central de la cuenca, donde se ubica el tranque La Ola, que recoge las aguas superficiales del sector meridional de la cuenca.

El acuífero identificado en la zona de estudio está constituido por materiales detríticos y fracturados con distintas propiedades hidráulicas, pero que muestran características similares en cuanto a su superficie piezométrica.

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, la dirección de flujo principal de la cuenca presenta a grandes rasgos una orientación SSE-NNW, desde las zonas más altas de la cuenca, hacia la depresión topográfica representada por el Salar de Pedernales.

La recarga en la cuenca se produce, esencialmente, mediante precipitaciones (lluvia y nieve). Las zonas de recarga se localizan en las partes más elevadas (Cordillera de Domeyko y Cordillera de Claudio Gay). Posteriormente, las aguas descienden hacia cotas más bajas descargando al Salar de Pedernales y lagunas (del Salar y de la Laguna).

Las aguas, procedentes tanto de la recarga directa sobre el acuífero como de la infiltración indirecta, continúan su descenso hacia las zonas bajas, alcanzando el Llano de Los Arroyos, el Llano Leoncito y el Llano La Ola (llanos formados principalmente por la UH 1) y, en el caso de las aguas procedentes del norte de la Cordillera de Claudio Gay, descienden por el Llano de la Vega Helada (cuenca hidrográfica La Laguna).

Del análisis de la hidroquímica e isotopía es posible identificar que las direcciones de flujo de las aguas superficiales y subterráneas poseen una trayectoria predominante de sur a norte, desde las partes altas a las bajas, convergiendo en el mismo Salar de Pedernales para luego ser afectadas por procesos de evaporación y disolución-precipitación generando reconcentración mineral.

En la zona del salar, es posible distinguir que las facies hidroquímicas son de tipo cloruradas sódicas y que presentan los mayores valores de conductividad eléctrica registrada ( $> 250.000 \mu\text{S}/\text{cm}$ ). Además, en estas zonas se encuentra también, la mayor concentración de Li, B, K y Mg.

A lo largo del estudio desarrollado han surgido una serie de recomendaciones que se han concentrado y detallado en el capítulo □ y que tienen como finalidad detallar las falencias de información en aquellas 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, 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, establecer 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 Pedernales** de la Etapa II y finalmente en la Etapa III se ha incluido, además, la construcción del modelo Leapfrog 3D y de la integración de la información en un proyecto GIS.

## 1.1 Objetivos

El objetivo principal de este informe consiste en recopilar todos los antecedentes existentes de la cuenca Salar de Pedernales-La Laguna-Quebrada Maranceles (las tres cuencas hidrográficas que conforman la zona de estudio denominada cuenca Salar de Pedernales según las bases técnicas del presente proyecto) con el fin de generar 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 principal objetivo es necesario desarrollar diversos objetivos específicos, que se enumeran a continuación:

- Revisión y 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.

- Diagnóstico o estimación del contenido potencial en litio que posee cada una de las tres cuencas.
- 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 Pedernales. Se encuentra ubicada en el sector cordillerano de la III Región, en la Provincia de Chañaral, a 40 km al E de El Salvador y a 165 km al NE de la capital regional, Copiapó.

El área de estudio se encuadra, aproximadamente entre las siguientes coordenadas en DATUM WGS84, las cuales se ilustran en la Figura 1-1.

- Límite Norte 7.120.000
- Límite Sur 7.030.000
- Límite Este 542.000
- Límite Oeste 465.000

La ruta más directa de acceso corresponde al camino a Montandón, que une la ciudad del El Salvador con el complejo fronterizo San Francisco, cerca del Salar de Maricunga. Otro acceso que sube a la cordillera es desde la ciudad de Copiapó por la quebrada de Paipote, a través de la Ruta Internacional N31 y por último una tercera alternativa es la nueva Carretera Internacional N177, que une Diego de Almagro con el Salar de Maricunga.

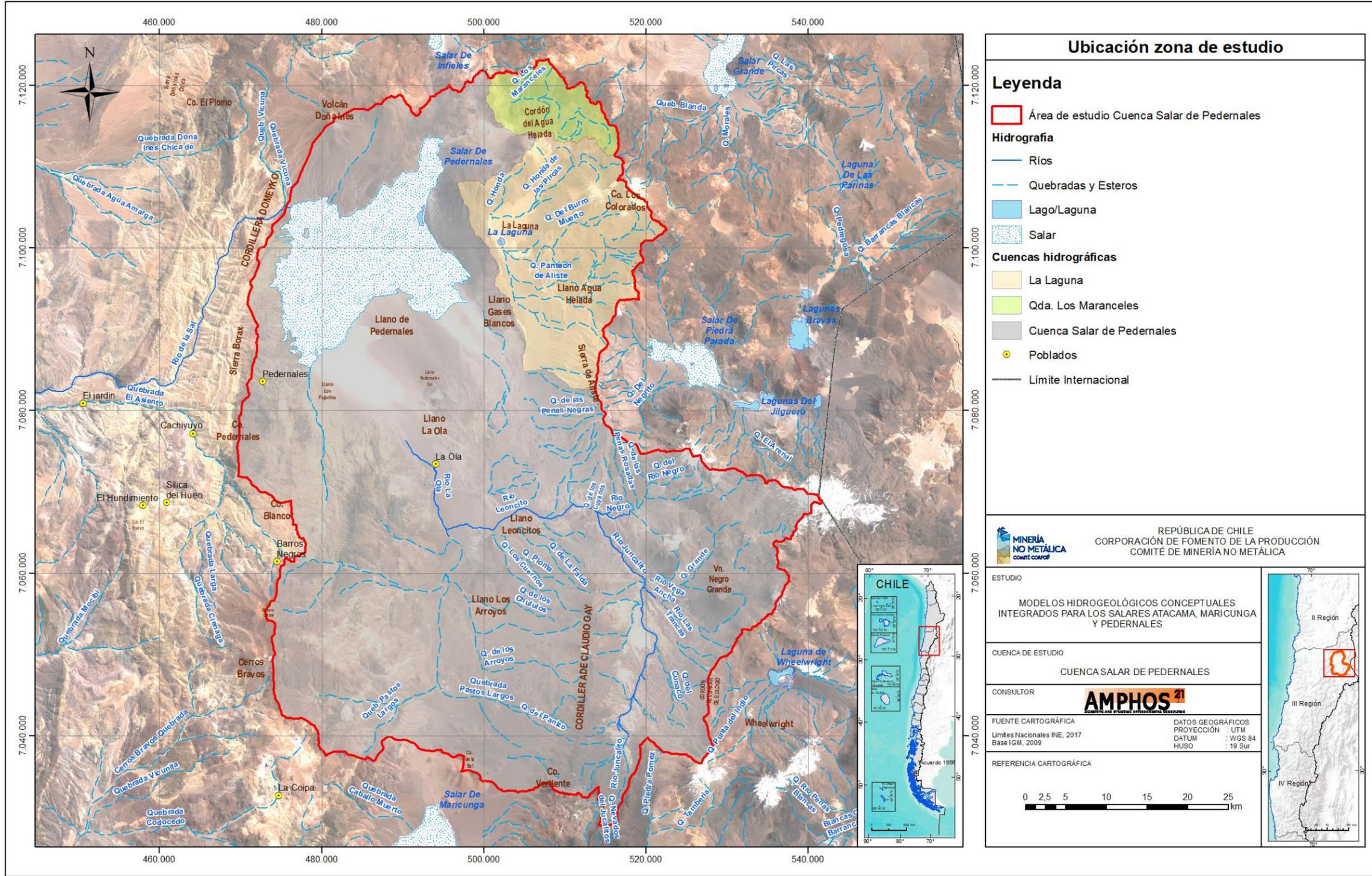


Figura 1-1. Ubicación de la zona de estudio.

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 (Anexo 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 integrado 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 "P" de Pedernales, seguida de una numeración correlativa (P\_REF.001; P\_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 hidrogeológica 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.

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, sísmica, 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 hidrográficas 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 hidrogeológico conceptual.

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 de Piper, Stiff, etc. 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.

### 1.3.2 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 249. 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 Pedernales, La Laguna o Quebrada Maranceles.
- **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 asociado:** si es un pozo y tiene un derecho de agua otorgado se especifica el código del derecho.
- **Caudal anual:** Se especifica el caudal anual promedio que se explota en un punto de agua en concreto.
- **Profundidad:** Profundidad 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 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: prueba 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.

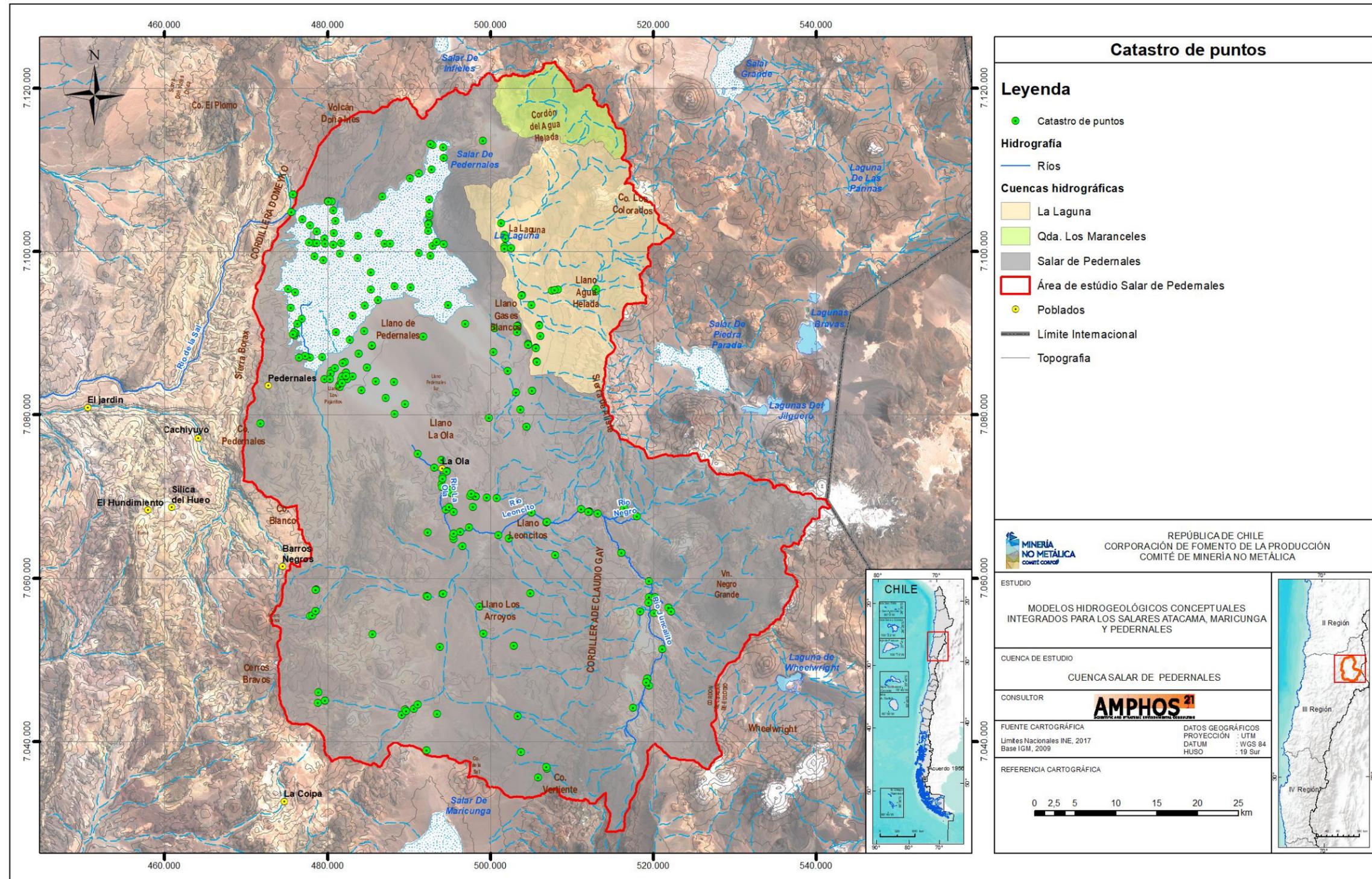


Figura 1-2. Mapa de la zona de estudio con la representación de los puntos que componen el catastro.

Fuente: elaboración propia.

### 1.3.3 Caracterización hidrológica y geológica

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.

Las unidades geológicas se han caracterizado a partir de la información preexistente procedente de los antecedentes disponibles en los documentos P\_REF.073, P\_REF.074 y P\_REF.075 asociados a las cuencas hidrográficas Salar de Pedernales, La Laguna y Quebrada Maranceles respectivamente. Estos documentos provienen del proyecto “*Diagnóstico de Disponibilidad Hídrica en Cuencas Alto-Andinas de la Región de Atacama, Fase 3*” realizado por Amphos 21 en 2016 para la Dirección General de Aguas. Además, en el presente informe se ha digitalizado el mapa geológico de Quebrada Maranceles. La cobertura SIG para las cuencas hidrográficas Salar de Pedernales y La Laguna proceden de la Fase 1 del proyecto citado realizado por Aquaterra en 2013.

Los parámetros morfológicos de las cuencas hidrográficas, así como la generación 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 hidrográfica a partir de curvas isoyetas. 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.

### 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 realizará 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 procederá a la caracterización de las unidades hidrogeológicas. Adicionalmente, se ha realizado 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 antiguo de referencia.
- **Obs:** cualquier observación referente al perfil.
- **Long\_calc:** indica la longitud del perfil en metros.

- **Sector:** indica la cuenca hidrográfica a la que pertenece el perfil (Pedernales, La Laguna o Quebrada Maranceles). Además, se indica con “Si-No” si el perfil está disponible y si está georeferenciado.

### 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 estudios anteriores. Para ello se recopilaron y revisaron los antecedentes, y con estos 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-01 y Anexo VII) (formato .shp).
- 84 columnas litológicas de pozos (Anexo II-02, en formato .jpg y .pdf, y Anexo VI-01-02, formato.csv y .xls).
- 88 perfiles geofísicos de las referencias P\_REF.056, P\_REF.057, P\_REF.058, P\_REF.060, P\_REF.080, P\_REF.082, P\_REF.083 y P\_REF.084 (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).

A partir de las columnas litológicas y perfiles geofísicos se determinaron los puntos de contacto entre las distintas Unidades Hidrogeológicas. Dichos puntos son la base de interpolación con que definir las superficies de contacto entre los volúmenes a generar. La falta de sondajes y perfiles geofísicos en toda

el área de estudio, tanto en superficie, como en profundidad, hacen necesaria la creación de puntos de control manual por medio de polilíneas. Mediante este método se consigue una mejor precisión y coherencia en la definición de los volúmenes de estudio. Los puntos de control se establecieron en base a los perfiles geofísicos, perfiles geológicos y a la geología e hidrogeología superficial.

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 la cuenca hidrográfica, 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 Hydro, se entregan dos conjuntos de archivos:

- el archivo 'Viewer\_Cuenca Salar de Pedernales' (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 6 archivos dxf, que corresponden a los 5 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 del Leapfrog Hydro (v 2.7.2)

##### **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 georreferenciar imágenes en el propio software, y exportarlas georreferenciadas.
- 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 hidráulicos, 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 y perfiles geológicos (Leapfrog)*

Para la construcción del modelo hidrogeológico conceptual se utilizaron las columnas litológicas y los niveles de agua medidos en una serie de pozos distribuidos a lo largo de la cuenca Salar de Pedernales. 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 de 204 sondajes de pozos. Dentro del Anexo VI (Leapfrog), en la carpeta INPUT se recopilan los datos de los sondajes utilizados (collar, azimuth/inclinación y litología). También se utilizaron para la realización del modelo 29 perfiles geológicos.

Para la creación de la superficie freática se utilizó la piezometría elaborada con los datos que se describen en el Capítulo 5.4, del presente informe.

Pozo	X_UTM	Y_UTM	Altitud m s.n.m	Profundidad pozo
B-1	485412	7088439	3398	80
B-2	484841	7085753	3411	78,5
B-3	488113	7084034	3456	130
B-4	489516	7081315	3486	120,5
B-7	482239	7085186	3390	85
E-1'	485391	7088451	3398	37
E-2	483030	7084666	3403	60
J-3	498114	7069987	3667	34
J-3	498128	7069977	3668	35,6
J-4	498164	7069963	3669	201
J-4'	498164	7069972	3669	82,38
J-7	493070	7073532	3554	80
Llano 1	496849	7091149	3466	2593
P-1 Anglo	492126	7057821	3673	100
P-13	485862	7084059	3434	50
P-15	487112	7082014	3460	50
P-17	488216	7080109	3486	50
P-18	484438	7090212	3376	15
P-19	480381	7085380	3376	30
P-2	482731	7089164	3367	15

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

Pozo	X_UTM	Y_UTM	Altitud m s.n.m	Profundidad pozo
P-2 Anglo	492234	7057717	3673	62
P-4	482080	7086418	3383	25
P-5	483776	7087459	3387	26
P-7	481406	7083669	3397	44
P-8	484842	7085766	3411	50
PB-1	494921	7068711	3620	45
PB-10	480320	7085031	3380	70
PB-11	479587	7084362	3382	70
PB-12	480891	7085689	3379	52
PB-13	481510	7083382	3400	90
PB-15	494579	7073062	3576	130
PB-5	482368	7084379	3400	80
PB-6	481946	7084712	3393	75
PB-7	482251	7085150	3391	75
PB-8	481599	7084348	3395	68,5
PB-9	480293	7084339	3387	70
PE-3	499090	7053167	3772	181
PO-1	495192	7070379	3607	53,5
PO-2	495445	7068119	3631	100
PO-3	497811	7068716	3671	72
PO-5	497316	7066210	3672	48,8
S-1	478660	7101018	3354	41
S-2	480649	7100838	3353	40
S-3	480927	7103716	3353	42
S-4	478629	7102431	3353	41
S-5	476899	7103926	3352	45
SAACOL-790	481760	7083891	3399	68,5
SON-1	483659	7099220	3356	52
SON-2	485289	7097426	3358	53
SON-3	486953	7100941	3358	65
SON-4	486217	7102237	3356	98
SON-5	487638	7100959	3357	50
SON-6	483695	7101915	3354	32
SPB-1	504369	7078552	3804	280
SPB-16	505095	7082938	3759	300
SPD-1	479477	7098946	3354	327,87
SPD-2	481464	7099728	3353	52
SPD-3	481656	7100992	3354	52

Tabla 1-1. Inventario de columnas litológicas proyectadas en Leapfrog (continuación 1). Fuente: elaboración propia.

Pozo	X_UTM	Y_UTM	Altitud m s.n.m	Profundidad pozo
SPX-1	504367	7078540	3804	200
SPX-16	505092	7082894	3759	300
SPX-2	503621	7080589	3750	300
SPX-3	503078	7082724	3686	300
SPX-5	500331	7087643	3543	300
SPB-10	503856	7094622	3626	300
SPB-13	506115	7089630	3721	300
SPB-14	505634	7086484	3739	300
SPB-7	505532	7088180	3710	300
SPB-8	505954	7090958	3718	300
SPX-10	503801	7094609	3625	300
SPX-13	506113	7089655	3720	300
SPX-14	505645	7086419	3741	300
SPX-7	505526	7088136	3710	300
SPX-8	505970	7090920	3719	300
SPX-9	504975	7093445	3674	300
PED23P	495187	7070370	3607	75
PO-4	495467	7065441	3633	90
CP-01A	494111	7058035	3669	310
CP-01B	494129	7058050	3670	242
CP-03B	504974	7068013	3812	153,6
CP-05B	502825	7051706	3914	250
CP-10	519261	7047649	4225	162
CP-10B	519199	7047717	4228	170
PE-1	490135	7095609	3359	193
PE-2	491723	7089578	3432	190
J-5	499523	7069832	3693	300,36

Tabla 1-1. Inventario de columnas litológicas proyectadas en Leapfrog (continuación 2).

Fuente: elaboración propia.

### 1.3.6.3 Antecedentes Geofísicos (Leapfrog)

Para la realización de la geometría 3D, fue necesario tomar información de levantamientos geofísicos realizados anteriormente, se usaron 45 perfiles TEM y 16 perfiles gravimétricos (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 sondeos. 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).

Referencia	Nombre perfil	Referencia	Nombre perfil
REF.056 (2003)	L1E_TEM	REF.080 (2015)	LM1A_TEM
	L2N_TEM		LM1B_TEM
	L3E_TEM	REF.082 (2015)	RN1-RN2
	L4N_TEM	REF.083 (2001)	P-1_TEM
	L5E_TEM		P-2_TEM
	P-3_TEM		
REF.057 (2004)	L1E_Gravimetría	REF.084 (2017)	L1E_Gravimetría
	L2N_Gravimetría		L2E_Gravimetría
	L3N_Gravimetría		L3N_Gravimetría
	L1E_TEM		L1_TEM
	L2N_TEM		L2_TEM
L3E_TEM	L3_TEM		
REF.058 (2005)	L1_Gravimetría		L4_TEM
	L2_Gravimetría		L5_TEM
	L3_Gravimetría		L6_TEM
REF.060 (2007)	L1E_Gravimetría		L7_TEM
	L2E_Gravimetría		L8_TEM
	L3E_Gravimetría		L9_TEM
	L4N_Gravimetría		L10_TEM
	L5N_Gravimetría		L11_TEM
	L6E_Gravimetría		L12_TEM
	L7E_Gravimetría		L13_TEM
	L2N_TEM		L14_TEM
	L3N_TEM		L15_TEM
	L4N_TEM		L16_TEM
	L5N_TEM		L17_TEM
	L6N_TEM	L18_TEM	
	L7N_TEM	L19_TEM	
	L31E_TEM	L20_TEM	
	L41E_TEM		
	L51E_TEM		
	P-1_TEM		
	P-2_TEM		
T-1_TEM			

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

Fuente: elaboración propia.

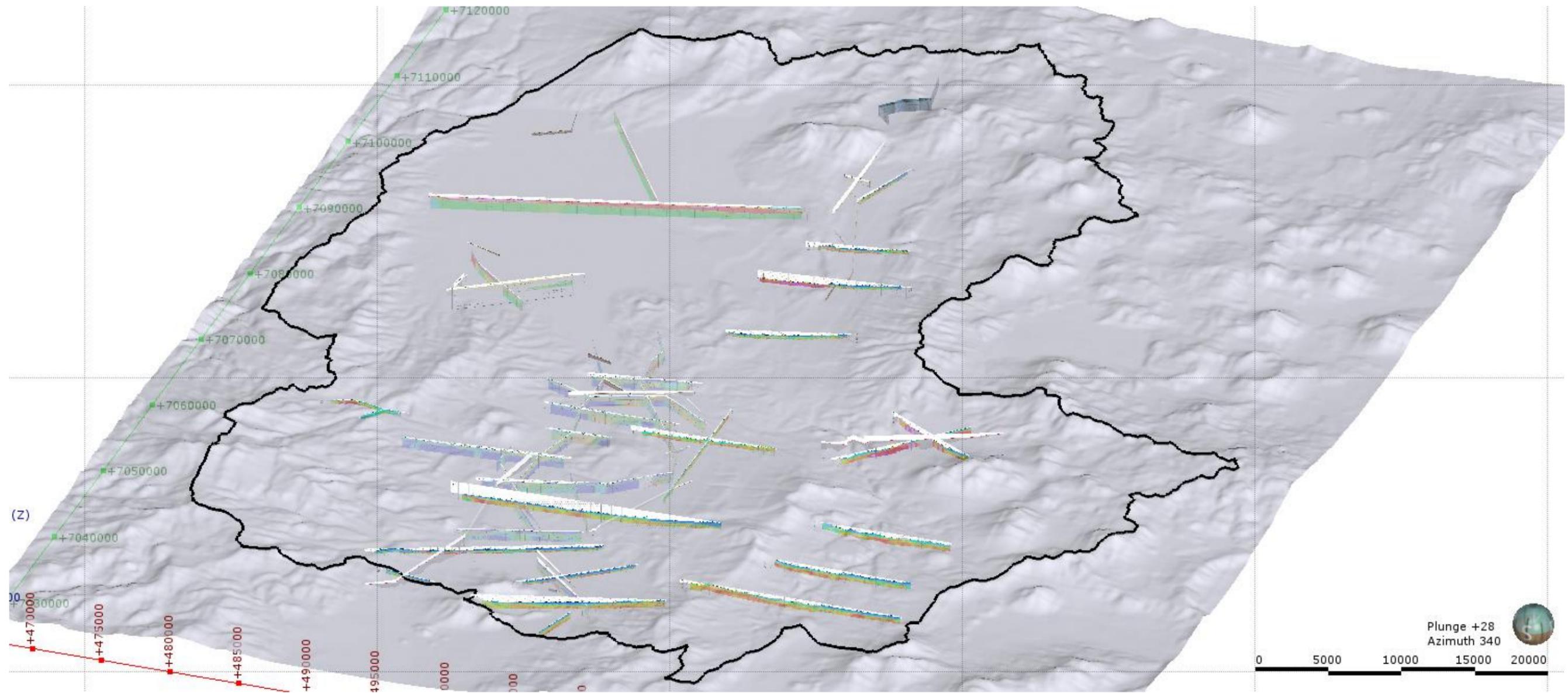


Figura 1-3. Perfiles TEM realizados en el año 2016. Exageración vertical de 6x

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, 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, 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 realizó 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 hidrográficas. 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 Pedernales 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 capítulo se ha llevado a cabo un análisis crítico y una valoración de la información contenida de los antecedentes revisados. En dicho análisis, se presentan los documentos más relevantes teniendo en cuenta el objetivo del proyecto. Además, se hace una valoración de la calidad de cada antecedente citado y una valoración general sobre la relevancia de cada área temática para el presente estudio.

### 2.1 Análisis y revisión de la geología

Se han podido consultar varias fuentes de información para conocer el marco geológico del Salar de Pedernales. A continuación, se muestran las fuentes más relevantes:

- P\_REF.030:

*Henríquez, Hugo; Montti, Silvia; Falcón, Eduardo (1975). Estudio Hidrogeológico de la Cuenca del Salar de Pedernales. Provincia de Atacama. Instituto de Investigaciones Geológicas.*

Este estudio es el antecedente geológico más antiguo del que se dispone. Contiene la testificación de 11 sondajes efectuados en el Salar de Pedernales y sus localizaciones. Además, se realiza una interpretación geológica de estos sondajes y sobre los perfiles geofísicos realizados por Bettancourt et al (1975), el resultado son 3 perfiles geológicos. Se considera información de calidad media.

- P\_REF.054

*H. Álvarez, Eduardo (1984). Exploración del Salar de Pedernales (Atacama) Mediante Imágenes Landsat Procesadas por Computador. Codelco Chile, División Salvador.*

Posteriormente, Álvarez (1984) analizó imágenes Landsat de la zona norte del Salar de Pedernales, con el objetivo de realizar una interpretación fotogeológica para la confección de un mapa geológico resumen. Se considera una fuente de calidad regular, aunque el tratamiento computarizado de imágenes satelitales constituye una herramienta valiosa en la exploración de salares, la resolución de las imágenes no es óptima (Figura 2-1).



Figura 2-1. Imagen LANDSAT del Salar de Pedernales

Fuente: Álvarez 1984; (P\_REF.054).

- P\_REF.022

*Cornejo, P; Mpodozis, C; Tomlinson, A.J (1996). Hoja Salar de Maricunga, Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería. Mapas Geológicos N°7, 1 mapa escala 1:1000000. Santiago.*

*Clavero, J; Gardeweg, M; Mpodozis, C (1998). Mapa Geológico Preliminar del Área del Salar de Piedra Parada, Región de Atacama, Servicio Nacional de Geología y Minería (Chile) Mapas Geológicos. Escala 1:100000.*

*Tomlinson, A.J; Cornejo.P; Mpodozis, C (1999). Hoja Potrerillos, Región de Atacama, Servicio Nacional de Geología y Minería (Chile) Mapas Geológicos. N° 14. 1 mapa escala 1:100000. Santiago.*

- P\_REF.059:

*Muñoz, José 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. Anexo Mapa Geológico Salar de Pedernales escala 1:150000. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Pontificia Universidad Católica de Chile. S.I.T N°157.*

- P\_REF.022

*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 Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, 1 mapa escala 1:100000. Santiago.*

- P\_REF.073:

*Amphos 21 Consulting (2016). Diagnóstico de Disponibilidad Hídrica en Cuencas Alto – Andinas de la Región de Atacama. Fase 3. Informe Final. Cuencas N° 2, 6 y 7 (Salar de Pedernales, La Laguna y Maranceles). Recopilación de antecedentes Geológicos. S.I.T. N°398.*

Desde 1996 a 2012, se cuenta con una serie de mapas geológicos del Salar de Maricunga (Cornejo et al., 1996), Salar de Piedra Parada (Clavero et al., 1998), Potrerillos (Tomlinson et al., 1999), Salar de Pedernales (Muñoz et al., 2008) y Salar de Wheelwright (Clavero et al., 2012). Estos mapas son de gran ayuda ya que incluyen en su interior parte de la zona de estudio.

Además, Muñoz et al (2008), recuperaron 5 columnas estratigráficas testificadas por EDRA (1999) y un corte geológico dirección NW-SE del Salar de Pedernales (Tomlinson et al., 1999). También se describe en el informe la evolución geológica, y habla de las unidades estructurales que surgieron durante el orógeno Andino. La información recopilada en estos antecedentes se considera de calidad media.

En 2016, con la integración de los mapas citados, Amphos 21 realizó un análisis geológico caracterizando los materiales de la zona de estudio, un mapa geológico para las cuencas hidrográficas Salar de Pedernales, La Laguna y Quebrada Maranceles. Los perfiles geológicos presentados en este informe fueron rescatados de la Hoja Salar de Maricunga y Hoja Potrerillos publicadas por Sernageomin, 1998 y 1999 respectivamente. Adicionalmente, Amphos 21 realizó:

- Dos perfiles esquemáticos de la cuenca hidrográfica del Salar de Pedernales a partir de columnas estratigráficas representativas de 15 pozos ubicados alrededor del salar.
- Un perfil esquemático de la cuenca hidrográfica La Laguna a partir de 5 columnas estratigráficas representativas de pozos ubicados en el sector SW. Se incluyen las 5 columnas en el informe.

Amphos 21 contó con un total de 84 columnas estratigráficas para la cuenca hidrográfica Salar de Pedernales y 12 para La Laguna, que recoge en los anexos del “Diagnóstico de Disponibilidad Hídrica”.

## Valoración general sobre los antecedentes disponibles de geología

Se considera esta información de calidad media.

Se concluye que hay suficiente información geológica para la caracterización de la cuenca Salar de Pedernales. Además, se considera que esta información tiene un grado de relevancia alta para el estudio ya que integra caracterizaciones geológicas realizadas desde 1984.

## 2.2 Análisis y revisión de la geomorfología

Para comprender la geomorfología de la zona de estudio, se han consultado principalmente los siguientes antecedentes:

- P\_REF.054

*H. Álvarez, Eduardo (1984). Exploración del Salar de Pedernales (Atacama) Mediante Imágenes Landsat Procesadas por Computador. Codelco Chile, División Salvador.*

Las fotografías satelitales Landsat presentes en este informe de 1984, dan una visión sobre la geomorfología del norte del Salar de Pedernales. Aunque puede servir como un apoyo para definir la morfología del terreno, se ha considerado como información de calidad regular, ya que la resolución de las imágenes no es óptima.

- P\_REF.012 y P\_REF.013:

*Risacher, François; Alonso, Hugo; Salazar, Carlos (1999). Geoquímica de Aguas en Cuencas cerradas: I, II y III Regiones – Chile. Volumen I y IV. DGA – UCN – IRD. S.I.T.N°51.*

- P\_REF.007, P\_REF.009 y P\_REF.065

*Muñoz, José 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. Parte 1: Hidrografía Inter-Regional del Altiplano de Chile y Parte 2: Hidrología Inter-Regional del Altiplano de Chile y Etapa 2 parte 8. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Pontificia Universidad Católica de Chile. S.I.T N°157.*

- P\_REF.016

*Caracterización de Humedales Altoandinos para una Gestión Sustentable de las Actividades Productivas del Sector Norte del País. Parte I: Hidrografía del Altiplano, Información Fluviométrica y de Calidad de Aguas. Región de Atacama. Ciren.*

En estos informes, se resume la morfología del norte de Chile producto de los diferentes eventos tectónicos y da una visión superficial sobre los rasgos morfológicos principales. Además, cuentan con información altitudinal y de extensión para el dominio del Salar de Pedernales (Figura 2-2), La Laguna

y Quebrada Maranceles. En el levantamiento hidrogeológico realizado por Muñoz (2008), se hace una caracterización geomorfológica concreta de la hoya hidrográfica del Salar de Pedernales y de sus elementos morfológicos más destacados. Cuenta también con un corte topográfico dirección W-E que va desde el Farellón Costero hasta los Cordones, pasando por la Cordillera Domeyko y el Salar de Pedernales, hasta el Salar de Piedra parada. La información citada por estos estudios es de calidad media.

Adicionalmente, se dispone de un DEM (Digital Elevation Model) a escala mundial realizado por el U.S. Department of the Interior y el USGS (United States Geological Survey) entre los años 2003 y 2010. Se ha descargado el DEM más actual con la herramienta *Global Data Explorer* (<https://gdex.cr.usgs.gov/gdex/>) con definición de píxel: 12,5 m x 12,5 m, para la zona de Salar de Pedernales, La Laguna y Maricunga. El DEM puede ser proyectado en GIS, será una herramienta de media calidad que servirá para definir la morfología del área de trabajo y además se le podrán agregar capas con información geológica e hidrogeológica, entre otras.

#### **Valoración general sobre los antecedentes disponibles de geomorfología**

En conclusión, se considera que hay información suficiente para una buena caracterización geomorfológica de la cuencas hidrográficas Salar de Pedernales, La Laguna y Maranceles, ya que la información que se posee, a nivel tanto regional como local, es abundante y está validada por varios autores. Estas características la convierten en una información de relevancia media.

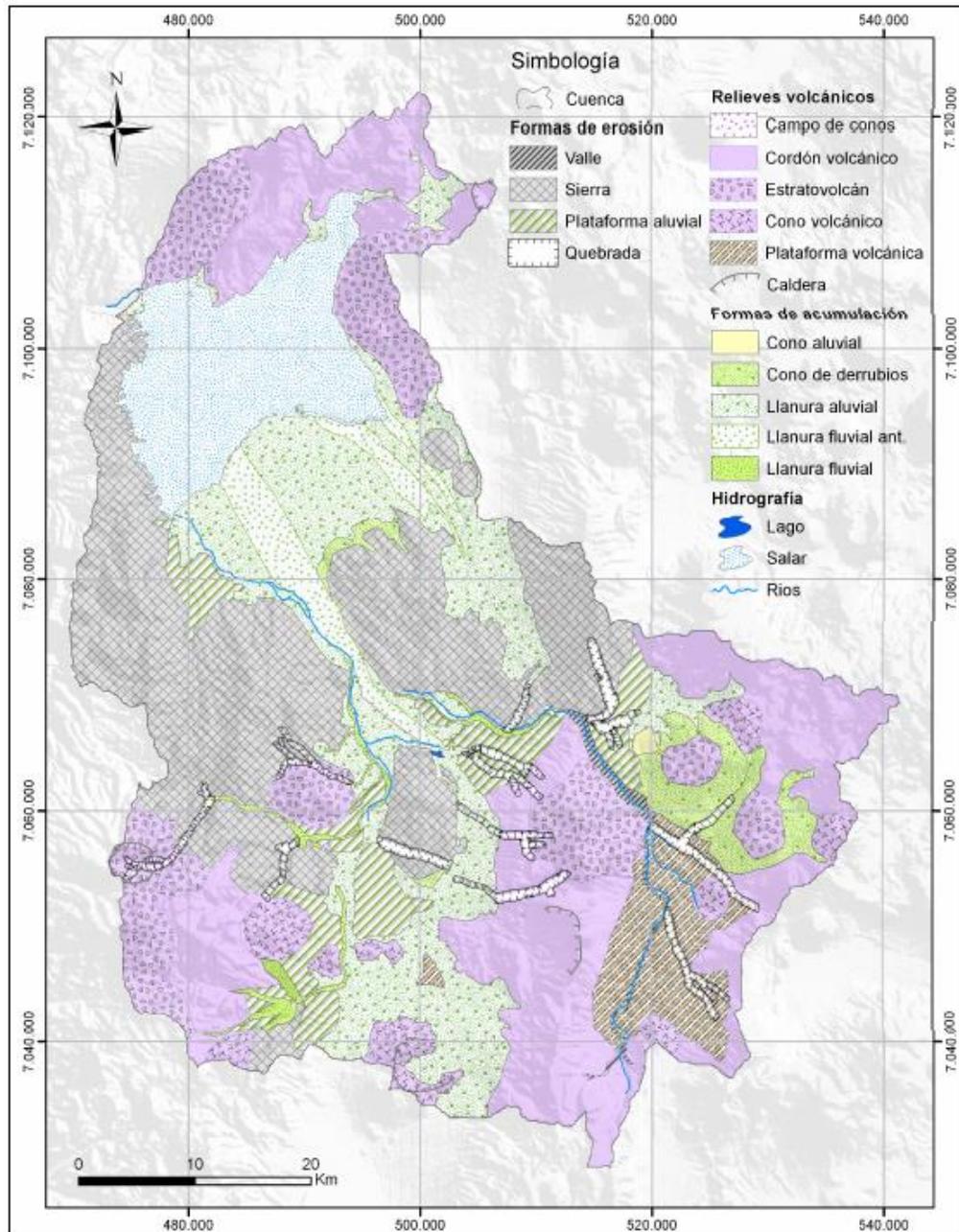


Figura 2-2. Mapa geomorfológico dominio Salar de Pedernales

Fuente: Muñoz et al., (2008); (P\_REF.007).

## 2.3 Análisis y revisión de la meteorología

De antemano, cabe destacar que se dispone de poca información meteorológica específica en las cuencas hidrográficas Salar de Pedernales, La Laguna y Quebrada Maranceles. No obstante, las estaciones que se encuentran adyacentes a estas cuencas y a una altitud igual o similar, sirven para hacer extrapolaciones climáticas. Se procede a hacer una valoración de los antecedentes más relevantes disponibles.

- P\_REF.030

*Henríquez, Hugo; Montti, Silvia; Falcón, Eduardo (1975). Estudio Hidrogeológico de la Cuenca del Salar de Pedernales. Provincia de Atacama. Instituto de Investigaciones Geológicas.*

Este estudio es el antecedente más antiguo del que se dispone, se pueden extraer valores de precipitación total anual para la estación de Potrerillos ininterrumpidamente desde el año 1930 hasta el 1970. Por otro lado, el estudio señala la existencia de un registro de precipitaciones de 3 años en la cuenca de la Laguna del Negro Francisco (a 4.136 m s.n.m.), con un valor promedio de 93 mm por año. Se considera esta información de calidad media, ya que los registros antiguos de Potrerillos permitirán comparar los datos actuales y ver si hay alguna tendencia evolutiva en la climatología que se pueda extrapolar a la zona de estudio. Además, se presenta una medición de la precipitación media anual sobre una cuenca altiplánica, que se ubica a una altura comparable con la cuenca de Pedernales.

- P\_REF.067

*Lira Duarte, Horacio; Torres Luna, Ángel (1982). Nuevos Recursos de Agua Industrial en el Llano Pedernales - Anteproyecto Obras de Captación. Horacio Lira Duarte Ingenieros y AGUA Ingenieros Consultores.*

Posteriormente, en 1982, se realizó un estudio que tenía como objetivo elaborar obras de captación para satisfacer la demanda hídrica existente. Este estudio contiene información meteorológica de precipitaciones, humedades relativas, temperaturas y velocidad del viento para las estaciones de Potrerillos y La Ola en la década de los setenta. El estudio permite, en el caso de la estación Potrerillos, continuar con la secuencia cronológica de datos de precipitación mostrados por Lira y Torres (1970). Puesto que este estudio da una continuidad temporal a datos meteorológicos y posee información de una estación situada en la cuenca hidrográfica Salar de Pedernales, se considera información de calidad media.

- P\_REF.079

*Compañía Minera Casale (2001). EIA Proyecto Minero Aldebarán. Línea base hidrología hidrogeología y calidad de las aguas. SENES Chile S. A.*

El estudio presenta un análisis de la precipitación media anual en función de la elevación, realizado a partir de datos obtenidos del "Balance Hídrico de Chile, DGA (1987). A este análisis se incorporó la

precipitación media obtenida en una estación ubicada en la cuenca de la laguna del Negro Francisco, con un valor de 100 mm anuales. Considerando que este estudio presenta la precipitación media anual en una estación privada ubicada a los 4.136 m s.n.m, se considera información de calidad media

- P\_REF.040

*CODELCO (2004). EIA Explotación Minera Proyecto Purén, Informes de Monitoreo de Aguas del Seguimiento y Fiscalización Presentes en el SEA. Horacio Lira Duarte Ingenieros y AGUA Ingenieros Consultores.*

Este EIA establece una relación entre la precipitación total (sólida y líquida) versus la altura geográfica, a partir de los datos de la estación Potrerillos y de estaciones pertenecientes a la minera Aldebarán, ubicadas entre los 3.500 y 4.500 m s.n.m. Se observa que sobre los 3.500 m s.n.m, la precipitación total aumenta a una tasa de 0,1 mm por cada metro, debido principalmente al aumento de la precipitación sólida. Considerando que este estudio presenta mediciones de estaciones de privados ubicadas sobre los 3.500 m s.n.m, se considera información relevante y de calidad media.

- P\_REF.020

*Dirección General de Aguas (2009). Evaluación de los Recursos Hídricos Subterráneos en Cuencas de la Región de Atacama Ubicadas entre el Río Copiapó y la Región de Antofagasta. Informe Técnico Departamento de Administración de Recursos Hídricos S.D.T. N° 276.*

En 2009, la DGA realizó un estudio de evaluación de recursos hídricos subterráneos para la zona comprendida entre el río Copiapó y la Región de Antofagasta. De este informe se puede extraer información de interés, como es un mapa de isoyetas y precipitaciones medias anuales para las cuencas hidrográficas Salar de Pedernales, La Laguna y Quebrada Maranceles. Cabe destacar que la precipitación para estas tres cuencas hidrográficas se calculó realizando una extrapolación a partir de las isoyetas, con datos de estaciones meteorológicas que no están situadas dentro de las propias cuencas. Se ha considerado que se trata de información de calidad media.

- P\_REF.042

*Muñoz, José et al. (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 Parte 10: Sistema Piloto III Región. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Pontificia Universidad Católica de Chile. S.I.T N°157.*

De este levantamiento hidrogeológico, se obtienen valores de precipitación para las estaciones de Pedernales Norte y Pedernales Sur. Los datos disponibles para ambas estaciones son del período comprendido entre noviembre de 2007 y octubre de 2008. Si bien es cierto que no se dispone de un registro histórico amplio para estas dos estaciones, se considera información de calidad media y aparte de ser evaluados, los datos pueden servir para hacer comparativas con estaciones cercanas.

- P\_REF.018

*Dirección General de Aguas (2011). Estimación de recargas en Cuencas Altiplánicas y Precordilleranas de Vertiente Pacífica. División de Estudios y Planificación SDT N°334.*

Uno de los objetivos específicos de este estudio fue calcular la precipitación media anual para diferentes cuencas hidrográficas altiplánicas y contiene datos de precipitación media anual del Salar de Pedernales y La Laguna para 2011. En el informe se pueden extraer mapas de precipitación media para invierno y verano y se considera información de calidad media.

- P\_REF.073

*Amphos 21 Consulting (2016). Diagnóstico de Disponibilidad Hídrica en Cuencas Alto – Andinas de la Región de Atacama. Fase 3. Informe Final. Cuencas N° 2, 6 y 7 (Salar de Pedernales, La Laguna y Maranceles). S.I.T. N°398.*

De acuerdo al análisis de antecedentes meteorológicos, en la zona de interés se han utilizado distintas metodologías para estimar la precipitación, las cuales se han fundamentado en la generación de isoyetas (DGA, 1987; DGA-DIHA PUC, 2009; Aquaterra, 2013; ARCADIS, 2015) a partir de registros meteorológicos existentes en otras cuencas cercanas. Por lo tanto, Amphos 21 (2016) estimó las precipitaciones anuales medias en las cuencas hidrográficas Salar de Pedernales, La Laguna y Quebrada Maranceles para compararlas con los datos anteriores. También se elaboró un mapa de isoyetas a partir de la Base de datos de la DGA (2016), DGA-DIHA PUC (2009) y DGA (1987). Además, durante el mismo proyecto se instalaron dos estaciones meteorológicas en el Salar de La Isla y Cuenca de Maricunga. Se considera una información de calidad media.

- P\_REF.084 y 085

*CODELCO (2017). Declaración de Impacto Ambiental del Proyecto Continuidad Operacional División Salvador. Adenda >Complementaria, apéndice V-2 y V-3. CODELCO.*

En estos apéndices se han identificado datos meteorológicos de las estaciones La Ola y Los Arroyos situadas en la zona de estudio. El hecho de que se sitúen dentro de la zona de estudio convierte estos datos de calidad elevada para la realización del modelo hidrogeológico conceptual de la cuenca Salar de Pedernales.

**Valoración general sobre los antecedentes disponibles de meteorología**

La información dentro de la zona de estudio es baja para la caracterización meteorológica de las cuencas hidrográficas Salar de Pedernales, La Laguna y Quebrada Maranceles. Gran parte de los datos disponibles corresponden a estaciones que se encuentran fuera del perímetro de la zona de estudio.

Adicionalmente, es aconsejable conseguir el registro de datos meteorológicos procedentes de las dos estaciones que pertenecen a la DGA (Salar de la Isla y Maricunga) adyacentes a la cuenca de estudio.

## 2.4 Análisis y revisión de la hidrología

Para conocer la hidrología de la zona de estudio, se han consultado varios antecedentes:

- P\_REF.073

*Held Siebert, Bruno; Parga Lobo, Eugenio; Merino García, Enrique; Torrealba Peña, Humberto (1984). Contribución del Comité Chileno para el Programa Hidrológico Internacional (UNESCO) al Balance Hídrico de América del Sur. Dirección General de Aguas.*

En el año 1984, la Dirección general de Aguas incluyó dentro de sus programas inmediatos el estudio del balance hídrico de Chile dentro del plan Hidrológico Internacional de la UNESCO. Éste es el antecedente más antiguo del que se dispone en el marco hidrológico. De este estudio se pueden extraer datos y mapas de isolíneas de evaporación, isolíneas de escurrimiento y precipitación a nivel nacional. La calidad de la información de este informe es media, ya que es un referente para estudios posteriores.

- P\_REF.024

*Johnson Vidal, Juan Eduardo (2009). Evaporación desde Napas Freáticas Someras en Cuencas Endorreicas del Altiplano Chileno. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería. Universidad Católica de Chile, Escuela de Ingeniería.*

En esta tesis, Johnson (2009) caracterizó la descarga por evaporación desde napas someras en cuencas endorreicas del altiplano chileno, entre las cuales está el Salar de Pedernales. Se pueden obtener, por tanto, datos de evaporación por bandas de profundidad (curvas de evaporación v/s profundidad). Se considera una información de calidad media.

- P\_REF.018

*Dirección General de Aguas (2011). Estimación de recargas en Cuencas Altiplánicas y Precordilleranas de Vertiente Pacífica. División de Estudios y Planificación SDT N°334.*

En este estudio de 2011, la DGA calculó la recarga para las diferentes cuencas altiplánicas teniendo en cuenta la escurrimiento y las precipitaciones. El informe incluye tablas con valores de caudal de escurrimiento para las diferentes cuencas hidrográficas en las que se incluyen Salar de Pedernales y La Laguna. En el estudio se estima que aproximadamente el 40% de ese caudal de escurrimiento corresponde a recarga que se infiltró y transitó en algún momento de forma subterránea por la cuenca (flujo base). En caso de existir un flujo subterráneo bajo el cauce, la recarga neta sería el 40 % del caudal observado más dicho flujo subterráneo. La calidad de la información es media.

- P\_REF.016

*Bustamante Valdés, Ana María (2013). Caracterización de Humedales Alto-Andinos para una Gestión Sustentable de las Actividades Productivas del Sector Norte del País. CIREN. Recursos Hídricos Parte I. Hidrografía del Altiplano, Información fluviométrica y de Calidad de Aguas. Región de Atacama.*

- P\_REF.003

*Vargas Paysen, Jaime et al. (2013). Diagnóstico de Disponibilidad Hídrica en Cuencas Alto-Andinas de la Región de Atacama. Aquaterra Ingenieros Limitada. S.I.T. N° 329.*

De estos dos informes se puede extraer información fluviométrica de las cuencas Alto-Andinas procedente de la Dirección General de Aguas. Concretamente en los anexos que recoge el informe realizado por Paysen et al. (2013), se pueden recuperar datos de caudales medios mensuales de 1986 a 2012. Se considera información de calidad media, puesto que es información localizada en el interior de la zona de estudio y tiene una buena continuidad en el tiempo.

- P\_REF.073

*Amphos 21 Consulting (2016). Diagnóstico de Disponibilidad Hídrica en Cuencas Alto – Andinas de la Región de Atacama. Fase 3. Informe Final. Cuencas N° 2 y 6 (Salar de Pedernales y La Laguna). S.I.T. N°398.*

Más recientemente Amphos 21 (2016), realizó un análisis hidrológico de la cuenca Salar de Pedernales en el cual calculó la recarga a partir de datos meteorológicos previos procedentes de cuencas cercanas a la zona de estudio y también se calculó la escorrentía para el Salar de Pedernales, La Laguna y Maranceles. Con la información de escorrentía y recarga se realizó el balance hidrometeorológico. Además, cuantificó la evaporación directa en napas freáticas, haciendo una estimación a partir de 3 lisímetros instalados en el Salar de Pedernales y puesto que son datos in situ, se considera información de calidad media.

- P\_REF.084 y 085

*CODELCO (2017). Declaración de Impacto Ambiental Proyecto Continuidad Operacional División Salvador. Adenda Complementaria. Apéndice V-2 y V-3. CODELCO.*

Esta referencia contiene datos de aforos para la estación La Ola que podrán ser utilizadas en el balance hidrogeológico conceptual.

### **Valoración general sobre los antecedentes disponibles de hidrología**

En conclusión, la información hidrológica de la que se dispone es de baja relevancia. Cabe destacar, que se dispone de datos de evaporación procedentes de 3 lisímetros de la DGA, sin embargo, estos están situados en el perímetro norte y sureste del Salar de Pedernales, haría falta la construcción de más lisímetros a lo largo de toda la cuenca para que los datos obtenidos fuesen más representativos. Además, no hay datos de aforos distribuidos por la zona, a excepción de la estación de aforos situada en La Ola y no es suficiente para hacer una valoración a nivel de cuenca. Se necesitan más puntos de medición.

## 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. A continuación, se describe el contenido de cada estudio geofísico revisado:

- P\_REF.055

*S. Bettancourt Eugenio, G. Julio Mario (1976). Estudio Geofísico Llano de Pedernales – III Región. Informe SGF 76 – 1. Instituto de Investigaciones Geológicas.*

Los antecedentes más antiguos se remontan al año 1976, el Instituto de Investigaciones Geológicas realizó 3 sondeos eléctricos verticales en un estudio geofísico del Llano de Pedernales. La interpretación geoeléctrica muestra espesores sedimentarios y también profundidades y morfología del basamento rocoso. La información es de calidad media.

- P\_REF.062

*GEODATOS Geofísica Avanzada (2001). Estudio Geofísico Transiente Electromagnético. Sector: Cordón de los Infieles. III Región de Atacama, Chile. NE-0301-367.*

Se tiene registro de una sola prospección geofísica en la cuenca hidrográfica Quebrada Maranceles, Geodatos (2001) realizó tres perfiles TEM de los cuales solamente uno se encuentra dentro de la zona de estudio. Se considera una información de media calidad, puesto que es el único antecedente en la cuenca hidrográfica Quebrada Maranceles.

- P\_REF.057

*GEODATOS Geofísica Avanzada (2004). Estudio Geofísico, Transiente Electromagnético (TEM) y Gravimetría. Proyecto: Pajaritos. Sector: Suroeste Salar de Pedernales. El Salvador, III – Región.*

- P\_REF.056

*GEODATOS Geofísica Avanzada (2004). Re-interpretación Estudio Geofísico Transiente Electromagnético (TEM). Sector: Salar de Pedernales. III Región de Atacama, Chile.*

En 2004, Geodatos reinterpreto la geofísica de cinco perfiles TEM procedentes de su estudio realizado en el Llano Los Arroyos en 2003, a petición de la División Salvador de Codelco Chile. También en el año 2004, realizó tres perfiles TEM para la zona de Pajaritos. En estos estudios se pueden recuperar perfiles SEM realizados en el propio salar y al sur de este. La interpretación de estos perfiles puede indicar el espesor sedimentario, la morfología y profundidad del basamento y también la profundidad del nivel piezométrico.

---

- P\_REF.058

*Behn, Gerardo y Henríquez, Hugo (2005). Estudio de Gravimetría. Proyecto Llano de la Laguna. Sector NE Salar de Pedernales. III – Región de Atacama – Chile. GEODATOS Geofísica Avanzada.*

- P\_REF.060

*GEODATOS Geofísica Avanzada (2007). Estudio mediante TEM y Gravimetría, Potrerillos-Pedernales. III – Región de Atacama – Chile.*

Posteriormente, Behn y Henríquez (2005), realizaron un estudio gravimétrico en el Llano de La Laguna. En 2007, Geodatos nuevamente participó en una campaña de levantamiento de información geofísica en sectores ubicados aguas arriba del sector La Ola. En total se levantaron 9 perfiles TEM y 3 perfiles gravimétricos. A partir de los estudios gravimétricos, se realizaron mapas de elevación del basamento, elevación topográfica y espesor sedimentario, además de modelos gravimétricos para la zona de estudio. Los perfiles TEM sirven de apoyo para validar la información gravimétrica.

#### **Valoración general sobre los antecedentes disponibles de geofísica**

Toda la información citada dentro de este apartado se considera de calidad media.

Se considera la información geofísica extraída de antecedentes tiene una relevancia alta, ya que abarca en casi su totalidad la zona del Salar de Pedernales y aportan información muy valiosa sobre la geología en profundidad. Con esta información se puede realizar la caracterización de los acuíferos (espesor sedimentario, espesor saturado, morfología acuífera) y conocer la profundidad y morfología del basamento rocoso. Sin embargo, falta información geofísica en el sector de Juncalito para tener un modelo robusto de la geometría de la cuenca, por lo que sería de gran ayuda conseguir la geofísica realizada por GEODATOS en 2013.

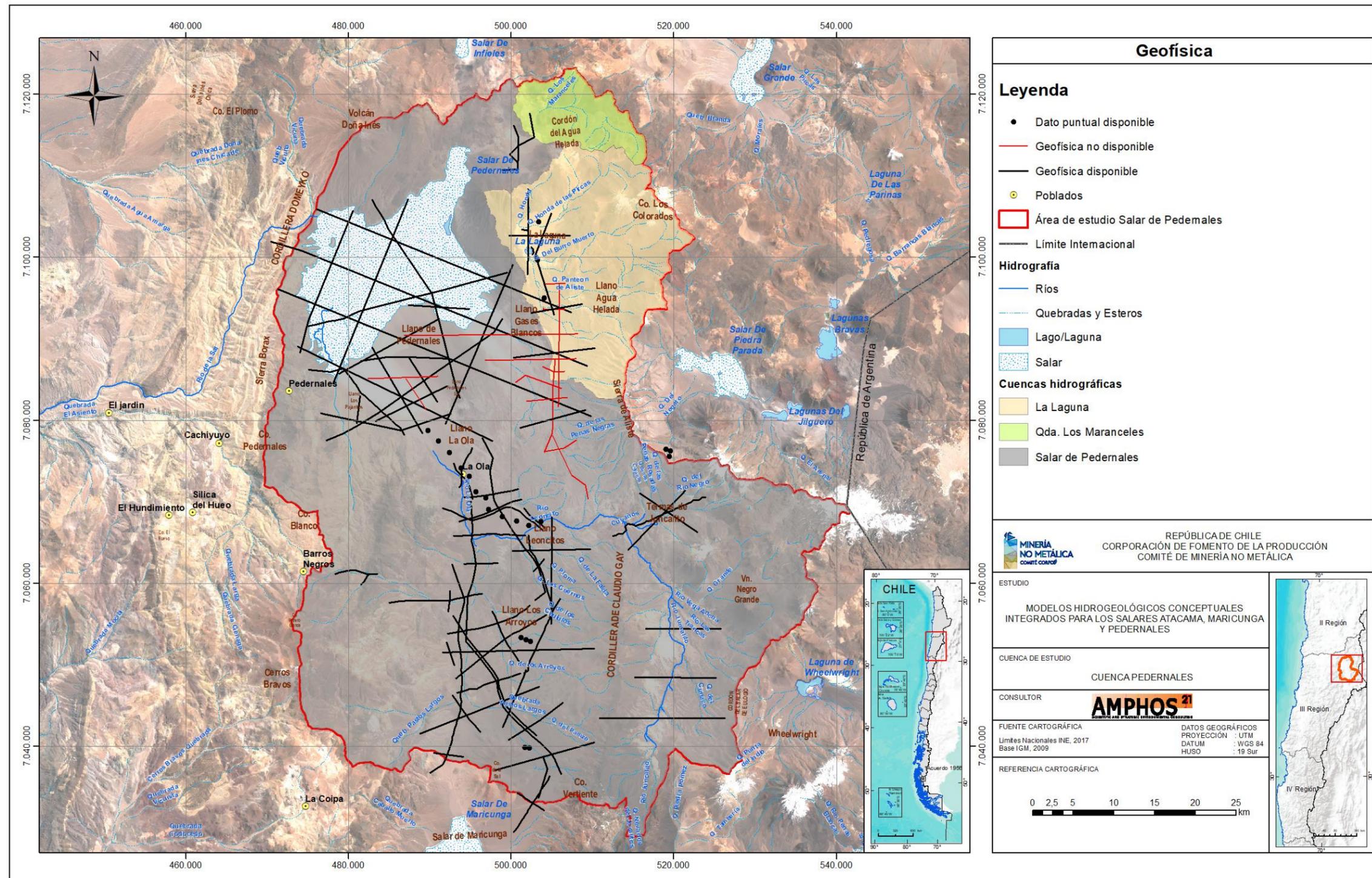


Figura 2-3. Ubicación de los perfiles de geofísica disponible y no disponible.

Fuente: elaboración propia.

## 2.6 Análisis y revisión de la hidrogeología

Para conocer las características hidrogeológicas de la zona de estudio se extrajo información de las siguientes fuentes principales:

- P\_REF.033

*AGUA Ingenieros Consultores Ltda. (1978). Evaluación de Recursos Subterráneos Salar de Pedernales.*

- P\_REF.035

*AGUA Ingenieros Consultores Ltda. (1984). Actualización Modelo de Simulación Llano de Pedernales.*

En junio de 1978, Agua Ingenieros realizó una evaluación de recursos hídricos subterráneos del Salar de Pedernales. De este estudio se pueden extraer mapas piezométricos y un mapa de distribución de transmisividades. Además, realizaron mapas piezométricos y de isodescensos simulados para diferentes caudales y tiempos de bombeo. Posteriormente en 1984, se actualizaron estas simulaciones, dando lugar a un nuevo mapa de distribución de transmisividades y también de isoprofundidades. Además, contiene valores de nivel piezométrico para 6 sondajes del Llano de Pedernales. Se considera la información de calidad media.

- P\_REF.020

*Dirección General de Aguas (2009). Evaluación de los Recursos Hídricos Subterráneos en Cuencas de la Región de Atacama Ubicadas entre el Río Copiapó y la Región de Antofagasta. Informe Técnico Departamento de Administración de Recursos Hídricos S.D.T. N° 276.*

- P\_REF.042

*Muñoz, José et al. (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 Parte X, Sistema Piloto III Región. Salares de Maricunga y Pedernales. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Pontificia Universidad Católica de Chile. S.I.T N°195.*

Este estudio de 2009 muestra las diferentes unidades hidrogeológicas presentes en la zona de estudio según sus características litológicas y su importancia hidrogeológica. Toda esta información se integra en un mapa hidrogeológico, el cual engloba el Salar de Pedernales y La Laguna.

Ese mismo año, la Universidad Católica de Chile presentó una caracterización hidrogeológica en la cual se presentan las diferentes unidades hidrogeológicas, la geometría acuífera, piezometría, constantes elásticas, conexiones laterales con otras cuencas y estimaciones de la recarga subterránea. Se cuenta con el nivel estático medido en las 31 calicatas realizadas durante los trabajos de campo de CPH Consultores (2003) alrededor del Salar de Pedernales y de 77 pozos con cotas de nivel de agua subterránea, distribuidos principalmente en el norte del Llano La Ola, la cuenca hidrográfica La Laguna

y el sector del Llano de los Gases Blancos (sureste del salar). Además, se cuenta con valores de transmisividad y permeabilidad a partir de ensayos de bombeo realizados en 20 pozos repartidos por el Llano de Pedernales, Llano La Ola, Llano Leoncito y Llano Los Pajaritos.

Se considera que la información de ambos estudios es de calidad media ya que engloba información de antecedentes anteriores diversa y completa dentro del marco hidrogeológico para el Salar de Pedernales.

- P\_REF.072

*Dirección General de Aguas (2013). Actualización de la Demanda Comprometida en los Sectores Acuíferos Salar de Pedernales Norte y Salar de Pedernales Sur. Informe Técnico DARH N°52.*

En 2013, la DGA actualizó la demanda comprometida en los sectores acuíferos del Salar de Pedernales y muestra un cuadro donde se presentan los peticionarios, los puntos de captación, el caudal solicitado y el caudal otorgado. Se considera información de calidad media, puesto que representa salidas del sistema acuífero.

- P\_REF.073

*Amphos 21 Consulting (2016). Diagnóstico de Disponibilidad Hídrica en Cuencas Alto – Andinas de la Región de Atacama. Fase 3. Informe Final. Cuencas N° 2 y 6 (Salar de Pedernales y La Laguna). S.I.T. N°398.*

La caracterización de Unidades Hidrogeológicas se basó en los materiales geológicos identificados, en la interpretación geofísica de la cuenca y en sus características hidráulicas. Durante este estudio se definieron las Unidades Hidrogeológicas, se realizó un mapa hidrogeológico (modificado de Sernageomin, 2005) y mapas piezométricos para las cuencas hidrográficas Salar de Pedernales y La Laguna. En la elaboración del inventario de puntos de agua se incluyeron todos aquellos puntos recopilados a partir de antecedentes históricos, así como los nuevos catastrados en la campaña de terreno de la Fase 3 de ese mismo proyecto. Se tomó medición del nivel estático en un total de 93 pozos y piezómetros del Salar de Pedernales y 12 en La Laguna. En cuanto a constantes elásticas, se recopiló información de la Fase 1 del proyecto de 12 pozos para La Laguna y 16 para Pedernales con valores de transmisividades recopilados por Aquaterra (2013). También se interpretaron ensayos de bombeo desde la década de los 70, cuyos datos se consideraron adecuados. Esta información es de calidad media, ya que además de incorporar información actual de puntos que ya fueron monitoreados con anterioridad, también aporta información de puntos nuevos.

**Valoración general sobre los antecedentes disponibles de hidrogeología**

Se considera que hay información insuficiente y de baja relevancia para realizar una buena caracterización hidrogeológica de las cuencas hidrográficas Salar de Pedernales y La Laguna. En el caso de Quebrada Maranceles, no se cuenta con ninguna manifestación superficial de agua, tales como

bofedales, vegas, lagunas, etc.; ni pozos que permitan determinar la ocurrencia de aguas subterráneas para hacer ensayos de bombeo y mediciones para realizar una piezometría. En la cuenca hidrográfica Salar de Pedernales, hay una importante presencia de pozos con ensayos de bombeo y medidas de nivel, sin embargo, en la zona sur hay muy poca información.

## 2.7 Análisis y revisión de la hidrogeoquímica

A continuación, se mostrarán parte de los antecedentes considerados más importantes, utilizados para la caracterización hidroquímica de aguas superficiales y subterráneas en el área de estudio.

- P\_REF.012 y P\_REF.013

*Risacher François, Alonso Hugo & Salazar Carlos (1999). Geoquímica de Aguas en Cuencas cerradas: I, II y III Regiones – Chile. Volumen IV. DGA – UCN – IRD. S.I.T.N°51.*

Los antecedentes hidroquímicos más antiguos de los que se dispone datan de 1999, recopilados por la Universidad Católica de Chile, en cooperación con la DGA y el “*Institut de Recherche Pour le Développement*”. Realizaron un análisis químico de las aguas en cuencas endorreicas de la Región de Atacama. De este estudio se extrae información química de las aguas superficiales y subterráneas en diferentes áreas, la mayoría de los puntos de muestreo se encuentran en las inmediaciones del salar, aunque también hay análisis químicos de manantiales y ríos en la zona central y sur de la cuenca. En total suman 30 puntos en la cuenca hidrográfica Salar de Pedernales, entre pozos, manantiales y aguas superficiales de río y laguna. También se cuenta con 5 puntos de manantial y laguna en la cuenca hidrográfica La Laguna. Se trata de un referente y por ello se califica la información de calidad media.

- P\_REF.041

*Aguirre, Igor; y Venegas, Marcela (2005). Hidrogeología de la cuenca Salar de Pedernales. Escala 1:100.000. Carta Geológica de Chile. Serie Hidrogeológica n°3. SERNAGEOMIN.*

La información que se incluye en el presente mapa corresponde a los resultados hidroquímicos de 61 puntos, muestreados en 3 campañas con fechas enero de 2000, marzo de 2000 y abril de 2001. Los puntos, en base a su ubicación y tipo de agua se han clasificado de la siguiente manera: 3 corresponden a humedales ubicados en la cuenca hidrográfica Salar de Pedernales; 16 corresponden a manantiales o vertientes ubicados en las cuencas hidrográficas La Laguna (3 puntos) y Salar de Pedernales (13 puntos); 9 corresponden a aguas subterráneas en las cuencas hidrográficas Salar de Pedernales y 6 a aguas subterráneas en la cuenca hidrográfica La Laguna; y 27 puntos corresponden a aguas superficiales (ríos, esteros, lagos o lagunas) ubicados en la cuenca hidrográfica La Laguna (3 puntos) y en la cuenca hidrográfica Salar de Pedernales (24 puntos). Debido a la distribución de los puntos la información se considera de calidad media.

---

- P\_REF.011

*P. Muñoz, José, et al., (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. Informe Final Parte IV. Campañas de Muestreo Geoquímico e Isotópico. Salares de Maricunga y Pedernales. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental Pontificia Universidad Católica de Chile. S.I.T. N° 195, DGA.*

En el estudio de la DGA (2009) se muestrearon y analizaron 11 puntos de agua, todos ellos ubicados en la cuenca hidrográfica Salar de Pedernales. El muestreo se llevó a cabo entre los días 14 y 15 de mayo (2008) y se tiene registro tanto de los parámetros físico-químicos, concentraciones de los elementos mayoritarios (excepto Bicarbonato) y de algunos minoritarios. Los tipos de agua son diversos: 1 subterráneo; 6 superficiales; 3 manantiales o vertientes; y 1 humedal. Cabe mencionar que en este estudio se generó una base de datos hidroquímica que recopila, en parte, la analítica de Risacher et al., (1999), EDRA (1999) y SERNAGEOMIN (2005), la cual sirvió como punto de inicio para la presente investigación.

Además, en este estudio se incluye la información de EDRA (1999), en el cual se presenta la analítica (parámetros físicos-químicos, mayoritarios y algunos minoritarios) de 28 puntos. Seis (6) de ellos fueron muestreados en febrero de 1997 y corresponden a aguas superficiales, específicamente a un estero ubicado en la cuenca hidrográfica La Laguna y a 5 ríos emplazados en la cuenca hidrográfica Salar de Pedernales. Por su parte, los otros 22 puntos fueron muestreados en el periodo comprendido entre noviembre de 1998 y marzo de 1999, y corresponden a aguas subterráneas (pozos y piezómetros) ubicados en el entorno del límite entre las cuencas hidrográficas La Laguna y Salar de Pedernales.

Se considera información de calidad media debido a la continuidad temporal de los monitoreos.

- P\_REF.080

*Arcadis (2015). Diagnóstico de Disponibilidad Hídrica en Cuencas Alto-Andinas de la Región de Atacama, Fase 2. Informe Final. DGA.*

En el estudio de Arcadis para DGA (2015) se presentan los registros de 14 muestras tomadas en diciembre de 2014 en la cuenca hidrográfica Salar de Pedernales. Dichas muestras corresponden, en su mayoría, a aguas de tipo subterráneas tomadas en pozos o piezómetros (10 puntos) y, en menor medida, a aguas superficiales tomadas en esteros, ríos y lagos/lagunas (4 puntos). Los análisis realizados correspondieron a la medición de los parámetros físico-químicos y de las concentraciones de los parámetros mayoritarios. La información que se expone en el informe es acotada y se considera de calidad media.

---

- P\_REF.073

*Amphos 21 Consulting (2016). Diagnóstico de Disponibilidad Hídrica en Cuencas Alto – Andinas de la Región de Atacama. Fase 3. Informe Final. Cuencas N° 2 y 6 (Salar de Pedernales y La Laguna). S.I.T. N°398. DGA.*

Durante el año 2016 se recolectaron 17 muestras, 2 de ellas tomadas en febrero de 2016 mientras que las 15 restantes, en septiembre de 2016. En la cuenca hidrográfica Salar de Pedernales se recolectaron 11 muestras mientras que en La Laguna; 6 muestras. En éstas, se midieron los parámetros físico-químicos, las concentraciones de los parámetros mayoritarios y de algunos minoritarios. La información que se expone en el informe tiene una continuidad en el tiempo y se considera de calidad media.

- P\_REF.084

*CODELCO (2017). Actualización modelo hidrogeológico conceptual, sector Salar de Pedernales. Apéndice V-2, Adenda Complementaria, DIA Proyecto Continuidad Operacional División Salvador.*

Este corresponde al estudio más reciente, en el cual se presenta información hidroquímica (parámetros físico-químico, elementos mayoritarios y minoritarios) del sector de estudio. En éste se presentan los resultados analíticos de 15 puntos de aguas subterráneas ubicados en el la cuenca hidrográfica Salar de Pedernales, los cuales fueron muestreados en 4 campañas distintas, de frecuencia trimestral, en el periodo comprendido entre junio de 2016 y mayo de 2017. La cantidad de información, el hecho de que se encuentre en la zona de estudio y que sean los datos más recientes, hace que sea considerada de calidad alta.

### **Valoración general sobre los antecedentes disponibles de hidrogeoquímica**

Se consideran informes de una relevancia media, ya que engloban la hidroquímica que ha sido monitoreada desde 1999 por diferentes autores y entidades y aportan datos nuevos, lo cual da una visión temporal de la evolución química de las aguas superficiales y subterráneas en la zona de estudio para las cuencas hidrográficas Salar de Pedernales y La Laguna. Sin embargo, en la zona sur de la cuenca hidrográfica Salar de Pedernales hay pocos datos de hidroquímica de agua subterránea, debido a la escasez de pozos, por lo que harían falta más datos para una caracterización hidroquímica representativa de toda la cuenca. En el caso de la cuenca hidrográfica Quebrada Maranceles, no se disponen de antecedentes hidroquímicos.

## 2.8 Análisis y revisión de los isótopos

A continuación, se muestran los antecedentes más relevantes de los cuales se va a extraer información isotópica.

- P\_REF.012 y P\_REF.013

*Risacher François, Alonso Hugo & Salazar Carlos (1999). Geoquímica de Aguas en Cuencas cerradas: I, II y III Regiones – Chile. Volumen IV. DGA – UCN – IRD. S.I.T. N°51.*

Se han podido recopilar análisis isotópicos de oxígeno-18 y deuterio realizados en 1999 (Risacher, et al.), son un total de 23 análisis de agua subterránea, superficial, de humedales y de manantiales. Los puntos monitoreados están repartidos al norte alrededor del Salar de Pedernales y en la zona sur. Se considera información de calidad media, ya que permitirá comparar la isotopía de aguas analizadas más recientemente.

- P\_REF.041

*Aguirre, Igor; y Venegas, Marcela (2005). Hidrogeología de la cuenca Salar de Pedernales. Escala 1:100.000. Carta Geológica de Chile. Serie Hidrogeológica n°3. SERNAGEOMIN.*

La información isotópica que se incluye en el presente mapa corresponde a los resultados de los isótopos 2H y 18O de 6 puntos muestreados en marzo de 2000. 2 de estos puntos se ubican en la subcuenca La Laguna, mientras que los 4 restantes se emplazan en la subcuenca salar de Pedernales. La información se considera de calidad media.

- P\_REF.011

*P. Muñoz, José, 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. Informe Final Parte IV. Campañas de Muestreo Geoquímicos e Isotópicos. Salares de Maricunga y Pedernales. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental Pontificia Universidad Católica de Chile. S.I.T. N° 195, DGA.*

Posteriormente Muñoz et al. (2009), para la DGA, en un levantamiento hidrogeológico de las regiones I, II y III, analizaron 11 puntos de Pedernales coincidentes con los del estudio geoquímico de Risacher et al. (1999). Se considera pues, información de calidad media ya que monitorea puntos de los cuales se conoce la calidad química en 1999.

- P\_REF.073

*Amphos 21 Consulting (2016). Diagnóstico de Disponibilidad Hídrica en Cuencas Alto – Andinas de la Región de Atacama. Fase 3. Informe Final. Cuencas N° 2 y 6 (Salar de Pedernales y La Laguna). S.I.T. N°398. DGA.*

Más recientemente, Amphos 21 realizó una campaña de monitoreo químico, en la cual hizo el seguimiento de puntos ya muestreados por Risacher et al. (1999), SERNAGEOMIN (2000), Pontificia Universidad Católica de Chile (2009) y Vargas et al. (2013). En la cuenca hidrográfica Salar de Pedernales se recolectaron 11 muestras mientras que en La Laguna; 6 muestras. En éstas, se midieron los isótopos  $\delta D$  y  $\delta^{18}O$ . La información que se expone en el informe tiene una continuidad en el tiempo y se considera de calidad media.

- P\_REF.084

*CODELCO (2017). Actualización modelo hidrogeológico conceptual, sector Salar de Pedernales. Apéndice V-2, Adenda Complementaria, DIA Proyecto Continuidad Operacional División Salvador.*

El último estudio isotópico realizado en la zona corresponde al monitoreo de los isótopos del agua  $\delta D$  y  $\delta^{18}O$ . En éste se presentan los resultados analíticos de 15 puntos de aguas subterráneas ubicados en el la cuenca hidrográfica Salar de Pedernales, los cuales fueron muestreados en 4 campañas distintas, de frecuencia trimestral, en el periodo comprendido entre junio de 2016 y mayo de 2017. La cantidad de información, el hecho de que se encuentre en la zona de estudio y que sean los datos más recientes, hace que sea considerada de calidad alta.

#### **Valoración general sobre los antecedentes disponibles de hidrogeoquímica**

Si bien es cierto que hay monitoreos desde 1999, al igual que la hidroquímica, se considera que hay información isotópica insuficiente en la zona meridional de la cuenca de estudio. Se consideran de alta relevancia.

## **2.9 Análisis y revisión del balance hídrico**

A continuación, se clasifican los antecedentes más importantes que se tendrán en cuenta para el balance hídrico.

- P\_REF.023

*Held Siebert, Bruno; Parga Lobo, Eugenio; Merino García, Enrique; Torrealba Peña, Humberto (1984). Contribución del Comité Chileno para el Programa Hidrológico Internacional (UNESCO) al Balance Hídrico de América del Sur. Dirección General de Aguas.*

En 1984, la DGA realizó el balance hídrico a nivel nacional. Dentro de este estudio se encuentra el balance hídrico de cada región y también por cuencas. Se trata del antecedente más antiguo del que se dispone para conocer el balance del agua que recarga y descarga en el sistema del Salar de Pedernales. Se considera información de buena calidad y un referente del balance hídrico en la zona de estudio.

- P\_REF.042

*P. Muñoz, José, et al., (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 X. Sistema Piloto III Región. Salares de Maricunga y Pedernales. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental Pontificia Universidad Católica de Chile. S.I.T. N° 195, DGA.*

Posteriormente, Muñoz et al (2009), durante la caracterización hidrogeológica de las cuencas piloto de la Región de Atacama, sintetizaron y analizaron la información disponible con el objetivo de cuantificar los flujos de entrada y salida de las cuencas e identificar datos y tareas adicionales que se requieran. En este contexto, realizaron el balance hídrico para la cuenca Salar de Pedernales. Se considera información de buena calidad.

- P\_REF.073

*Amphos 21 Consulting (2016). Diagnóstico de Disponibilidad Hídrica en Cuencas Alto – Andinas de la Región de Atacama. Fase 3. Informe Final. Cuencas N° 2 y 6 (Salar de Pedernales y La Laguna). S.I.T. N°398.*

En 2016 Amphos 21 realizó el modelo conceptual para 34 cuencas Alto-Andinas, entre las cuales están las cuencas hidrográficas Salar de Pedernales, La Laguna y Quebrada Maranceles. Dentro de este estudio se cuantificó el balance hídrico en dichas cuencas hidrográficas. Los resultados obtenidos son de buena calidad y son datos nuevos hasta la fecha.

#### **Valoración general sobre los antecedentes disponibles de balance hídrico**

El balance hídrico integra información procedente de apartados citados en el presente informe, tales como la meteorología, hidrología, geomorfología e hidrogeología. Como se ha indicado anteriormente, son necesarios más cálculos de aforos, parámetros hidráulicos de los acuíferos, evaporaciones y precipitaciones con el objetivo de hacer un balance hídrico en condiciones. Se considera la información recopilada de relevancia alta.

## **2.10 Análisis y revisión de los modelos numéricos**

Se dispone de una fuente de información de modelación matemática para el Salar de pedernales:

- P\_REF.039

*CPH Consultores Ltda (2004). Estudio de Modelación Matemática Hidrogeológica Cuenca de Pedernales.*

Este estudio se realizó con el objetivo de satisfacer las necesidades hídricas de Codelco División Salvador a causa de su desarrollo y expansión. Se propuso la construcción de un modelo matemático

hidrogeológico de la cuenca que pudiese ser utilizado como herramienta de evaluación y análisis para escenarios de futura explotación. De la confección del modelo se puede extraer información de escurrimiento superficial, precipitaciones, infiltración de cauces, evaporación, recargas al acuífero, recargas y descargas, perfiles geofísicos TEM, parámetros hidráulicos mediante ensayos de bombeo, explotación artificial y volúmenes de agua embalsada. La información presentada es de buena calidad.

### **Valoración general sobre los antecedentes disponibles de modelos numéricos**

La información compilada en este modelo numérico es buena, sin embargo, este modelo está obsoleto ya que precisa de una actualización de estos datos.

## **2.11 Síntesis 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 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 obtenida en la recopilación de antecedentes es suficiente, hay una buena caracterización geológica en superficie de la cuenca Salar de Pedernales.
- Geomorfología: se concluye que hay información suficiente para la caracterización geomorfológica de la zona de estudio.
- Meteorología: la información dentro de la zona de estudio es baja para la caracterización meteorológica de las cuencas hidrográficas Salar de Pedernales, La Laguna y Quebrada Maranceles. Gran parte de los datos disponibles corresponden a estaciones que se encuentran fuera del perímetro de la zona de estudio.

Adicionalmente, es aconsejable conseguir el registro de datos meteorológicos procedentes de las dos estaciones que pertenecen a la DGA (Salar de la Isla y Maricunga) adyacentes a la cuenca de estudio.

- Geofísica: la información geofísica en la zona de estudio es relevante y presenta una buena representatividad.
- Hidrogeología: los datos hidrogeológicos no están distribuidos uniformemente, es decir, en el sector norte de la cuenca existe abundante información de niveles y parámetros hidráulicos. Mientras que, en la zona sur esta información es casi inexistente, debido a la escasez de pozos y piezómetros.
- Hidroquímica e isótopos: Al igual que en el punto anterior, la información abundante se concentra en la zona septentrional de la cuenca, sin embargo, en la meridional la información es más escasa. Además, la mayor parte de la información en el sur son resultados de análisis químicos e isotópicos de aguas superficiales, con lo cual existe una incógnita con la calidad del agua subterránea en este sector.
- Modelos numéricos: Únicamente hay un antecedente en esta área temática, se trata de un modelo que realizó CPH en 2003. Aunque la información compilada en este modelo es buena, está desactualizada.

Información de antecedentes		Registros disponibles	Registros NO disponibles	Unidad	Sectores existe POC/NULA información	Información NECESARIA y NO DISPONIBLE	Grado de precisión para construir el modelo	Justificación grado de precisión
GEOLOGÍA	Columnas estratigráficas	105	*	ud	Sur de la cuenca	-	Sector Norte Óptimo Sector Sur Regular	En el sector norte de la cuenca hay columnas estratigráficas, en cambio en la zona sur falta información.
	Mapa geológico (SERNAGEOMIN)	3	0	ud	-	-	Óptimo	Se dispone de una buena caracterización geológica de toda la cuenca.
METEOROLOGÍA	Estaciones meteorológicas	22	2	ud	-	-2 Estaciones DGA (Salar de la Isla y Pedernales). Dichas estaciones están operativas pero hay que descargarlos en terreno o pagar el GOES.	Bueno	Se dispone de suficiente información, sin embargo se conoce de más estaciones en la cuenca.
HIDROLOGÍA	Estaciones fluviométricas	1	*	ud	-	-	Regular	Únicamente hay una estación fluviométrica en la cuenca, es necesario tomar aforos de los cursos fluviales en el sector norte y sureste.
	Lisímetros	4	**	ud	Zona sur del Salar	Datos actuales de los lisímetros de la DGA.	Bueno	La totalidad de los lisímetros están situados al norte en la periferia del salar, sin embargo en el sur no hay información.
GEOFÍSICA	TEM y NanoTEM	30 / 283,5	*	perfiles/Km	Sur de la cuenca	-	Bueno	Hay información en abundancia, sin embargo, para caracterizar mejor el salar es necesaria más geofísica.
	Sísmica	3 / 35,9	*	perfiles/Km	-			
	Resistividad eléctrica (SEV)	20	*	ud	-			
	Gravimetría	16 / 343,7	*	perfiles/Km	Noreste de la cuenca			
HIDROGEOLOGÍA	Puntos con Niveles de agua	97	*	ud	Sur de la cuenca	-	Sector Norte Óptimo Sector Sur Regular	En el sector norte, existe información al respecto, sin embargo en el sur, o hay ensayos de bombeo ni medidas de nivel. La hidroquímica e isótopos analizados en el sector sur corresponden a aguas superficiales pero no subterráneas.
	Parámetros hidráulicos	32	*	ud	Sur de la cuenca			
HIDROGEOQUÍMICA	Puntos de agua con hidroquímica	133	*	ud	Sur de la cuenca a nivel subterráneo (de los puntos superficiales/vertientes si se dispone de información).	-		
ISÓTOPOS	Puntos de agua con isótopos	44	*	ud	Sur de la cuenca	-		

\*Se cree que se dispone de la información más relevante.

\*\* Se dispone de un periodo de información pero no de los últimos años.

Tabla 2-1. Valoración de los antecedentes.

Fuente: elaboración propia.

## 3. Caracterización hidrológica

En el presente capítulo se caracteriza la hidrografía, la morfología y la hidrología de la Cuenca hidrogeológica Salar de Pedernales.

### 3.1 Caracterización hidrográfica

El área de estudio se compone por tres cuencas hidrográficas: Salar de Pedernales, La Laguna y Quebrada Maranceles. Una cuenca hidrográfica se delimita por la divisoria de agua superficial. En conjunto el área de estudio presenta una extensión de 4.156 km<sup>2</sup>. La extensión de la zona de estudio ha sido redefinida por Amphos 21 para el presente estudio. La delimitación hidrográfica se ha adaptado del relieve DEM de la red JAXA (Alos Palsar, de 12,5 x 12,5 m por píxel de resolución. En la Figura 3-1 se presenta la ubicación de la zona de estudio, la red hidrográfica y la delimitación de las cuencas hidrográficas.

#### 3.1.1 Cuenca hidrográfica Salar de Pedernales

La cuenca hidrográfica Salar de Pedernales es la cuenca endorreica de mayor superficie en la Región de Atacama, con una extensión de 3.592 km<sup>2</sup>. Se ubica hacia el este de la cuenca exorreica del río Salado, y se encuentra separada por la cordillera de Domeyko y la sierra Bórax. La cuenca hidrográfica Salar de Pedernales cuenta con una obra de descarga hacia la parte alta de la cuenca del río Salado desde la década de los años 30.

El salar es el más grande de esta región, cubriendo una superficie aproximada de 446 km<sup>2</sup>. El salar corresponde a una costra de yeso y halita, con un bajo número de pequeñas lagunas, ubicadas generalmente en sus márgenes. Las lagunas ubicadas en el margen noreste del salar son profundos “ojos” en la costra de sal, las demás son lagunas superficiales. El salar se encuentra ubicado en el extremo norte de la cuenca hidrográfica.

Los cauces presentes en la cuenca hidrográfica conducen los caudales hacia el salar, siendo el río la Ola su tributario más importante, el cual se desarrolla de sur a norte atravesando el llano Leoncito y el llano la Ola. En este sector, el río recibe algunos tributarios principalmente desde el este, donde destacan el río Leoncito y el río Juncalito, ambos de escurrimiento permanente. Tras pasar frente al cerro Punta Negra, el río la Ola se orienta con dirección noreste hasta llegar al salar.

La cuenca hidrográfica Salar de Pedernales se dividió en tres subcuencas, según la división definida por la DGA. Esta división se realizó a fin de facilitar los cálculos de la esorrentía superficial. Las subcuencas definidas se muestran en la y corresponden al río la Ola, río Juncalito y Salar.

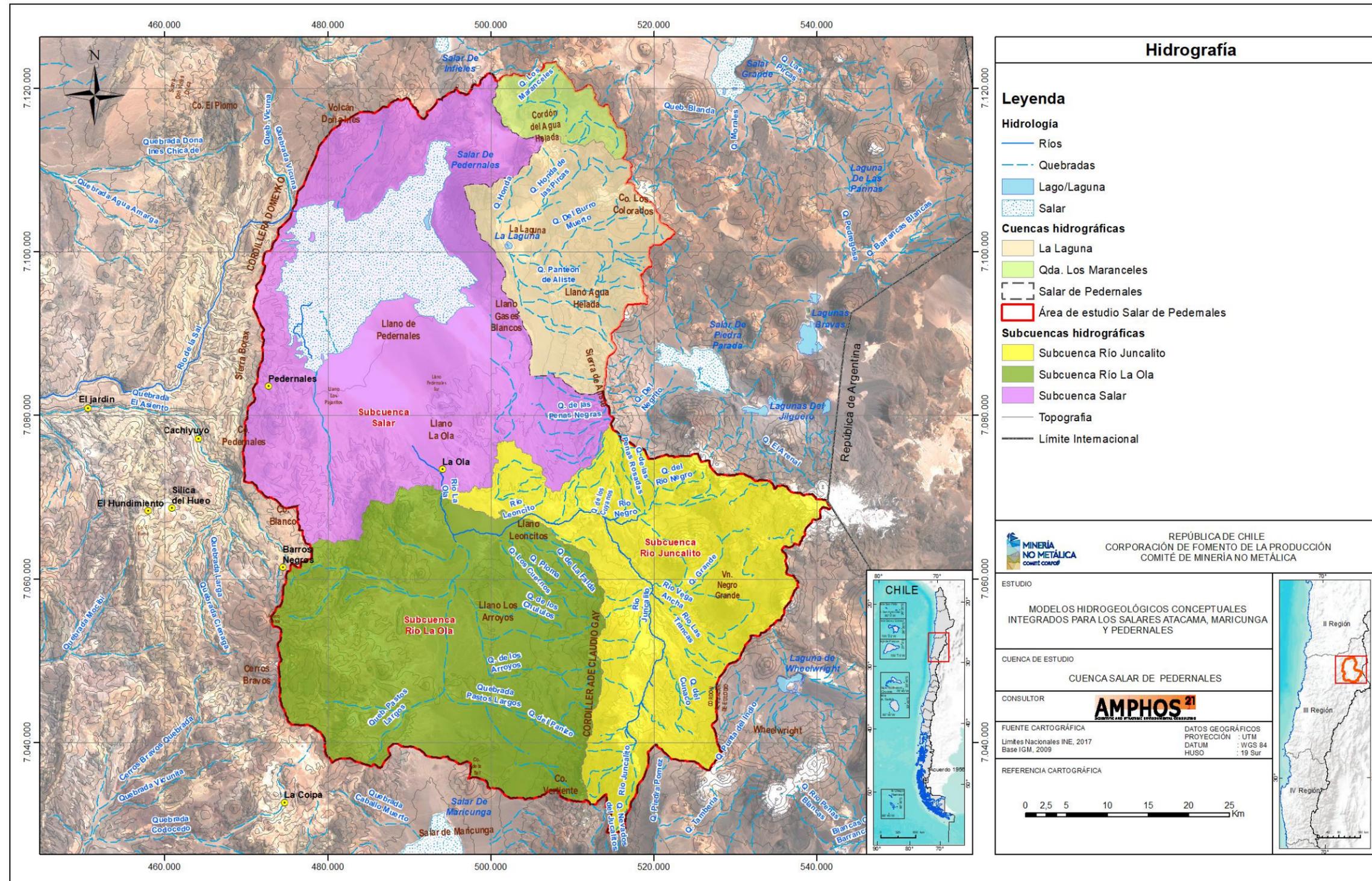


Figura 3-1. Cuencas y red hidrográfica de la cuenca Salar de Pedernales. Fuente: elaboración propia.

Fuente: elaboración propia.

### **3.1.2 Cuenca hidrográfica La Laguna**

La cuenca hidrográfica La Laguna abarca una superficie de 457 km<sup>2</sup>, se ubica al noreste de la cuenca Salar de Pedernales y se encuentran separadas por los cerros Portezuelo del Bajo, La Nuez y del Agua Helada. La cuenca hidrográfica presenta un sistema de lagunas de agua salada que se ubican en su sector noroeste. Desde el este (Cordón Azufrera Tres Puntas y Panteón de Aliste) el sistema de lagunas recibe los aportes de numerosas quebradas, destacándose la quebrada Honda de las Pircas, ubicada al norte de la cuenca, la quebrada del Burro Muerto por el centro y la quebrada Panteón de Aliste por el sur. Esta última quebrada se alinea en dirección al norte hacia las lagunas, luego de llegar al valle.

### **3.1.3 Cuenca hidrográfica Quebrada Maranceles**

Esta cuenca hidrográfica endorreica se encuentra rodeada por algunas de las mayores cuencas hidrográficas endorreicas de la región de Atacama (Salares de Pedernales, Infieles y Grande) y presenta un tamaño menor en comparación. Debido a lo anterior, en algunas referencias ha sido incluida como parte de alguna de sus cuencas vecinas. Su superficie es de 107 km<sup>2</sup> y no presenta cuerpos de agua (laguna o salar). Los cauces principales de esta cuenca hidrográfica corresponden a la Quebrada Maranceles y la quebrada del Llano, ambos están orientados de este a oeste. A partir de imágenes satelitales es posible identificar la presencia de rellenos sedimentarios con forma de delta, donde desaparecen las quebradas antes mencionadas.

## **3.2 Caracterización morfológica**

La Tabla 3-1 se presenta los parámetros morfológicos de las cuencas hidrográficas estudiadas. Los parámetros morfológicos de las cuencas hidrográficas en estudio junto con su delimitación 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 tres cuencas hidrográficas en estudio.

Parámetros morfológicos	Cuenca hidrográfica			
	General (*)	Salar de Pedernales	La Laguna	Quebrada Maranceles
Área [km <sup>2</sup> ]	4156,4	3592,3	456,9	107,1
Atura mínima [m]	6169,0	3369,0	3536,0	3938,0
Altura máxima [m]	3369,0	6169,0	5626,0	5025,0
Altura promedio [m]	4070,0	4036,9	4245,8	4430,8
Pendiente media [%]	19,2	19,2	21,7	21,2
Longitud cauce principal [km]	80,4	80,4	22,0	17,9
Altura mín. cauce principal [m]	3556,0	3556,0	3561,0	4011,0
Altura máx. cauce principal [m]	4941,0	4941,0	4907,0	4863,0
Altura media cauce principal [m]	4075,2	4075,2	4208,5	4385,5
Pendiente mín. cauce principal [%]	0,0	0,0	0,0	0,0
Pendiente máx. cauce principal [%]	98,8	98,8	35,6	45,5
Pendiente media cauce principal [%]	11,1	11,1	9,7	8,9

\* Nota: La cuenca general corresponde a la formada por las cuencas hidrográficas Salar de Pedernales, La Laguna y Quebrada Maranceles

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

Fuente: elaboración propia.

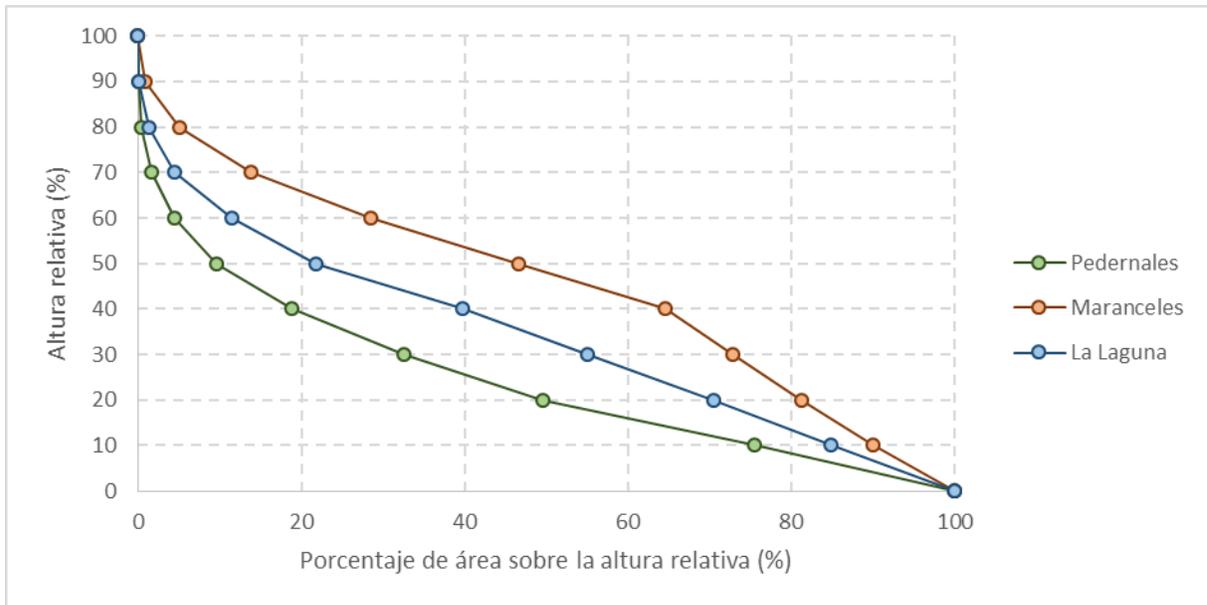


Figura 3-2. Curvas hipsométricas.

Fuente: elaboración propia.

### 3.3 Análisis hidrológico

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.

#### 3.3.1 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 determinó la precipitación sobre la cuenca hidrográfica Salar de Pedernales y se validaron las curvas isoyetas sobre las cuencas hidrográficas de La Laguna y Quebrada Maranceles. 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, bien distribuidas en la cuenca. Por otro lado, las cuencas Alto Andinas presentan un número menor de estaciones privadas, 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	
-	Potrillo	455.118	7.079.939	2.850	
-	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)

(1): Henríquez (1975)

(2): EIA Proyecto Lobo Marte (2011)

(3): CODELCO (2004)

(4): DGA-DIHA PUC (2009)

(5): Amphos 21 (2016)

(6): DIA Continuidad Operacional División Salvador (2017)

Tabla 3-2. Estaciones meteorológicas.

Fuente: elaboración propia.

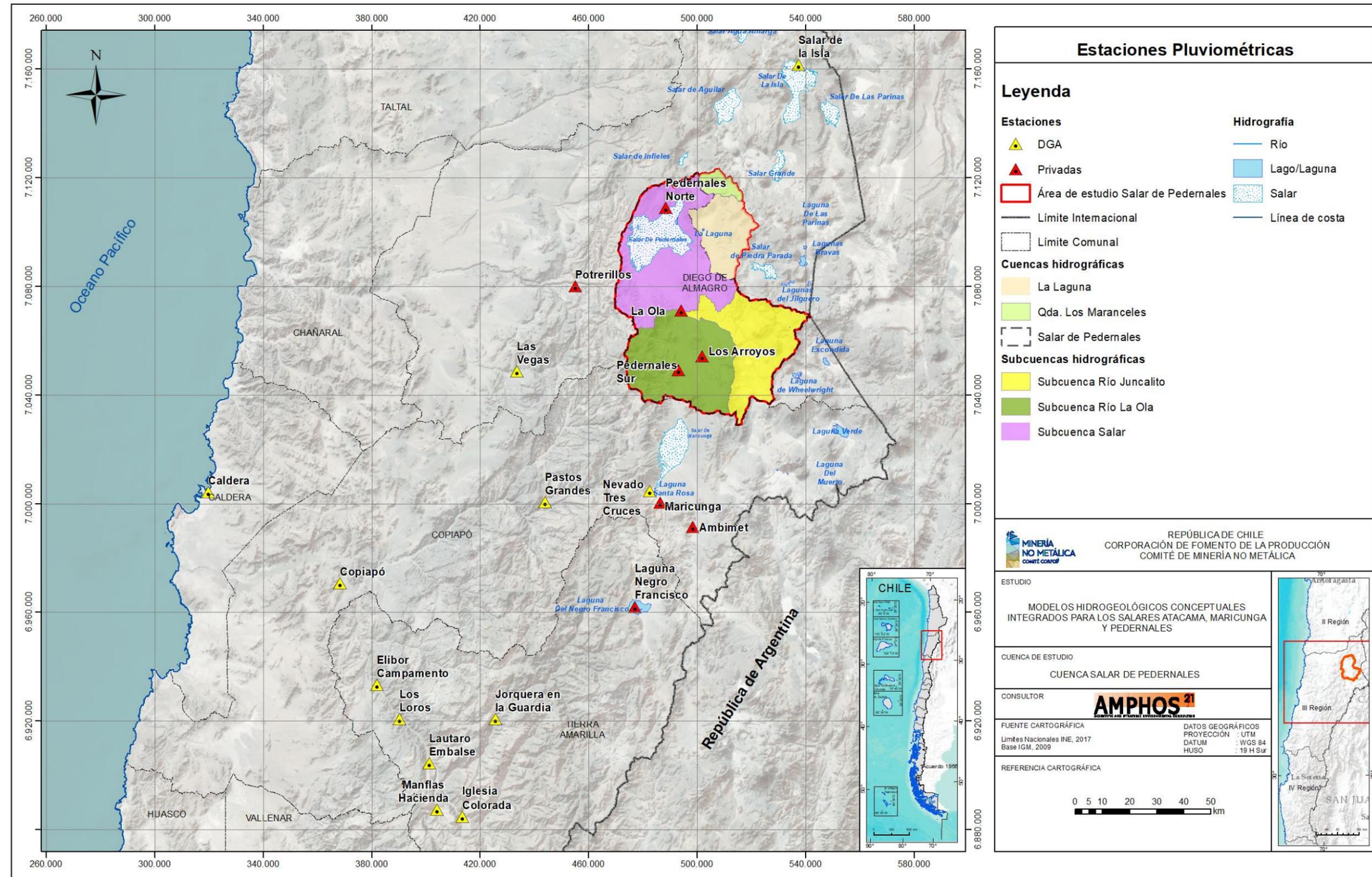
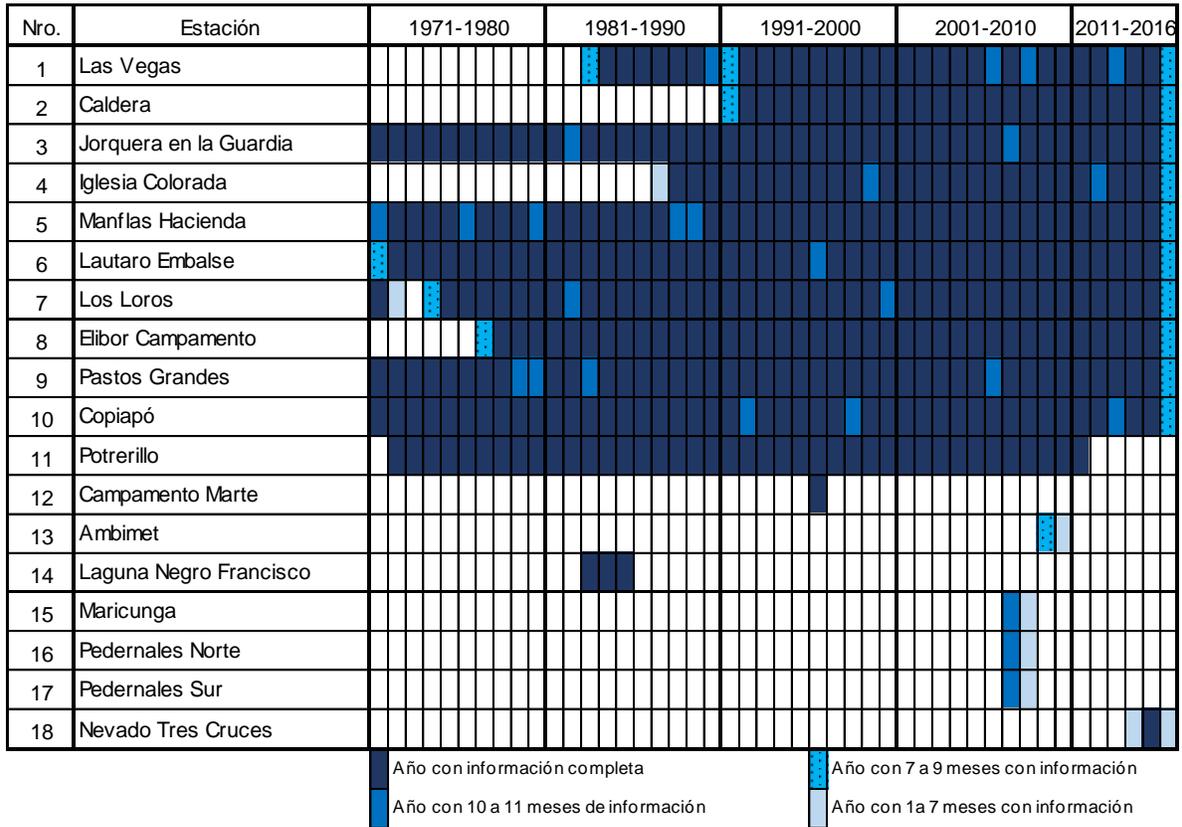


Figura 3-3. Ubicación estaciones meteorológicas.

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) puede ser descargado si se realiza una visita a terreno, actualmente no se cuenta con él.

Tabla 3-3. Disponibilidad de información pluviométrica.

Fuente: elaboración propia.

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 observar 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.

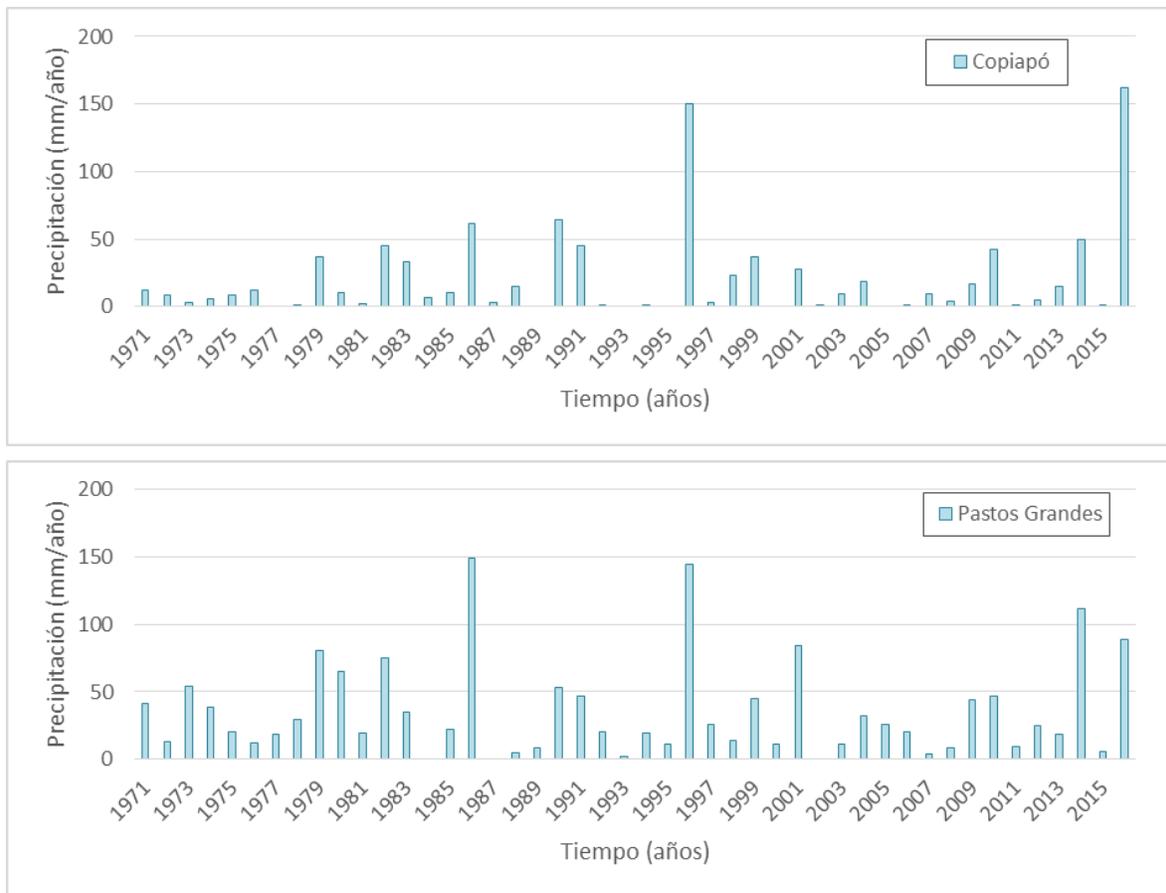


Figura 3-4. Serie de tiempo de precipitación anual (periodo 1971-2016).

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	-	-	-
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 una relación entre la altura y la 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. 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 para las cuencas hidrográficas Quebrada Maranceles y La Laguna. Así, se adoptaron las isoyetas desarrolladas en el estudio DGA-Amphos (2016) para distribuir espacialmente la precipitación sobre estas cuencas hidrográficas, mientras que para Salar de Pedernales se utiliza la curva presentada en la Figura 3-5. Las isoyetas 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.

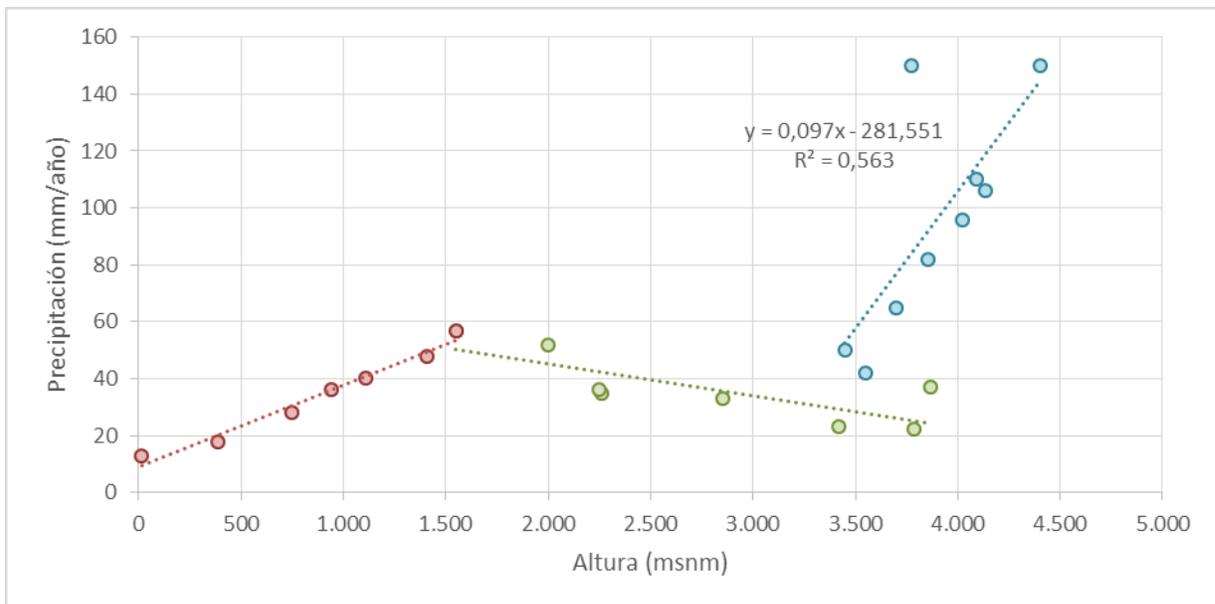


Figura 3-5. Relación de altura contra precipitación media anual.

Fuente: elaboración propia.

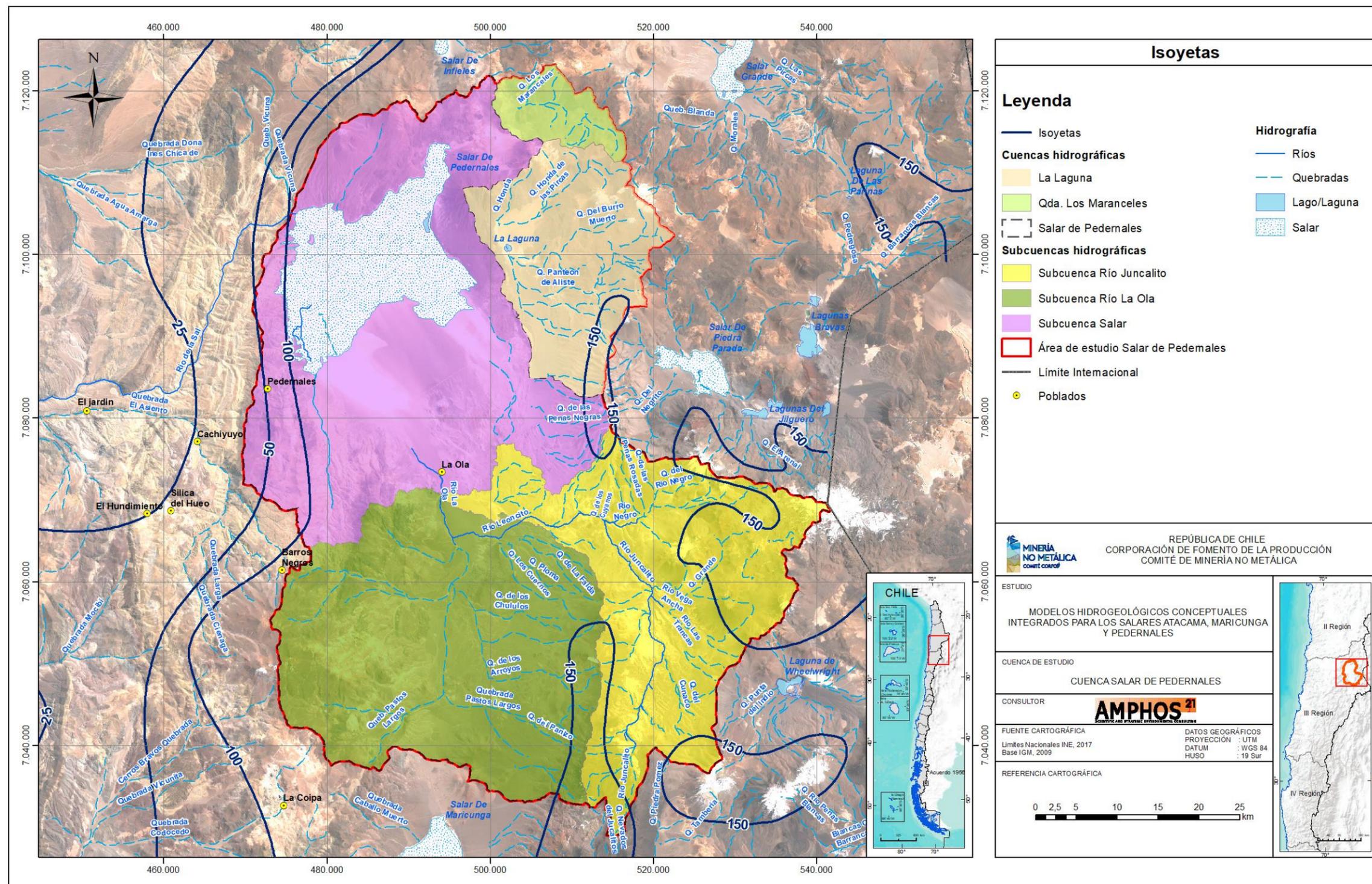


Figura 3-6. Isoyetas de precipitación media anual en el área de estudio.

Fuente: modificado de DGA-Amphos 21 (2016).

Finalmente, la Tabla 3-5 presenta la precipitación media anual calculada en las cuencas hidrográficas. La tabla permite comparar el valor adoptado con estimaciones realizadas en otros estudios anteriores. Se observa que la precipitación media anual calculada está dentro de un rango similar a los valores obtenidos en otros antecedentes, siendo menor para la cuenca hidrográfica Salar de Pedernales.

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)	Pp media adoptada
	(m s.n.m.)	(km <sup>2</sup> )	(mm/año)	(mm/año)	(mm/año)	(mm/año)	(mm/año)
Salar de Pedernales	4037	3592	128	127	145	133	110
La Laguna	4246	457	141	140	153	149	149
Quebrada Maranceles	4431	107	124	126	145	144	144

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

Fuente: modificado de DGA - Amphos 21 (2016).

### 3.3.3 Análisis de escorrentía

A continuación, se presenta el análisis de los caudales. 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 en este análisis se presentan en la Tabla 3-6. La Figura 3-7 presenta la ubicación de las estaciones. Como se puede observar, la cuenca hidrográfica Salar de Pedernales presenta una estación llamada río la Ola en Vertedero. El análisis también se realiza sobre las cuencas Alto Andinas de la laguna Negro Francisco y del salar de Maricunga, ya que presentan características similares a la cuenca del salar de Maricunga y en conjunto presentan 6 estaciones fluviométricas.

Código BNA	Nombre estación	Coordenada este (WGS84)	Coordenada norte (WGS84)	Elevación (m s.n.m.)
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 7 a 9 meses con información, debido a que registran pocos datos en los meses de junio y septiembre.

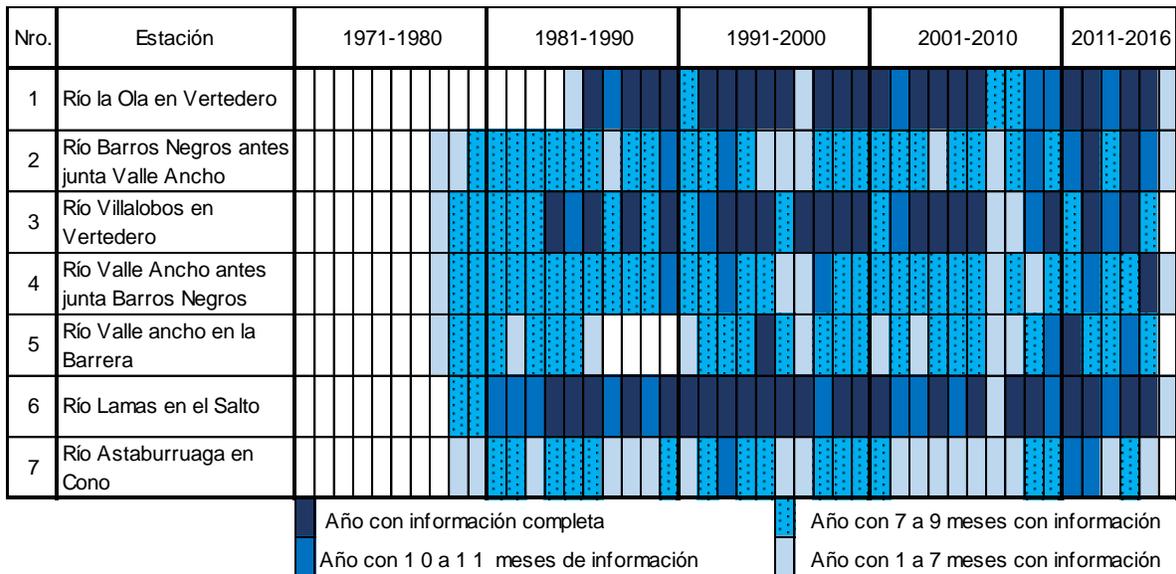


Tabla 3-7. Disponibilidad de información fluviométrica.

Fuente: elaboración propia.

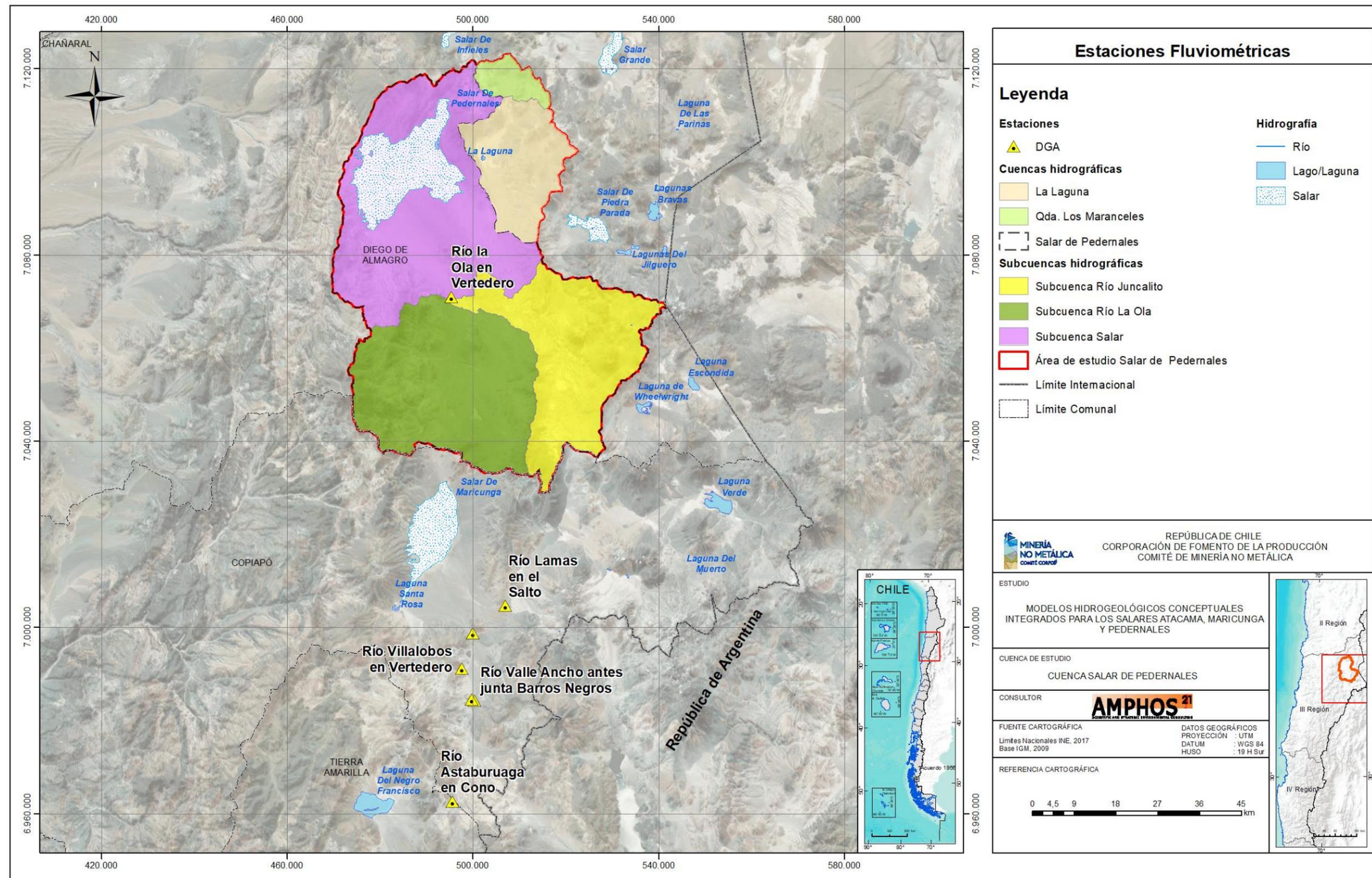


Figura 3-7. Ubicación de estaciones fluviométricas en el área de estudio.

Fuente: elaboración propia.

### 3.3.3.3 Curvas de variación estacional de caudales

Se calcularon las curvas de variación estacional para la estación la Ola en el Vertedero y río Lamas en el Salto (ubicada en la cuenca vecina de Maricunga). 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 a las distribuciones Log-Normal y Pearson III, considerando esto se escogió la distribución Log-Normal. 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.

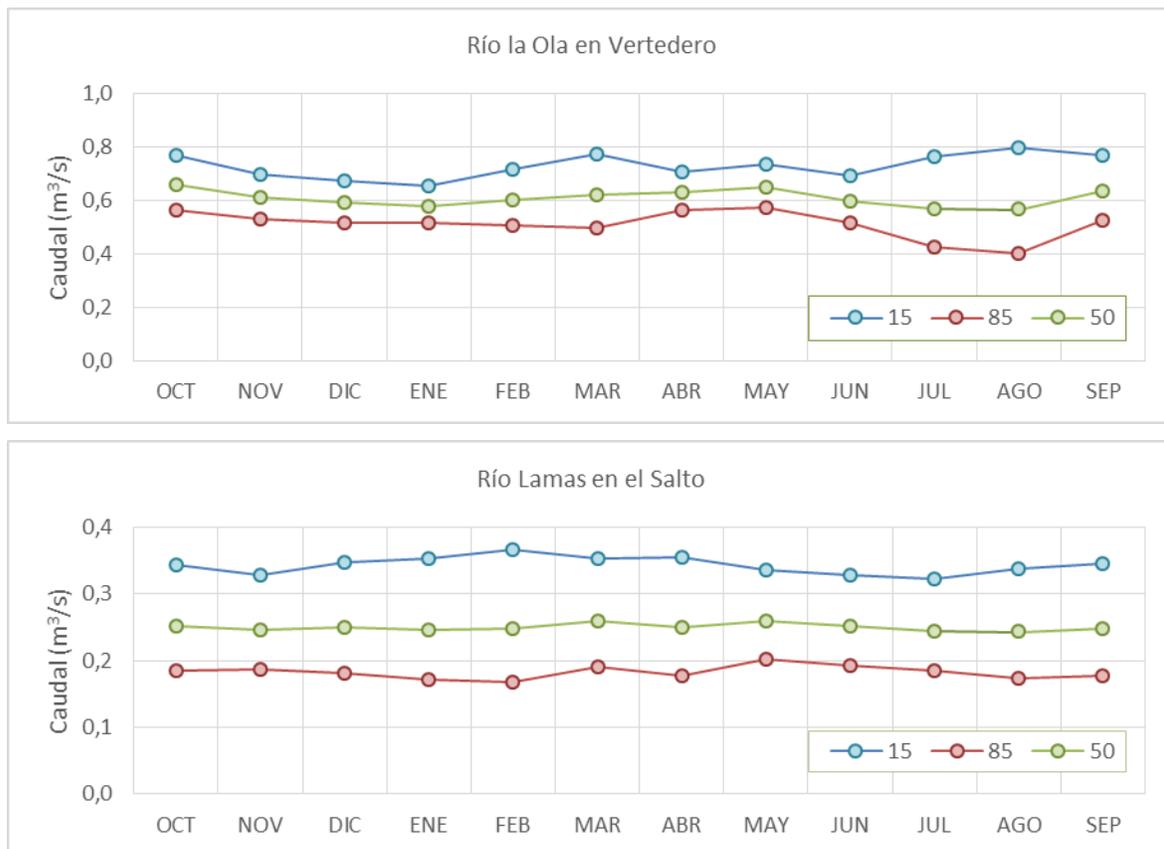


Figura 3-8. Curvas de variación estacional de caudales para distintas probabilidades de excedencia (%).

Fuente: elaboración propia.

### 3.3.4 Evaporación

En el presente capítulo se incluye el análisis de la distribución regional de la evaporación, se ubican las estaciones existentes con medición de la evaporación de tanque y finalmente se realiza un análisis estadístico.

#### 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 m s.n.m. la evaporación va disminuyendo con la altura. Además, se aprecia una variabilidad importante entre los 3.000 y 3.500 m s.n.m.

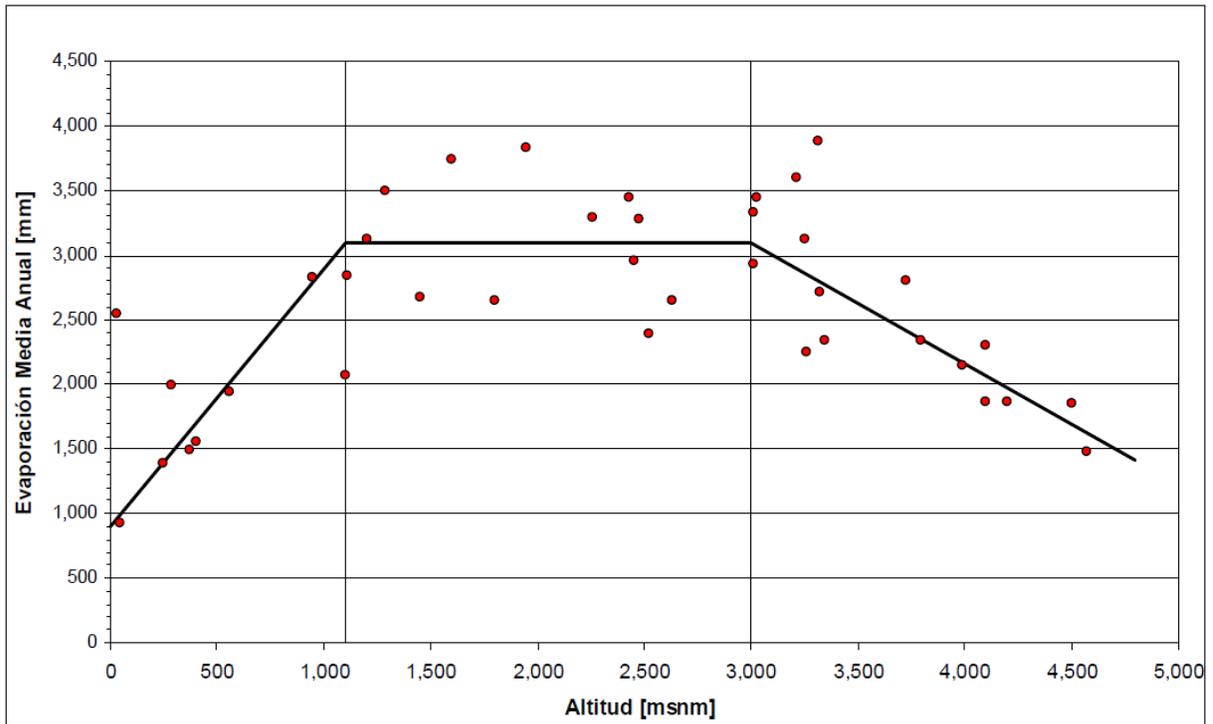


Figura 3-9. Gradiente de la evaporación media anual.

Fuente: DGA-DIHA PUC (2009).

3.3.4.2 Estaciones con medición de evaporación de tanque

Se recopiló 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 cuencas del 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 (m s.n.m.)	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)

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

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

Fuente: elaboración propia.

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 Salar de Pedernales y en una cuenca vecina (salar de Maricunga).

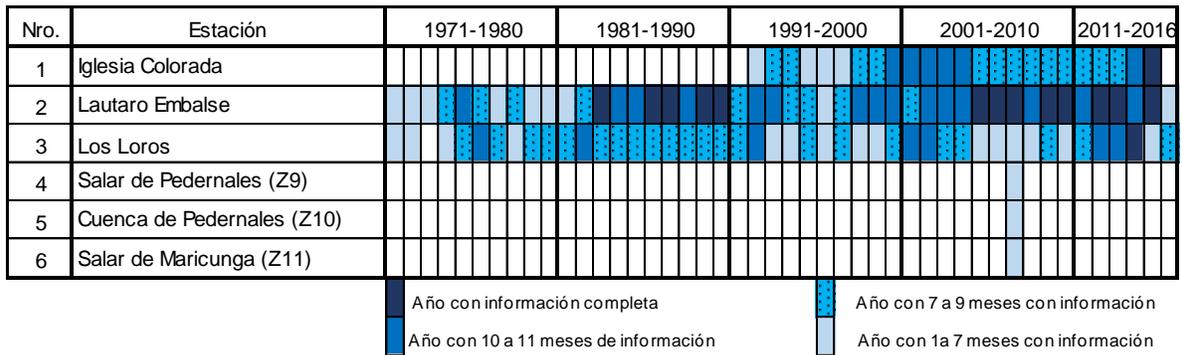


Tabla 3-9. Disponibilidad de información de evaporación de tanque.

Fuente: elaboración propia.

## 4. Caracterización geológica

### 4.1 Marco geológico

La Cordillera Principal de Los Andes es una unidad morfoestructural de orientación N-S, que se extiende longitudinalmente a lo largo de todo el continente sudamericano. Se originó durante la orogénesis andina y actualmente todavía se encuentra activa. Se caracteriza por ser una zona de subducción de la Placa de Nazca bajo la Sudamericana. La zona de estudio se encuentra en la parte central de la Depresión Pre-Andina, entre la Cordillera de Domeyko y la Cordillera Principal de Los Andes.

El levantamiento de la cordillera de los Andes comenzó en la era Cenozoica, aproximadamente hace 66 Ma, cuando se inició el régimen geológico compresivo. A partir de entonces se empezaron a formar estructuras regionales y en el transecto Chañaral - Pedernales se puede diferenciar de W a E la Cordillera Costera, la Depresión Central, la Cordillera Pre-Andina, la Depresión Pre-Andina y la Cordillera Andina. A nivel regional, la orientación de las fallas inversas y el rumbo de los ejes de las fallas inversas son mayoritariamente E y W (T.Nalpas et al., 2008) (Figura 4-1).

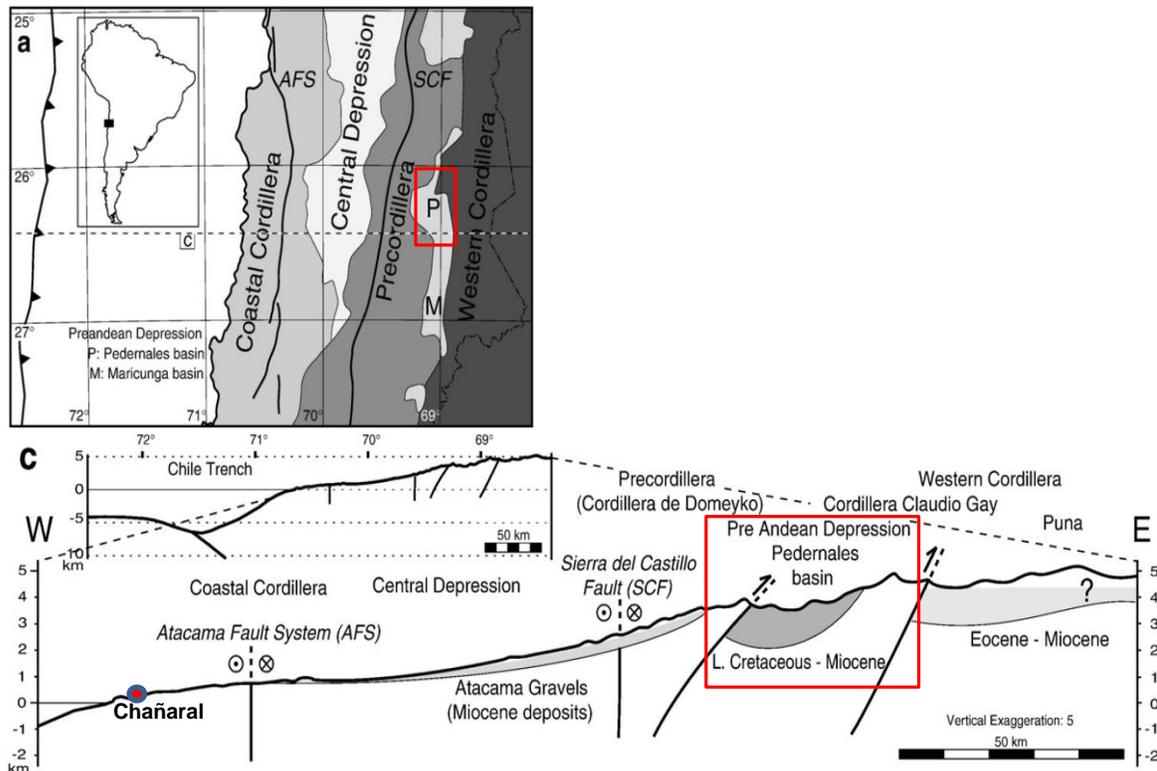


Figura 4-1. Localización regional de la Cuenca de Pedernales,

Fuente: Modificado de T. Nalpas et al., 2008.

La cuenca Salar de Pedernales, localizada en el borde este de la Precordillera, presenta actividad volcánica reciente que data del Oligoceno-Mioceno (Cornejo et al., 1993; Mpodozis et al., 1995). Hacia el este, la Cordillera Claudio Gay se formó por el levantamiento del basamento Paleozoico, cubierto por sedimentos y secuencias volcánicas del Eoceno-Mioceno (Mpodozis & Clavero, 2002) que conforman el límite oeste de la Cordillera Andina, formada por una cadena de estratovolcanes y calderas parcialmente activas de la Zona Volcánica Andina Central (Kay et al., 1999; Clavero et al., 2000). La deformación eocena producida por el levantamiento tectónico en la Precordillera generó hoyas hidrográficas –en el caso del presente estudio, la cuenca de Pedernales- en las cuales posteriormente se depositaron secuencias sedimentarias que se preservaron al oeste a lo largo de la Cordillera Claudio Gay y la Depresión Pre-Andina (Cornejo et al., 1998b; Mpodozis & Clavero 2002). Más al oeste, se distribuyen desde la Precordillera hasta la Cordillera Costera secuencias de gravas (Gravas de Atacama, Sillitoe et al., 1968; Mortimer, 1973; Cornejo et al., 1993, 1998; Riquelme, 2003) semi-consolidadas del mediados del Mioceno (Cornejo et al., 1993). En la Precordillera, el techo de las Gravas de Atacama es sellado por una superficie sedimentaria extensa cubierta por las Ignimbritas de San Andrés atribuidas al alto Mioceno Superior (Clark et al., 1967; Sillitoe et al., 1968; Mortimer, 1973; Cornejo et al., 1993). Posteriormente, durante el Cuaternario, series estratigráficas aluviales, coluviales, eólicas, glaciares y lacustres sedimentaron para dar lugar al relieve conocido actualmente.

Las características principales del sistema donde se emplaza la cuenca Salar de Pedernales son:

1. Ambientes dominados por procesos de evaporación característicos de climas áridos.
2. El nivel freático somero es un factor clave, también favorece la evaporación. La recarga en estos sistemas se produce por aportes subterráneos.
3. El agua subterránea contiene elevadas concentraciones de iones disueltos, provenientes de la disolución de minerales presentes en las rocas, ya sea por aguas meteóricas termales y/o lixiviado de evaporitas.
4. Se trata de una cuenca endorreica (sin afluente superficial).

Con estas condiciones se formó el Salar de Pedernales, uno de los más grandes de Chile. Las escasas precipitaciones escurren desde las zonas más elevadas hacia las planicies más deprimidas de la zona septentrional de la cuenca de estudio. Aquí, las aguas cargadas de iones se evaporan con la consiguiente precipitación de yeso y halita dando lugar al salar.

## 4.2 Unidades Geológicas

A continuación, se procede a hacer una caracterización de los diferentes tipos de rocas que constituyen las unidades geológicas de la cuenca Salar de Pedernales. Las unidades geológicas descritas en el presente apartado han sido representadas en un mapa geológico (Figura 4-2).

Las descripciones y el mapa corresponden a una compilación de las siguientes referencias oficiales de Sernageomin:

- Clavero, J., Gardeweg, M., Mpodozis, C., 1998. Mapa Geológico Preliminar del Área del Salar de Piedra Parada, Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería (Chile). Escala 1:100.000.
- Cornejo, P., Mpodozis, C., Tomlinson, A.J., 1998. Hoja Salar de Maricunga, Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, Mapas Geológicos No.7. Escala 1:100.000, Santiago.
- Tomlinson, A.; Cornejo, P.; Mpodozis, C., 1999. Hoja Potrerillos, Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería (Chile). No. 14, 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 Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 139-140: 34 p. Escala 1:100.000. Santiago.

#### 4.2.1 Depósitos no consolidados

- Depósitos aluviales Miocenos (MsPa) (Mioceno Superior-Plioceno Inferior)

Bancos de gravas y bloques con clastos de bajo redondeamiento y mala selección. Se trata de sedimentos matriz-soportados con abundante arena y limo, y locamente lentes de arena fina. Se ubican a lo largo de toda la cuenca de Pedernales.

- Depósitos antiguos del Salar de Maricunga (MsPls) (Mioceno Superior-Plioceno)

Costras sulfatadas y boratadas que afloran en el Salar de Pedernales, en la zona norte de la cuenca.

- Gravas aterrazadas (MsPla) (Mioceno superior- Plioceno)

Depósitos de gravas aterrazadas polimícticas de hasta 15 m de espesor que cubren la ignimbrita Laguna Verde. Presentan una superficie suavemente peniplanizada y se encuentran cubiertas por depósitos aluviales y coluviales recientes. Se encuentra en el sector noroeste de la cuenca.

- Depósitos lacustres (Ql) (Pleistoceno inferior)

Areniscas, limolitas y conglomerados finos a medios de borde de lagos, moderada a fuertemente consolidados que se disponen horizontales al sur de La Laguna, los que comúnmente muestran líneas de costa, y que se encuentran disectados y, en parte, cubiertos por los cauces actuales. Los fragmentos están constituidos básicamente por andesitas, dacitas y fragmentos piroclásticos muy redondeados y, en general, bien seleccionados, tomando capas bien laminadas con espesores entre 5 y 10 cm, algunas con laminación cruzada y lentes de arena. Se encuentra en el sector centro-oeste de la cuenca.

- Depósitos de paleosalar (Qps) (Pleistoceno inferior)

---

Secuencia de depósitos de yeso con cristales de hasta 30 cm de largo y, en menor proporción, de ulexita intercalados con niveles terrígenos y piroclásticos finos. Se encuentra en el sector noroeste de la cuenca.

- Depósitos aluviales antiguos (Qala) (Cuaternario)

Sedimentos moderadamente compactos, estratificados (gravas, arenas y limos). Forman conos de morfología suave y baja pendiente, en el borde sureste del Salar de Pedernales, donde se encuentra el depósito de mayor cobertura. Otros depósitos más pequeños se ubican a lo largo de toda la cuenca.

- Depósitos aluviales y coluviales antiguos (TQac)

Depósitos de escombros de falda, conos de deyección y relleno de valles y quebradas, polimícticos, mal seleccionados, de baja madurez, con fragmentos de hasta 1 m de diámetro inmersos en una matriz de arena gruesa, asociados a sistemas de drenaje inactivos. Se caracterizan por una superficie suavizada por la erosión, en tanto en los valles, se presentan suavemente peniplanizados. Ocurren disectados o cubiertos por los cauces y conos de deyección actuales. Se encuentra distribuida en toda la cuenca.

- Depósitos salinos recientes de Pedernales (Qs) (Cuaternario)

Sales y limos salinos, que forman el margen sur y oriental del Salar de Pedernales (Sector de recarga activa).

- Depósitos aluviales (Qa) (a) (Cuaternario)

Depósitos no consolidados que rellenan los cauces actuales de quebradas y valles de escorrentía intermitente. Se encuentra en el sector noroeste de la cuenca.

- Depósitos coluviales (Qc) (Cuaternario)

Fragmentos sueltos que se disponen en la falda de los cerros y relleno de quebradas, con poco transporte, esencialmente gravitacional. Se encuentra en el sector noroeste de la cuenca.

- Depósitos glaciares (Qg) (a) (Cuaternario)

Incluye morrenas de fondo y laterales y depósitos periglaciares correspondientes a gravas y bloques polimícticos inmersos en una matriz de limo-arena. Se encuentran en el límite centro-oriente, en la zona de Complejos Volcánicos del Cuaternario (Qv).

- Depósitos salinos indiferenciados (Qs) (Cuaternario)

Depósitos de sales constituidos esencialmente por cloruros y, en menor proporción, por sulfatos y boratos. Forman costras superficiales (< 10 cm) en La Laguna. Se encuentra en el sector noroeste de la cuenca.

- Depósitos eólicos (Qe) (Cuaternario)

Limos y arenas finas, no compactas, ubicados al sureste del Salar de Pedernales, en el sector norte de la cuenca.

- Depósitos aluviales y coluviales (Qac) (Cuaternario)

Depósitos no consolidados de limo, arena, ripio y gravas, asociados a sistemas de drenaje y taludes activos, que constituyen los cauces, conos de deyección y relleno de valles y quebradas actuales. Corresponden a depósitos polimícticos a monomícticos (depósitos de relleno de quebradas y coluvio con poco transporte y depósitos de corrientes de barro), mal seleccionados y pobremente estratificados. Se encuentra distribuida en toda la cuenca.

- Depósitos glaciares (Qg) (b) (Cuaternario)

Brecha polimíctica a monomíctica no consolidada, constituida esencialmente por fragmentos de dacitas y andesitas de tamaño variable (<1 m) y angularidad creciente con el tamaño, inmersos en una matriz de limo-arena. Se incluyen depósitos periglaciares. Se encuentra en el centro-sur de la cuenca.

- Depósitos de remoción en masa (TQrm) (Cuaternario)

Brechas polimícticas, generalmente no consolidadas, las que habitualmente aún conservan estructuras tipo “hummocks” y drenajes cerrados, evidenciando los bloques colapsados que contienen debido a su origen por deslizamiento gravitacional en laderas abruptas. Están constituidos por bloques de diversos tamaños, muy fracturados, incluidos en una matriz de granulometría variable formada por la trituración mecánica de los bloques. Se encuentra en el extremo norte de la cuenca.

- Remociones en masa (PIHrm) (Cuaternario)

Sedimentos compuestos por bloques métricos y material disgregado in situ, producto de transporte gravitacional. Se ubican principalmente en el sector sur de la cuenca.

- Depósitos coluviales (PIHc) (Cuaternario)

Sedimentos formados por bloques angulosos, comúnmente monomícticos, y arenas, que ocurren en las laderas de fuerte pendiente. Se encuentran a lo largo de toda la cuenca, en zonas donde existe una fuerte disminución de pendiente.

- Depósitos aluviales (Qa) (b) (Cuaternario)

Arenas, gravas y limos asociados a sistemas de drenaje ocasional o cauces inactivos. Se encuentran varios depósitos a lo largo de la cuenca.

- Depósitos fluviales (Qf) (Cuaternario)

Sedimentos no consolidados (ripios, gravas y arenas), heterocomposicionales, clastosoportados, con escasa matriz de arena gruesa, localmente imbricados (ríos La Ola y Juncalito). Se encuentran en el sector sur de la cuenca.

- Complejos volcánicos del cuaternario (Qv) (Cuaternario)

Extenso conjunto de estratovolcanes compuestos y mixtos superpuestos formados por lavas, domos y depósitos piroclásticos de caída. Se encuentran en el borde centro-oriente de la cuenca.

#### 4.2.2 Rocas estratificadas

- Formación Chinchas (DCch) (Devónico-Carbonífero? 231 M.a.)

Sucesión de lutitas y areniscas arcósicas de ambiente subacuático, marino. Aflora principalmente en la zona centro y sur poniente de la cuenca.

- Formación La Tabla (Pzlt) (Paleozoico Superior)

Secuencia maciza de tobas y brechas riolíticas y andesíticas. Aflora en los límites centro y sur oeste.

- Formación Pantanoso (Pep) (Pérmico)

Secuencia de rocas volcánicas, volcanoclásticas y subvolcánicas, que aflora, como el basamento de la Cordillera Claudio Gay, en el sector oriente de la cuenca.

- Formación Pantanoso (PzTrp) (Paleozoico superior – Triásico)

Secuencia esencialmente volcánica constituida por riolitas y riolacitas, a veces fluidales, tobas riolíticas comúnmente soldadas, de estratificación gruesa, con escasas intercalaciones de lavas y cuerpos subvolcánicos basálticos, y de areniscas, conglomerados y brechas epiclásticas. Se ubican en el sector centro-este de la cuenca.

- Estratos El Mono (TrJem) (Triásico Superior-Jurásico Inferior)

Secuencia sedimentaria detrítica expuesta en el límite suroeste de la cuenca.

- Formación Quebrada del Salitre (TrJqs) (Triásico Superior-Jurásico Inferior)

Secuencia sedimentaria-volcánica compuesta por lavas y brechas basálticas, domos riolíticos, areniscas y calizas fosilíferas. Aparece como un afloramiento pequeño en el borde noroccidental de la cuenca.

- Estratos de Quebrada Vicuña (Jqv) (Jurásico Superior)

Unidad, principalmente, volcánica formada por lavas andesítico-basálticas vesiculares y 'sills' de la misma composición, con intercalaciones de calizas y areniscas calcáreas. Corresponde a un solo afloramiento ubicado al centro-oeste de la cuenca.

- Formación Montandón (Jm) (Pliensbachiano-Bajociano medio)

Alternancia de calizas y calcilitas fosilíferas y conglomerados finos con matriz calcárea, de espesor aproximado 300 m. Corresponde a pequeños afloramientos ubicados en la zona poniente de la cuenca.

- Formación Asientos (Ja) (Caloviano)

Secuencia de calizas fosilíferas amarillas y areniscas volcanoclásticas verdes, con intercalaciones menores de lavas basálticas. Corresponde a pequeños afloramientos ubicados en la zona poniente de la cuenca.

- Formación Pedernales (JKp) (Titoniano-Valanginiano)

Secuencia de espesor variable, entre 150 y 300 m, formada por una alternancia de calizas y areniscas calcáreas fosilíferas. Afloran en dos zonas ubicadas al oeste de la cuenca donde cubren áreas pequeñas.

- Formación Quebrada Monardes (Kqm) (Cretácico Inferior)

Secuencia de lutitas y areniscas arcósicas continentales de unos 200 m de espesor. Aflora en el sector centro y en el suroeste de la cuenca.

- Estratos de Cerro Los Carneros (Kcc) (85-65 M.a.)

Secuencia volcánica de hasta 2.000 m, ubicada al sur del Batolito Pedernales, en el sector centro-oeste de la cuenca.

- Formación Agua Helada (Kah) (Cretácico Inferior)

Secuencia bien estratificada de areniscas cuarzo-feldespáticas y limonitas, ubicada al poniente del Salar de Pedernales, al nor-oeste de la cuenca.

- Estratos El Leoncito (Kle) (Cretácico Superior)

Secuencia de hasta 500 m de conglomerados, que aflora en el centro de la cuenca.

- Estratos de La Vertiente (EOlv) (Eoceno-Oligoceno, 25 M.a.)

Secuencia volcánica ubicada en el sector sur de la cuenca.

- Estratos de Río Juncalito (TOMrj) (26-21 M.a.)

Secuencia volcano-sedimentaria que aflora en el sector centro de la cuenca, donde abarca una gran área.

- Lavas y Domos de Cerro La Ola- Carachapampa-Los Arroyos (TOMdo) (26-23 M.a.)

Remanentes profundamente erodados de aparatos volcánicos centrales y domos extrusivos de 3-6 km de diámetro, que ocurren aislados en la zona centro-sur de la cuenca, al este del complejo de Cerros Bravos y Esperanza.

- Volcanes Cerros Bravos y Cerros de la Sal (TOMv) (26-22 M.a.)

Complejo que intruye dos estratovolcanes coalescentes, profundamente erodados, de 25 km de diámetro (Cerros Bravo- Barros Negros), con una altura base entre 1.100 y 1.500 m. Se emplaza al suroeste de la cuenca.

- Estratos de Claudio Gay (OMcg) (Oligoceno Superior- Mioceno Inferior, ca. 26-21 M.a.)

Secuencia formada por dos asociaciones de facies principales: una volcanoclástica y otra lávica, de al menos 500 m de espesor. Se ubican en el sector sur de la cuenca.

- Estrato de Llano Los Gases Blancos (Ogb) (Oligoceno)

Secuencia volcánica y sedimentaria, plegada, que forma la envolvente del anticlinal del cerro Punta Amarilla. Se encuentran en el sector centro-oriente de la cuenca.

- Complejo Volcánico Cerro Punta Amarilla-Pampa (OMpa) (25-22 M.a.)

Complejo volcánico erosionado, ubicado en el extremo sureste del Salar de Pedernales, en el centro de la cuenca.

- Ignimbrita La Ola (OMio) (ca. 22 M.a.)

Remanentes de un depósito de flujo piroclástico débilmente soldado, que se encuentra en el sector sur del Salar de Pedernales.

- Lavas y domos del Mioceno Inferior (Miv) (ca. 20-18 M.a.)

Secuencia de lavas andesíticas y domos riódacíticos. Corresponden a productos lávicos proximales dispuestos en forma subhorizontal o con ligera inclinación primaria. Afloran en la zona norte y sur de la cuenca.

- Estratos de Sierra Aliste (Misa) (Mioceno Inferior, ca. 21 M.a.)

Depósitos de bloques y ceniza de hasta 40 m de espesor, inmersos en una matriz mediana a débilmente soldada de fragmentos menores. Afloran en el centro de la cuenca.

- Estratos de Piedra Pómez (Mipp) (ca. 18 M.a.)

Depósitos de bloques y ceniza semi a bien consolidados. Presentan una potencia máxima de 150 m, en capas de 5 a 20 m de espesor. Afloran en el borde sur de la cuenca.

- Complejo Volcánico El Perro (Mip) (20-18?)

Ubicado al noreste del Salar de Pedernales, en el norte de la cuenca, incluye remanentes de un conjunto de domos y lavas-domos.

- Ignimbrita Vega Helada (Miivh)

Depósito de flujo piroclástico, que aflora en el borde suroriental del Salar de Pedernales y que se extiende hacia el este, ubicándose en el sector céntrico de la cuenca.

- Ignimbrita Juncalito (Miiij) (Mioceno inferior)

Toba riolítica no soldada a débilmente soldada. Está compuesta por al menos tres unidades de flujo, separadas por dos niveles de oleada piroclástica con laminación cruzada y suaves dunas. Cubre a la ignimbrita Vega Helada. Se encuentran en el extremo sur-oeste de la cuenca.

- Ignimbrita Vega Helada (Miivh) (Mioceno inferior)

Toba soldada de vidrio y cristales, con bajo contenido de líticos y pómez, caracterizada por la presencia de un nivel vitrofídico negro cerca de la base. Sobreyace, comúnmente en concordancia, a la secuencia Sierra de Aliste y subyace a lavas de Mioceno medio y superior. Se encuentran en el centro de la cuenca.

- Secuencia Sierra de Aliste (Misa) (Mioceno inferior)

Secuencia volcánica y sedimentaria continental, constituida por una sucesión de bloques y cenizas, que localmente muestra una reducida intercalación sedimentaria de rocas clásticas y lacustres, en el techo de la secuencia. Sobreyace a la Formación Pantanoso y subyace a la ignimbrita Vega Helada y a las Gravas aterrazadas.

- Ignimbrita Los Terneros (Miilt) (Mioceno)

Depósito de flujo piroclástico pumíceo, ubicado al suroeste de la cuenca.

- Aparatos volcánicos centrales y campos de lavas (Mmv) (16-14 M.a.)

Centros volcánicos medianamente erodados, que ocurren en los alrededores del Salar de Pedernales –en el sector norte de la cuenca- y en la zona sur de la zona de estudio.

- Estratos de Río Lamas (Mmrl) (ca. 16 M.a.)

Depósitos de gravas fluviales y aluviales semiconsolidados, inmersos en una matriz arenosa. Aflora en la región sur de la cuenca.

- Ignimbrita Los Cristales (Mmilc) (16-15 M.a.)

Depósito de flujo piroclástico pumíceo, que aflora en el sector sur-poniente de la cuenca.

- Ignimbrita Inés Chica (Mmich) (17-16 M.a.)

Depósito de flujo piroclástico con espesores entre 5-15 m, que se encuentran al noroeste del Salar de Pedernales, al noroeste de la cuenca.

- Gravas de Atacama (Mga) (17-9 M.a.)

Gravas y arenas gruesas polimícticas, mal consolidadas, disectadas por el drenaje actual y depositadas en superficies peniplanizadas. Incluye intercalaciones ignimbríticas débilmente soldadas. Afloran en la zona sur-poniente de la zona de estudio.

- Complejos volcánicos y estratovolcanes del Mioceno inferior (Miv)

Corresponden a remanentes muy erosionados de conos de piroclastos y edificios volcánicos de composición predominantemente andesítico-basáltica y un domo de composición dacítica. Se encuentra en el sector noroeste de la cuenca.

- Complejos volcánicos y estratovolcanes del Mioceno medio (Mmv)

Extenso conjunto de grandes edificios volcánicos profundamente erodados, pequeños edificios medianamente preservados, domos y lavas aisladas. Corresponde a edificios con escasos remanentes de rasgos originales, de perfil bajo, superficies redondeadas y cráteres comúnmente no identificables. Subyacen a los Complejos volcánicos y estratovolcanes del Mioceno superior y a las Gravas aterrazadas. Sobreyacen a la secuencia Sierra de Aliste y a la ignimbrita Vega Helada.

- Complejos Volcánicos del Mioceno Superior (Msv) (8-5 M.a.)

Conjunto de volcanes de pequeño tamaño y extensión reducida. Corresponden a centros erodados, donde las coladas no preservan sus rasgos originales y el domo ha perdido su carcasa brechosa original. Se encuentran en los sectores norte y sur de la cuenca.

- Gravas de la Quebrada Manantiales (Msqm) (Mioceno Superior)

Depósitos esencialmente aluviales constituidos por gravas, arena y limo, polimícticos, mal seleccionados. Presenta intercalación de la ignimbrita San Andrés (Msisa). Se disponen al sur de la cuenca.

- Ignimbrita Wheelwright (Msiw) (Mioceno Superior, ca. 6 M.a.)

Depósito de flujo piroclástico dacítico, corresponde a una toba consolidada a semiconsolidada. Se reconoce un afloramiento de alta cobertura en el sector sur-oriente de la cuenca.

- Ignimbrita San Andrés (Msisa) (Mioceno Superior, 10-9 M.a.)

Depósito de flujo piroclástico correspondiente a una toba riolítica cinerítica de color rosado y blanco. A lo largo de la cuenca, se encuentran variados afloramientos. El mayor de ellos ocurre en el borde centro-este de la zona de estudio.

- Ignimbrita Laguna Verde (Pliilv) (Plioceno inferior)

Extensa toba riolítica fuerte a medianamente soldada formada por, al menos, cuatro unidades de flujo con intercalaciones de niveles de oleada piroclástica y algunos niveles más soldados. Ocurre como afloramientos discretos en pequeños mantos de reducida extensión y espesor (< 10 m). La fuente de

origen de esta ignimbrita se encuentra probablemente asociada a la caldera Agua Amarga en Argentina. Se encuentra en el sector oeste de la cuenca.

- Ignimbrita Laguna Verde (Pliiv) (4-3 M.a.)

Remanentes aislados del depósito de un flujo piroclástico cinerítico que cubre a depósitos aluviales antiguos en el llano Los Arroyos, entre los salares Pedernales y Maricunga. Se encuentran en la zona centro-sur de la cuenca.

- Complejos Volcánicos del Plioceno inferior (Piv) (5-3 M.a.)

Conjunto de volcanes compuestos por grandes edificios aislados mixtos y por afloramientos distales de coladas que constituyen el basamento o facie inicial de edificios del Plioceno Superior y del Cuaternario. La composición de las lavas es más heterogénea que las del Plioceno Superior e incluye dacitas y andesitas. Se ubican en el límite sur-oriente de la cuenca.

- Complejos Volcánicos del Plioceno Superior (Psv) (ca. 3-2 M.a.)

Conjunto de volcanes constituido por edificios aislados mixtos y por afloramientos distales de coladas que constituyen el basamento o facie inicial de los macizos del Cuaternario. Se concentra en la zona sur-oriente de la cuenca.

- Ignimbrita Chato Aislado (Qich) (Pleistoceno Inferior)

Toba dacítica de pequeño volumen, de ceniza, pómez, líticos y cristales, no soldada. Se encuentra sólo un afloramiento en el sector céntrico de la cuenca.

#### 4.2.3 Rocas intrusivas

- Pórfidos riolíticos del Paleozoico Superior (Pzsp)

Cuerpos intrusivos porfídicos de pequeñas dimensiones que intruyen volcanitas de la Formación Pantanoso (Pep), en el sector centro-oriente de la cuenca.

- Batolito Pedernales (Pzgp) (Pérmico; 300-260 Ma)

Complejo intrusivo multiplutónico que se extiende al suroeste del Salar de Pedernales, desde la sierra El Bórax hasta las nacientes de la quebrada Pastos Largos, en el sector centro-oeste. Intruye a la Formación Chinchas y, en su borde occidental, a la Formación La Tabla.

- Intrusivos Cretácico Superior (Ks) (90-66 M.a.)

Conjunto de intrusivos hipabisales que afloran en el sector centro y centro-oeste de la cuenca.

- Intrusivos Cretácico Superior- Paleoceno (KT) (66-64 M.a.)

Conjuntos de intrusivos que ocurren bajo la cubierta de rocas volcánicas de Oligoceno-Mioceno en el borde suroccidental de la cuenca.

- Intrusivos hipabisales de piroxeno (TPpdi) (65-59? M.a.)

Enjambres de diques de orientación, nor-noreste, y 'sills' emplazados en los Estratos El Leoncito y Formación Quebrada Monardes en el sector centro de la cuenca.

- Pórfidos dioríticos y diques andesíticos de piroxeno (TPdi)

Stocks, diques y filones que se encuentran al centro de la zona de estudio.

- Intrusivos hipoabisales (TEp) (46-35 M.a.)

Intrusivos menores que se concentran en la zona sur-poniente de la cuenca.

- Pórfidos riodacíticos (TOird) (33-31 M.a.)

Intrusivos subvolcánicos emplazados en las secuencias mesozoicas, en parte como 'sills' y lacolitos (2-5 km<sup>2</sup>), a través de fallas inversas de alto ángulo, en el sector sur-oeste de la cuenca.

- Domos de Esperanza (TOMde) (24-22 M.a.)

Conformados por tres domos subcirculares riodacíticos de 4-6 km<sup>2</sup> de diámetro y sus productos piroclásticos asociados, ubicados en el flanco noreste, descubierto, del volcán Cerros Bravos, al sureste de la cuenca.

- Pórfidos dioríticos del Oligoceno (Opd)

Cuerpos intrusivos hipabisales que afloran en el centro de la cuenca, donde intruyen a areniscas y conglomerados rojos plegados de la Formación Quebrada Monares.

- Intrusivos hipabisales del Mioceno Medio (Mmh)

Pequeño afloramiento intrusivo ubicado en el sector sureste de la zona de estudio.



### 4.3 Geología estructural

El ciclo Tectónico Andino comienza en el Jurásico Inferior, cuando el movimiento de placas inactivo se reanuda con una zona de subducción el margen oeste de Gondwana, durante los comienzos del desmembramiento del megacontinente. La renovada actividad de subducción creó el arco magmático Andino, que continúa formándose casi ininterrumpidamente hasta el presente. Un importante rasgo de la orogénesis Andina es el desarrollo de grandes zonas de cizalla paralelas a la fosa. Dichas zonas de cizalla se desarrollaron a lo largo del eje de los sucesivos arcos magmáticos (Ej.: Zona de fallas de Atacama y Domeyko) y pueden ser trazadas por cientos de kilómetros a lo largo de las cadenas montañosas (Charrier et al., 2007).

La cuenca Salar de Pedernales se formó en el Cretácico superior (85 Ma) en posición de cuenca de antepaís sobre el basamento pre-Triásico y el sistema de rifts triásicos. El sistema de “Horsts y Grabens” está representado por una tectónica muy influenciada por el fallamiento del basamento. En este sentido, importantes fallas inversas de dirección N-NE / S-SO limitan el batolito de Sierra Castillo formando el “horst” de Sierra Castillo (Muller y Perelló, 1982) localizada al oeste de la cuenca de Pedernales. Su relleno incluye tres rellenos de sedimentos continentales sin a post tectónicos separadas discordantemente.

Los afloramientos del zócalo constituyen altos topográficos, en forma de franjas elongadas paralelamente al eje de la cordillera, limitados por importantes fallas inversas que los sobre imponen a diversas unidades de la cobertura Mesozoica, localizada en áreas topográficamente deprimidas. El fallamiento inverso del basamento habría generado también la deformación y fallamiento inverso en la cobertura Mesozoica, este evento fue datado en el Cretácico Superior. Según Muller y Perelló (1982) la deformación habría sido tan intensa que se produjo un despegue de la base de la cobertura respecto al basamento, y en quebrada Doña Inés -al norte del Salar de Pedernales-, puede observarse la presencia de estructuras tales como sinclinales volcados, inversión de estratos, intenso fallamiento y plegamientos que afectan a la cobertura.

En la zona de estudio, cuyo dominio estructural principal es la cuenca hidrográfica Salar de Pedernales, también se encuentran los dominios de las cuencas hidrográficas La Laguna y Quebrada Maranceles, ambos situados al noreste del salar. En los tres dominios se pueden observar principalmente lineamientos y fallas inversas de dirección norte-sur, noroeste-sureste y noreste-suroeste.

A continuación se muestran dos cortes Geológicos de la zona Quebrada Doña Inés-Salar de Pedernales y Llano de Pedernales Sur-La Ola (Figura 4-3).

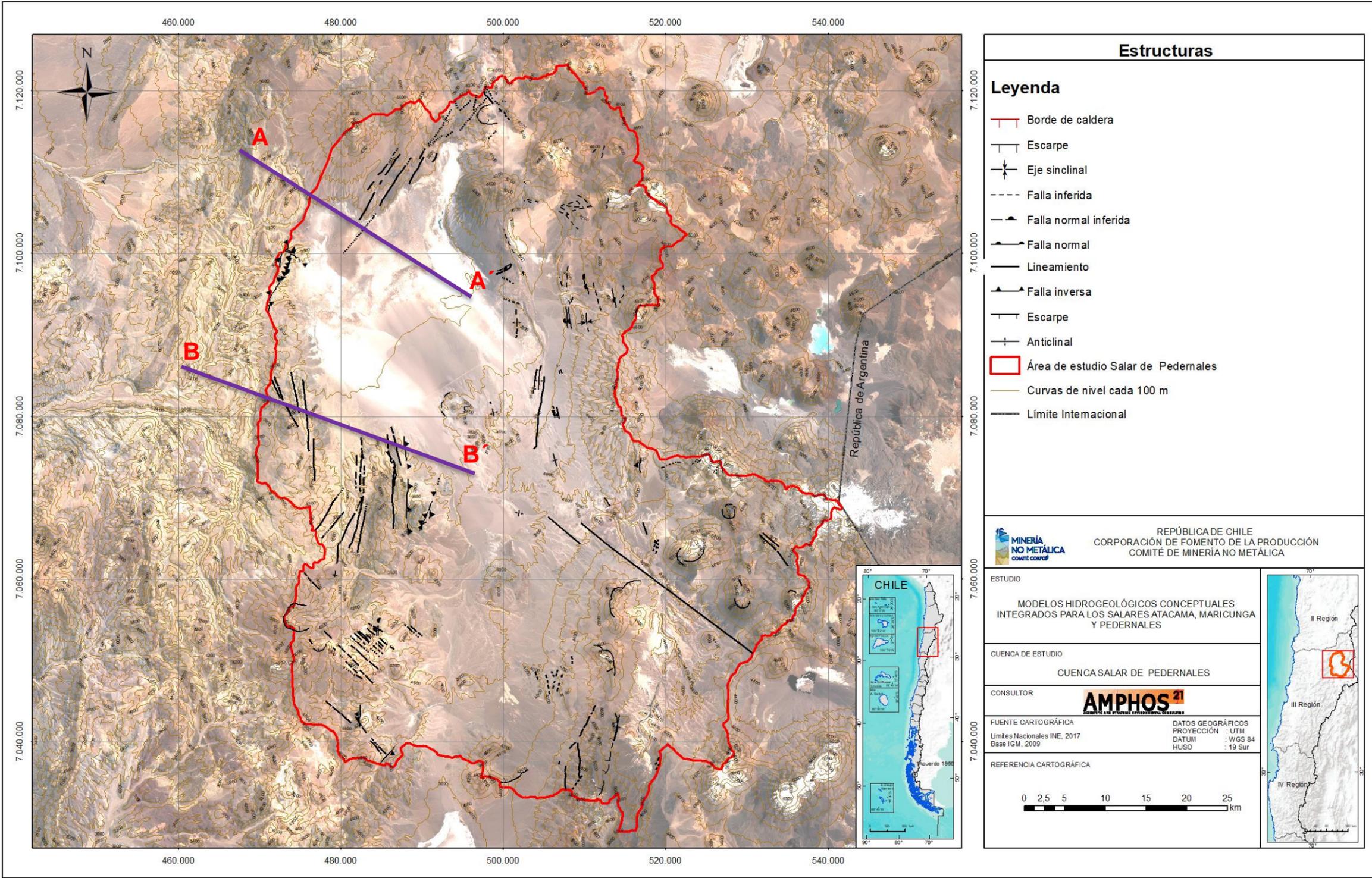
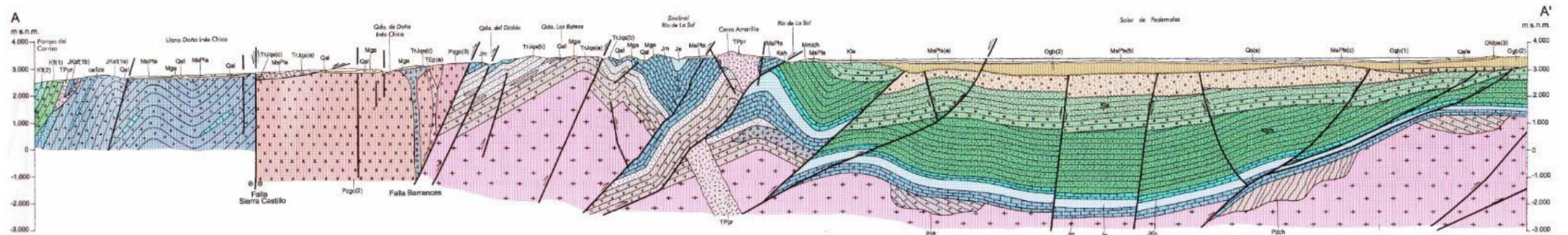


Figura 4-3. Mapa de estructura de la cuenca Salar de Pedernales.  
Fuente: elaboración propia.

Quebrada Doña Inés-Salar de Pedernales



Llano de pedernales Sur-La Ola

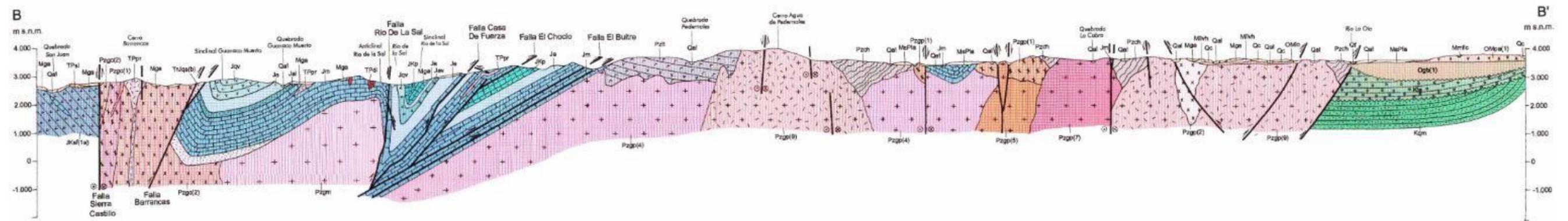


Figura 4-4. Cortes Geológicos esquemáticos A-A' y B-B' de la cuenca Salar de Pedernales.

Fuente: Sernageomin, 1999. Hoja Potrerillos.

## 4.4 Columnas estratigráficas representativas

Para la descripción de la estratigrafía de la cuenca de Pedernales, se han utilizado una parte de las columnas litoestratigráficas disponibles, agrupadas según su ubicación. Se han dividido en 5 sectores en la zona de estudio ( Figura 4-5).

- **Sector 1: Salar de Pedernales**

La estratigrafía de los pozos de esta zona indica una costra salina compuesta, principalmente de halita, con algunos niveles de yeso e intercalación de arcillas poco abundantes. La potencia de la costra salina es variable, siendo en promedio de 30 m en los bordes del salar (pozo S-5) y superando los 150 m hacia el centro de éste (pozo SPD-1). Bajo este nivel se encuentra una capa salina arenosa de 50 m, y potentes paquetes de grava alternados con niveles de arenas gruesas y medias, y algunas intercalaciones de sedimentos finos. La profundidad de estos niveles alcanza como mínimo los 327 m, según el alcance del registro proporcionado por el pozo SPD-1 (

Figura 4-7).

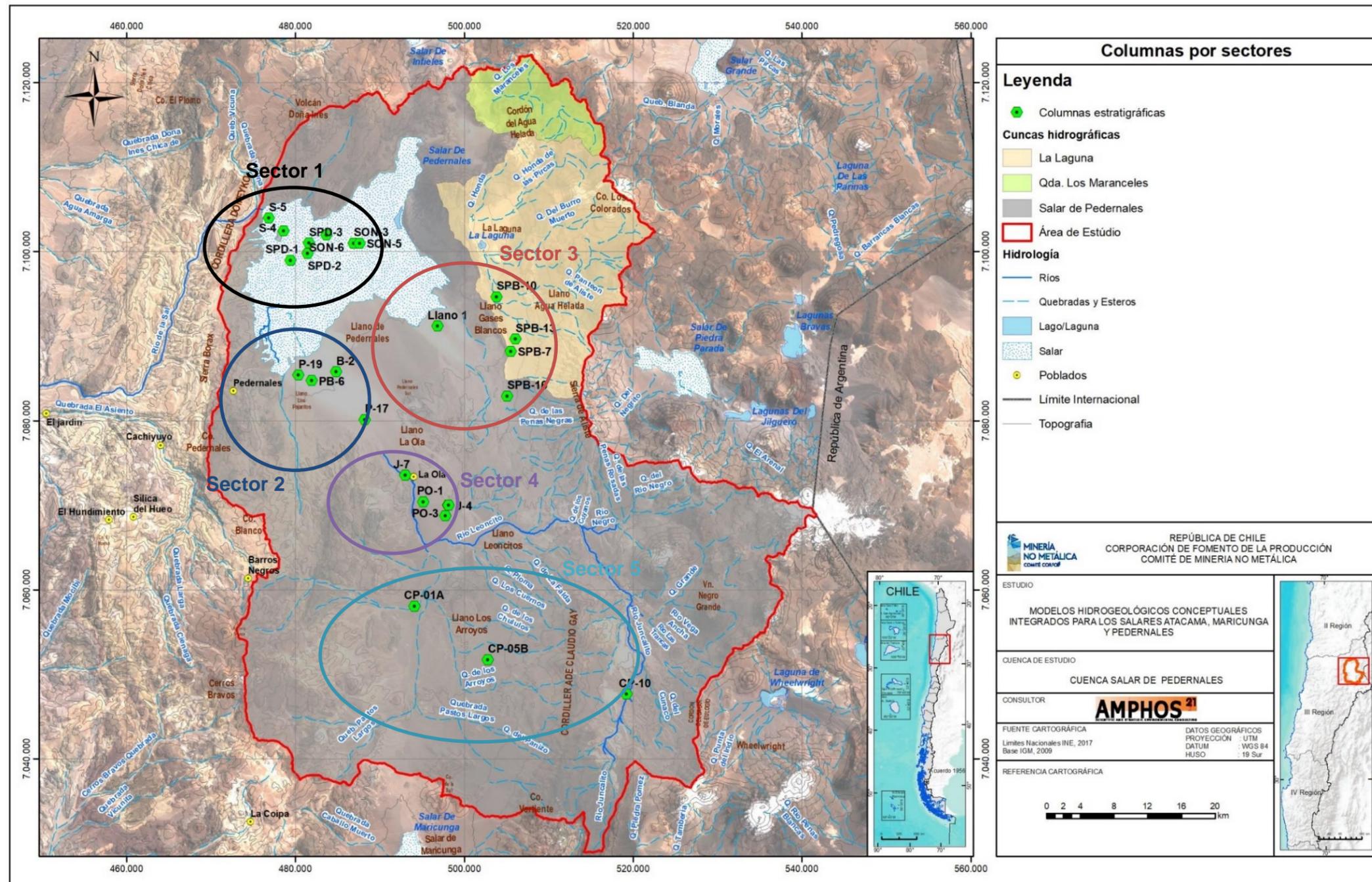


Figura 4-5. Distribución de las columnas litológicas usadas en la descripción estratigráfica divididas en sectores.

Fuente: elaboración propia.

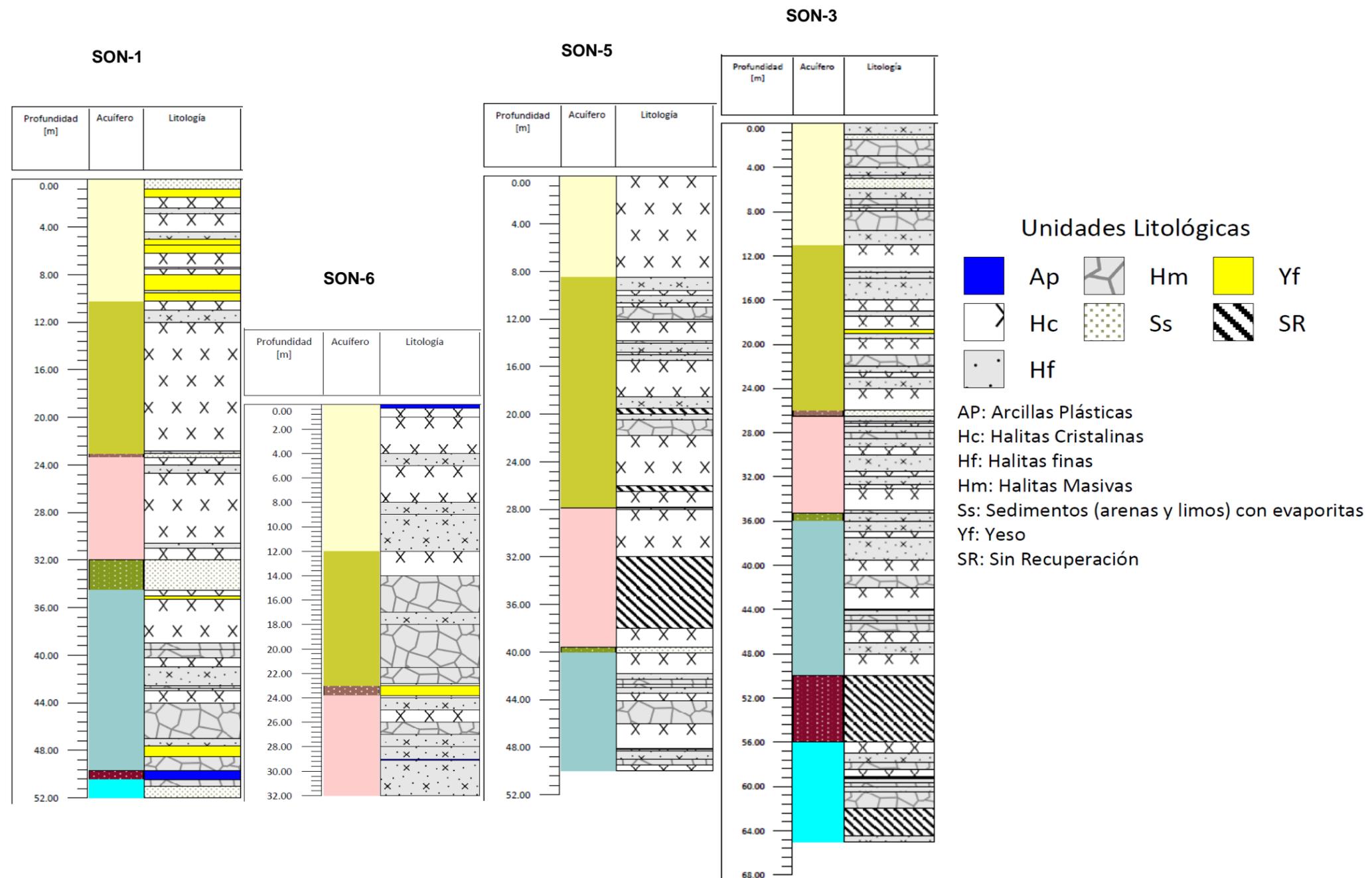


Figura 4-6. Columnas estratigráficas SON-1, 3, 5 y 6.

Fuente: elaboración propia.

# Leyenda

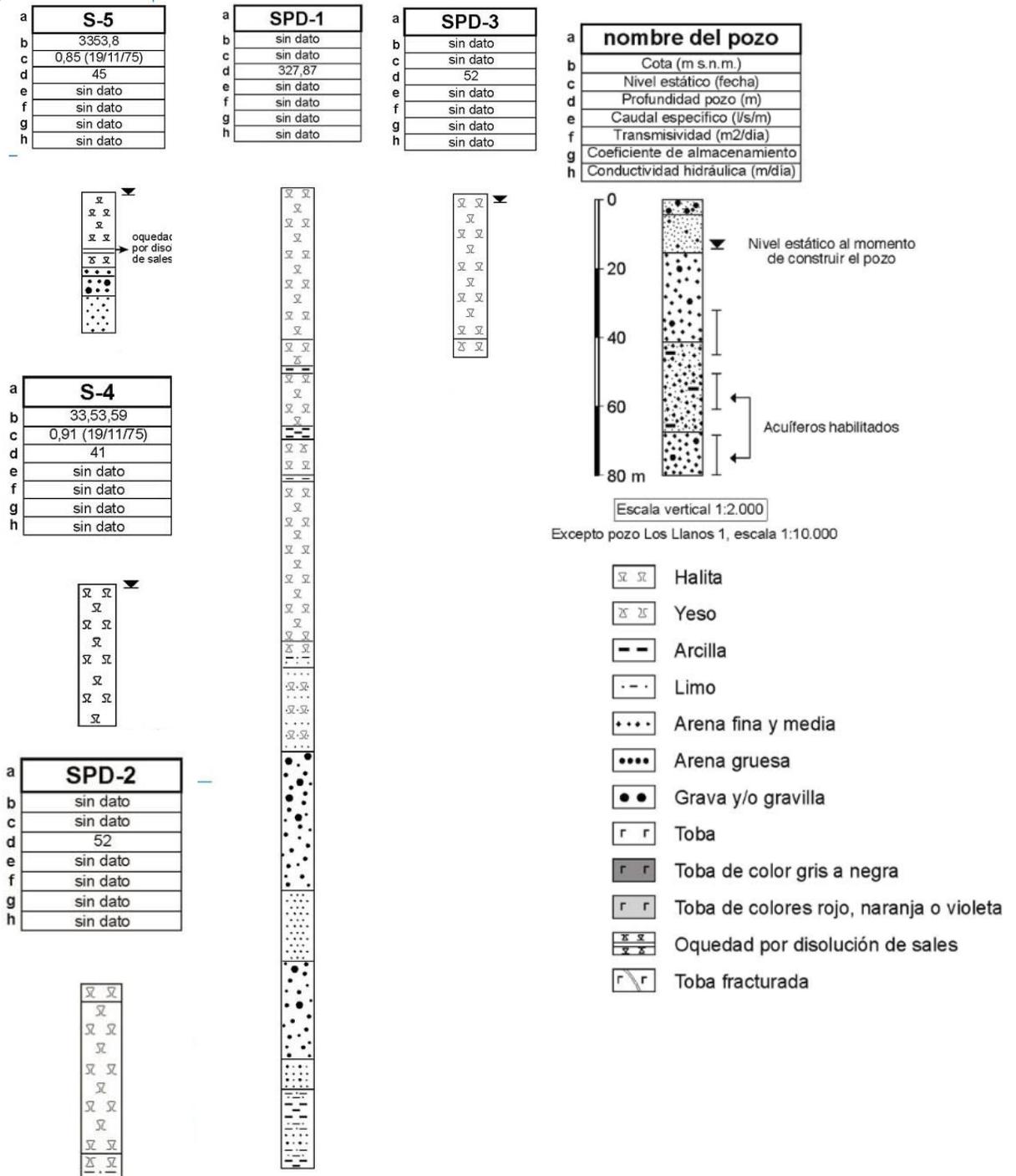


Figura 4-7. Columnas estratigráficas S-4, S-5, SPD-1, 2 y 3.

Fuente: elaboración propia

- **Sector 2: Llano de Pedernales Sur – Llano los Pajaritos**

La estratigrafía indica una primera secuencia de depósitos aluviales compuesta por gravas, arenas, limos y arcillas. Estos sedimentos tienen al menos 90 m de potencia y en ellos se puede observar una diferencia granulométrica, posiblemente, debido a la presencia de antiguos cursos fluviales de alta energía procedentes de las quebradas, las cuales han dado lugar a la presencia de arenas medias a gruesas y gravas. En las periferias del Llano Pedernales Sur y los Pajaritos se encuentran conos aluviales de baja pendiente formados principalmente por arena fina a muy fina, estratificada con sedimentos de limo y arcilla (Figura 4-8).

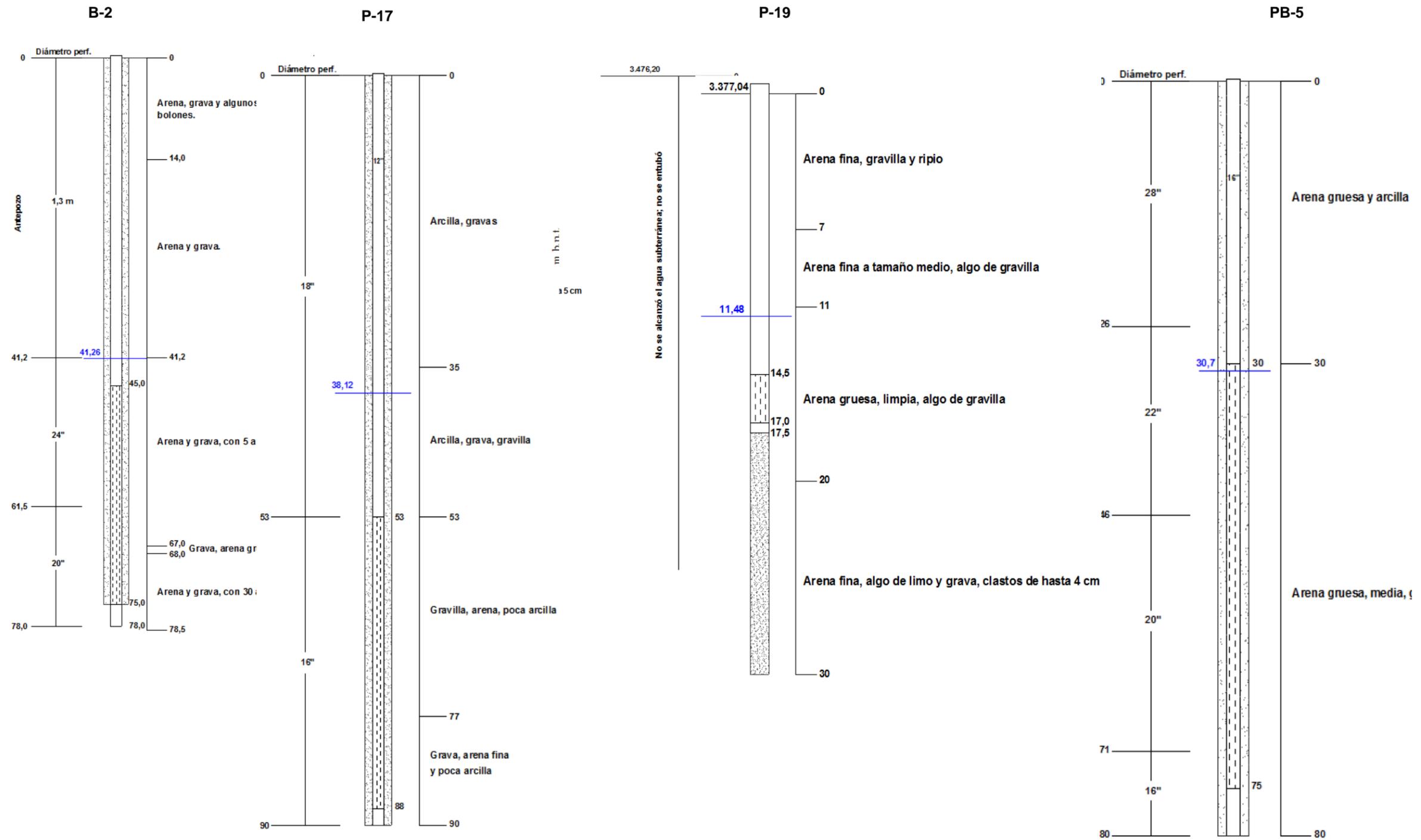


Figura 4-8. Columnas estratigráficas B-2, P-15 y P-17.

Fuente: elaboración propia.

- **Sector 3: La Laguna - Loma y llano de los Gases Blancos**

En el llano de los Gases Blancos, se observan secuencias estratificadas de tobas con niveles de arena media a gruesa y grava hasta los 300 m. En el pozo Los Llanos 1, que alcanza 2.593 m de profundidad, se identifica un nivel de arcillas entre los 200 y 300 m seguido por tobas hasta poco más de los 500 m. Le subyace una secuencia de areniscas, arcillolitas calcáreas y conglomerados hasta los 1200 m. Los siguientes metros consisten en secuencias de sedimentos finos compuestos por limolitas, arcillolitas, areniscas y calizas hasta casi los 2300 m de profundidad con alguna intercalación de depósitos volcánicos y una intrusión dacítica. En adelante distingue un nivel de tobas cineríticas y en la base del pozo brechas tobáceas silificadas (Figura 4-9).

En el sector La Laguna se puede observar una secuencia de relleno sedimentario no consolidado de al menos 300m de profundidad. Este relleno está compuesto por gravas, gravillas y arenas predominantemente de grano grueso (Figura 4-10, Figura 4-11 y Figura 4-12). En menor proporción, alternan niveles decamétricos de tobas cristalinas a más de 200 m de profundidad.

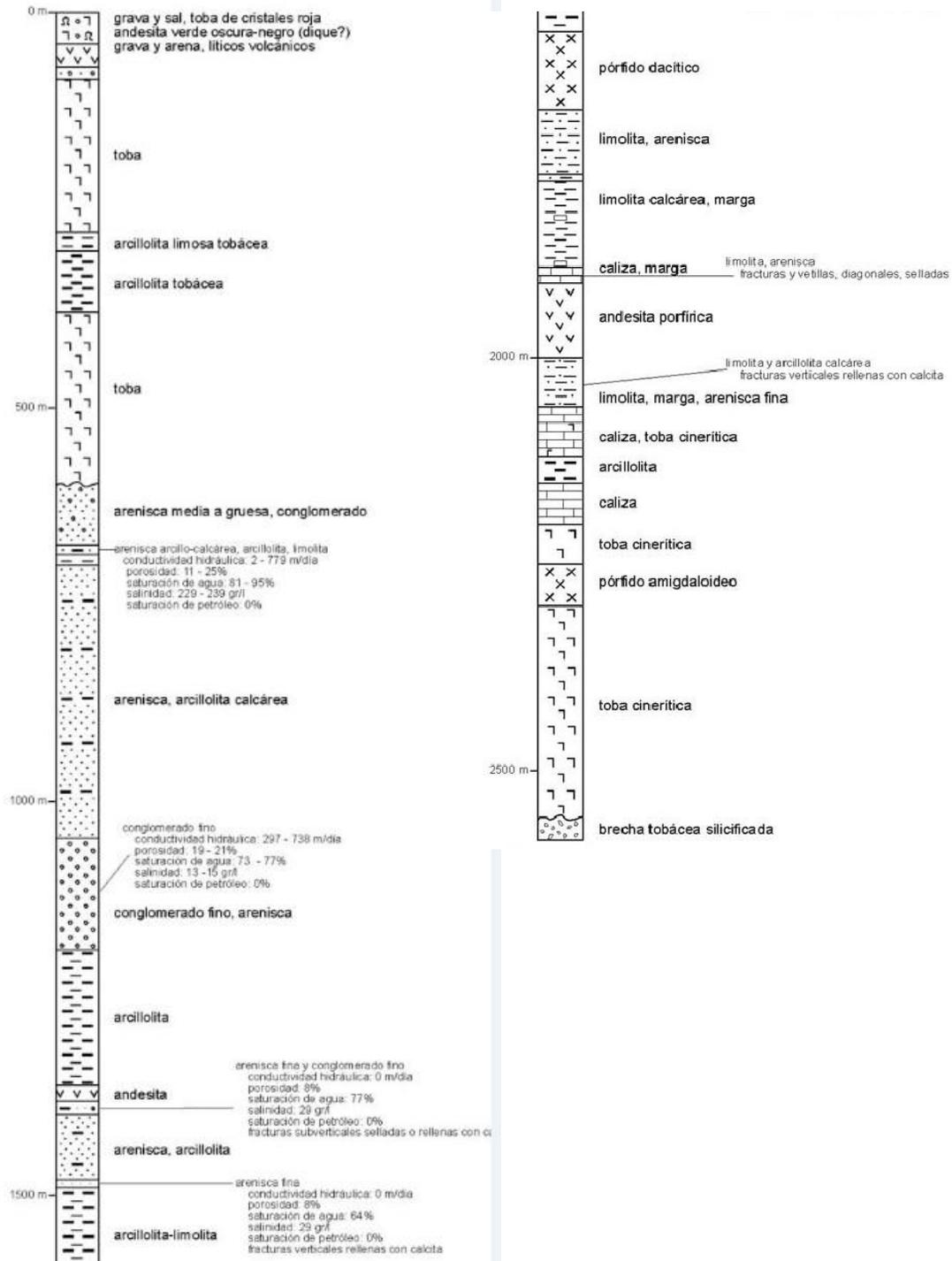


Figura 4-9. Sondaje Los Llanos 1 (EXA). 2593 m.

Fuente: elaboración propia.

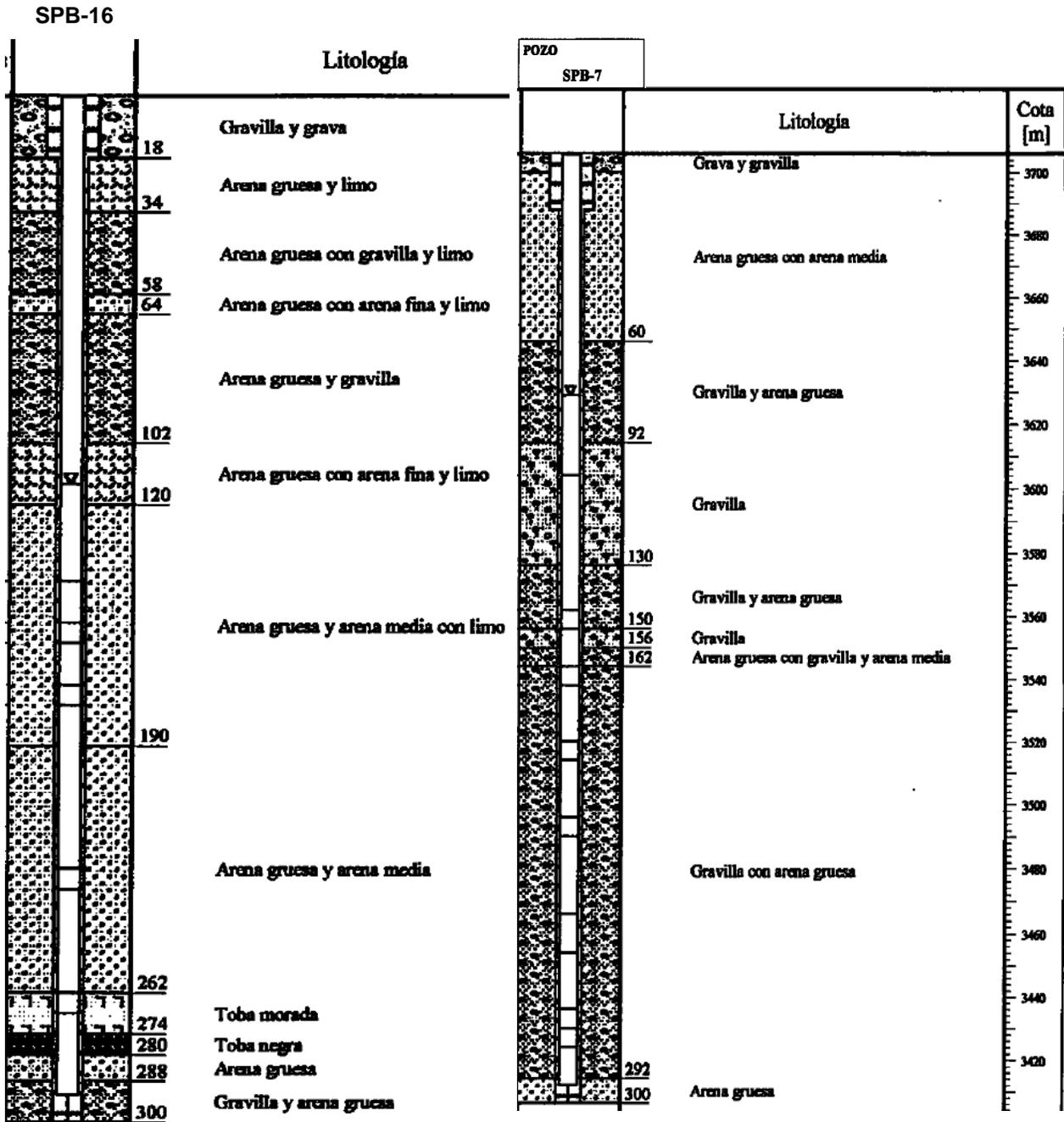


Figura 4-10. Columnas litológicas SPB-16 y SPB-7.

Fuente: elaboración propia.

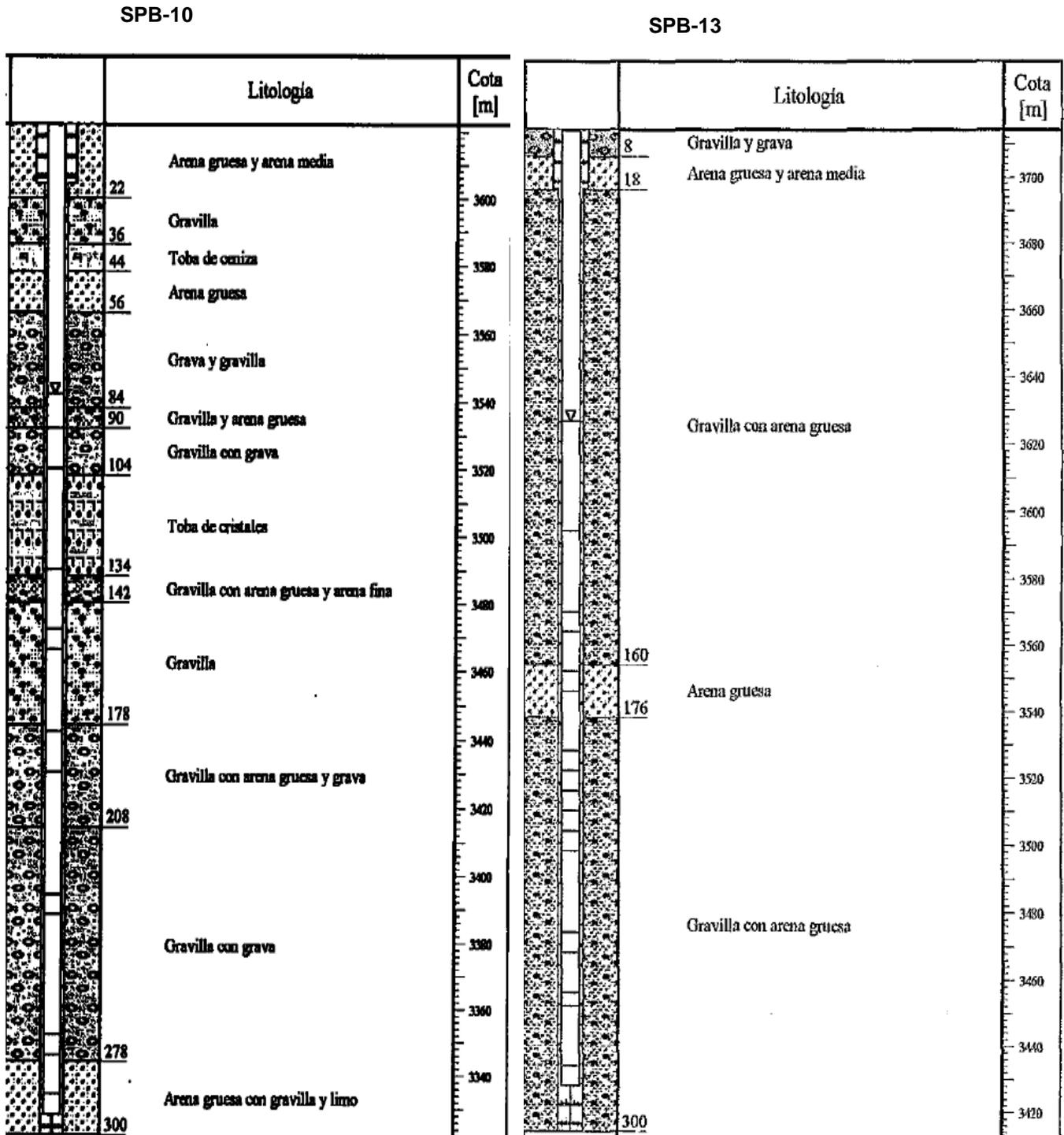


Figura 4-11. Columnas litológicas SPB-10 y SPB-13.

Fuente: elaboración propia.

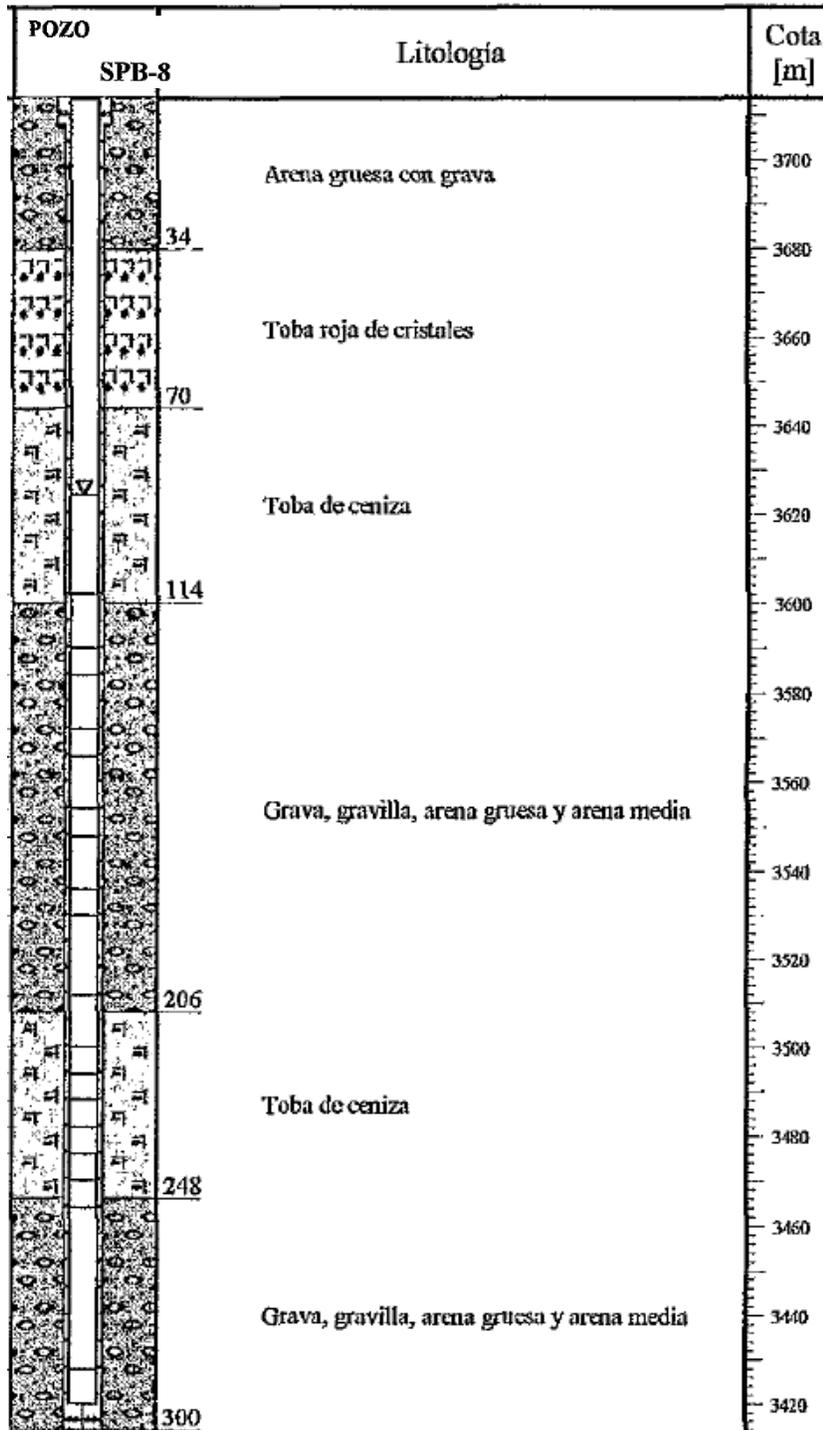


Figura 4-12. Columna litológica SPB-8.

Fuente: elaboración propia.

- **Sector 4: Llano La Ola y Juncalito**

Los sondeos ubicados en las proximidades del embalse La Ola y el Llano Juncalito, indican una unidad superficial de arena media a gruesa y gravas finas a gruesas con estratos de limo y arcilla intercalados. Esta unidad no consolidada superior varía de potencia de 15 m a 30 m en los pozos J-3 y J-4 (Figura 4-14) sin embargo, puede llegar a más potencia, al menos 70 m en el sondeo J-7 (Figura 4-13). Bajo esta unidad, suelen encontrarse depósitos volcánicos como toba, riolita e ignimbrita de 200 m de potencia máxima como puede observarse en el sondeo J-4 (Figura 4-14). Esta roca consolidada representaría el basamento rocoso.

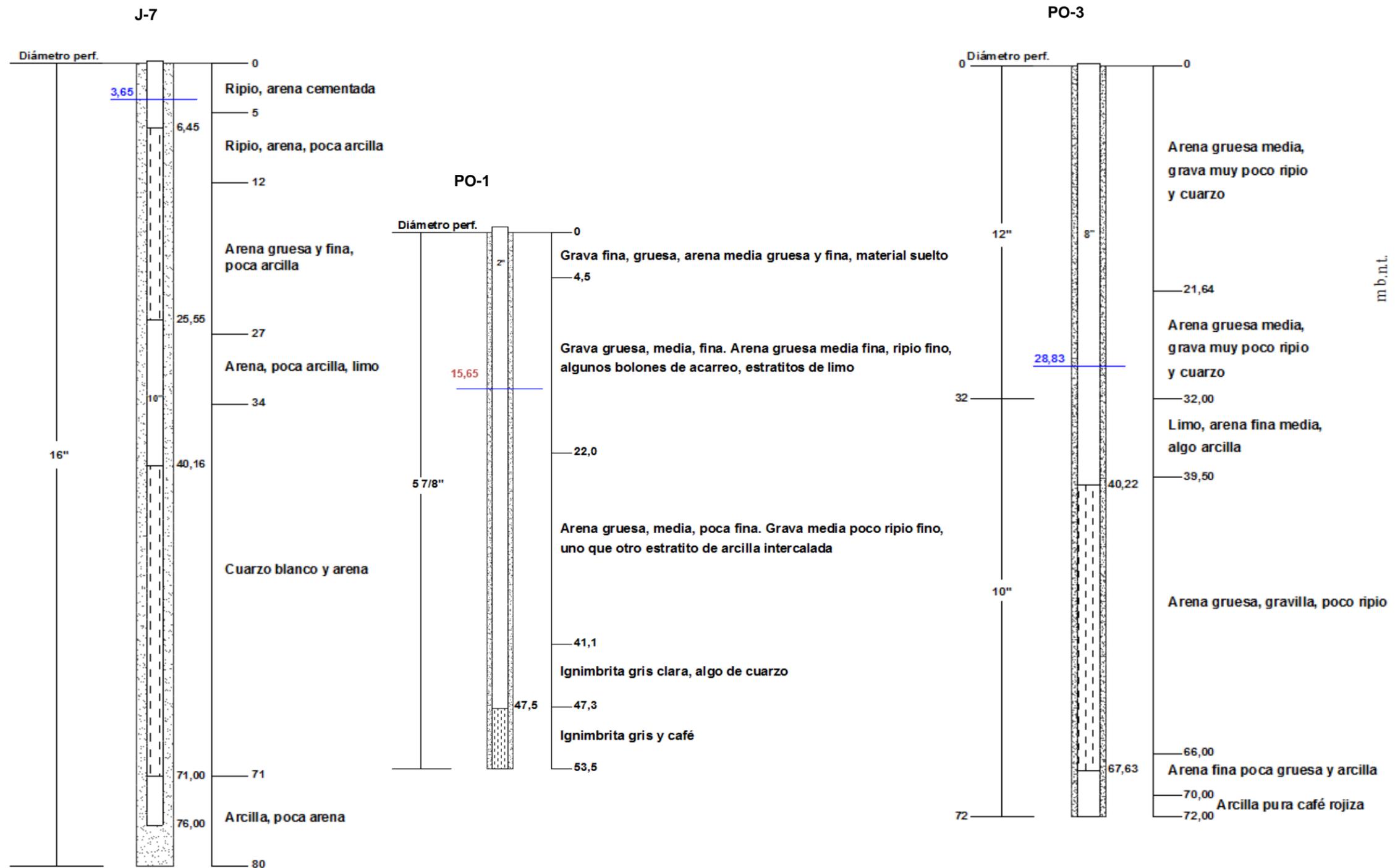


Figura 4-13: Columnas litológicas J-7, PO-1 y PO-3.

Fuente: elaboración propia.

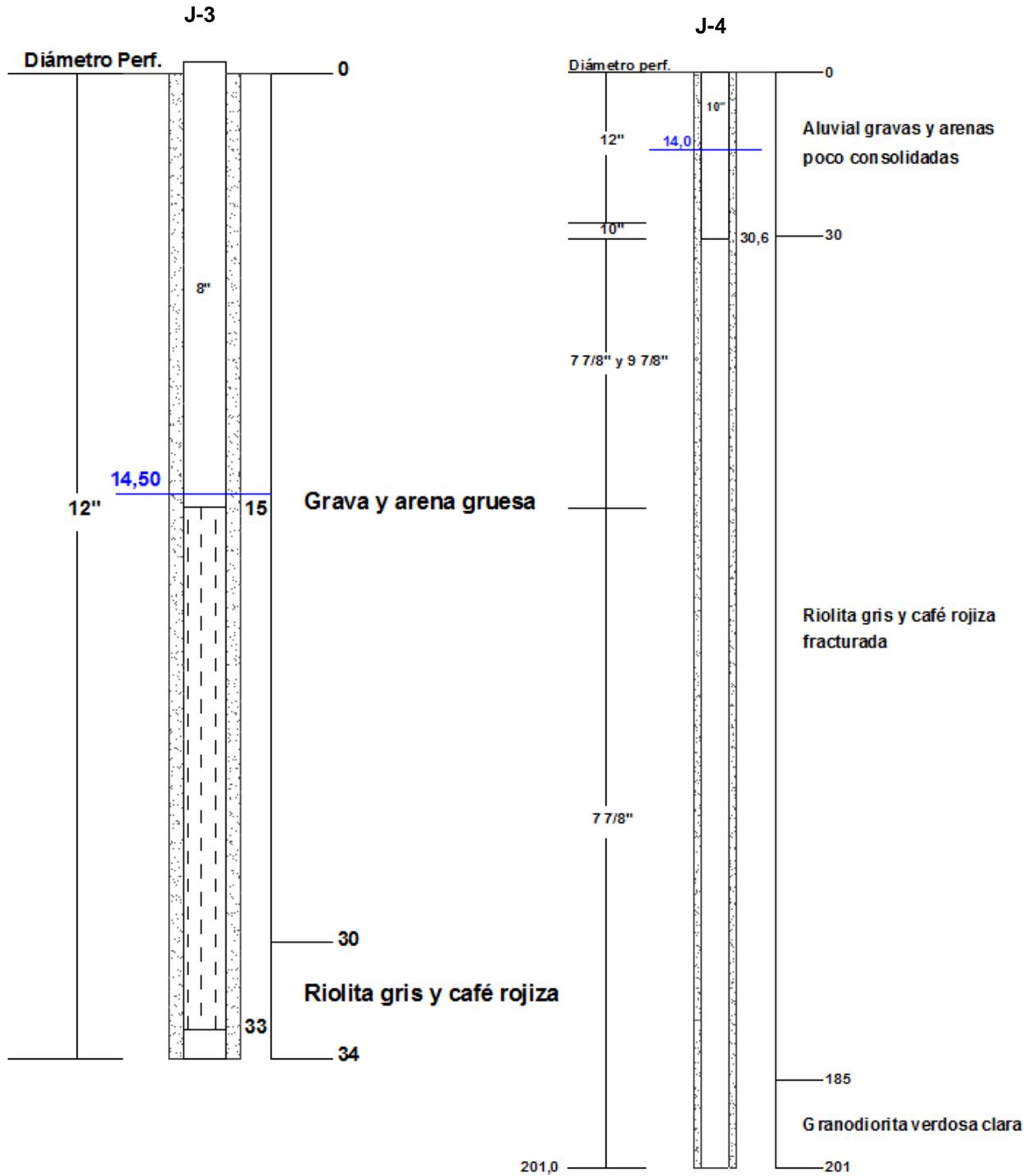


Figura 4-14: Columnas litológicas J-3 y J-4.

Fuente: elaboración propia.

- **Sector 5: Llano Los Arroyos**

En la parte meridional de la zona de estudio –Llano de Los Arroyos- se observa como a grandes rasgos el espesor de la unidad no consolidada disminuye, puede observarse en las columnas litológicas de los pozos CP-05B y CP-01A (Figura 4-15 y

Figura 4-16) dónde su espesor varía de 30 a 60 m respectivamente. En el suroeste de la zona el espesor de los materiales no consolidados disminuye todavía más, con espesores de 6 m en la columna del pozo CP -10 (Figura 4-15). Estos materiales están formados por depósitos aluviales de gravas, bloques, arena y limo, pobremente a moderadamente compactados. Subyacente a esta unidad superficial, se encuentran.

Por otra parte, la roca consolidada fracturada predomina en el sector sureste respecto a los materiales no consolidados (Figura 4-15 y

Figura 4-16). Estos materiales tienen potencias de al menos 200 m y están representados por tobas riolíticas, depósitos de flujo piroclástico y depósitos consolidados de gravas, arenas y conglomerados.

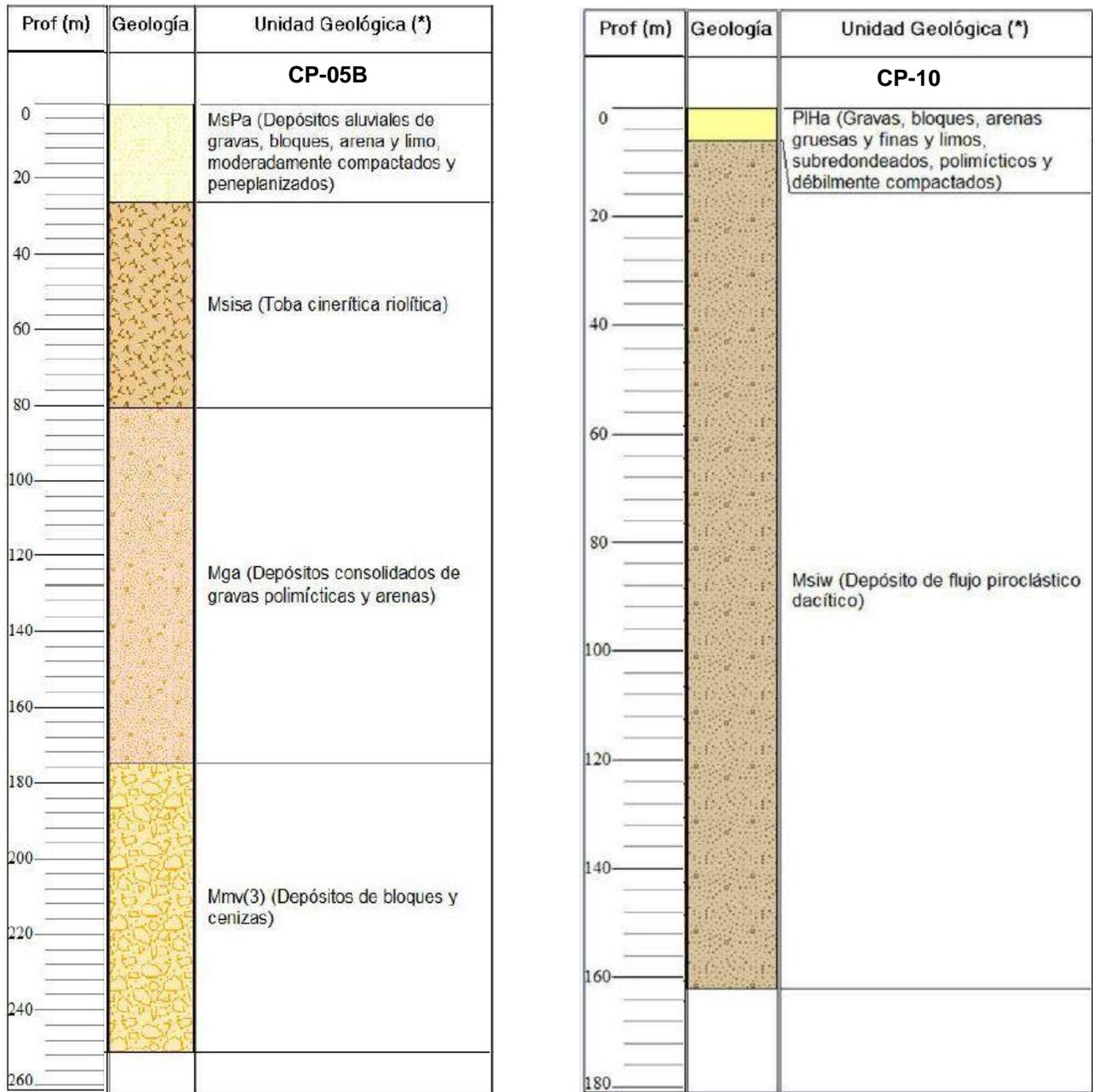


Figura 4-15. Columnas litológicas de los pozos CP-05B y CP-10.

Fuente: elaboración propia.

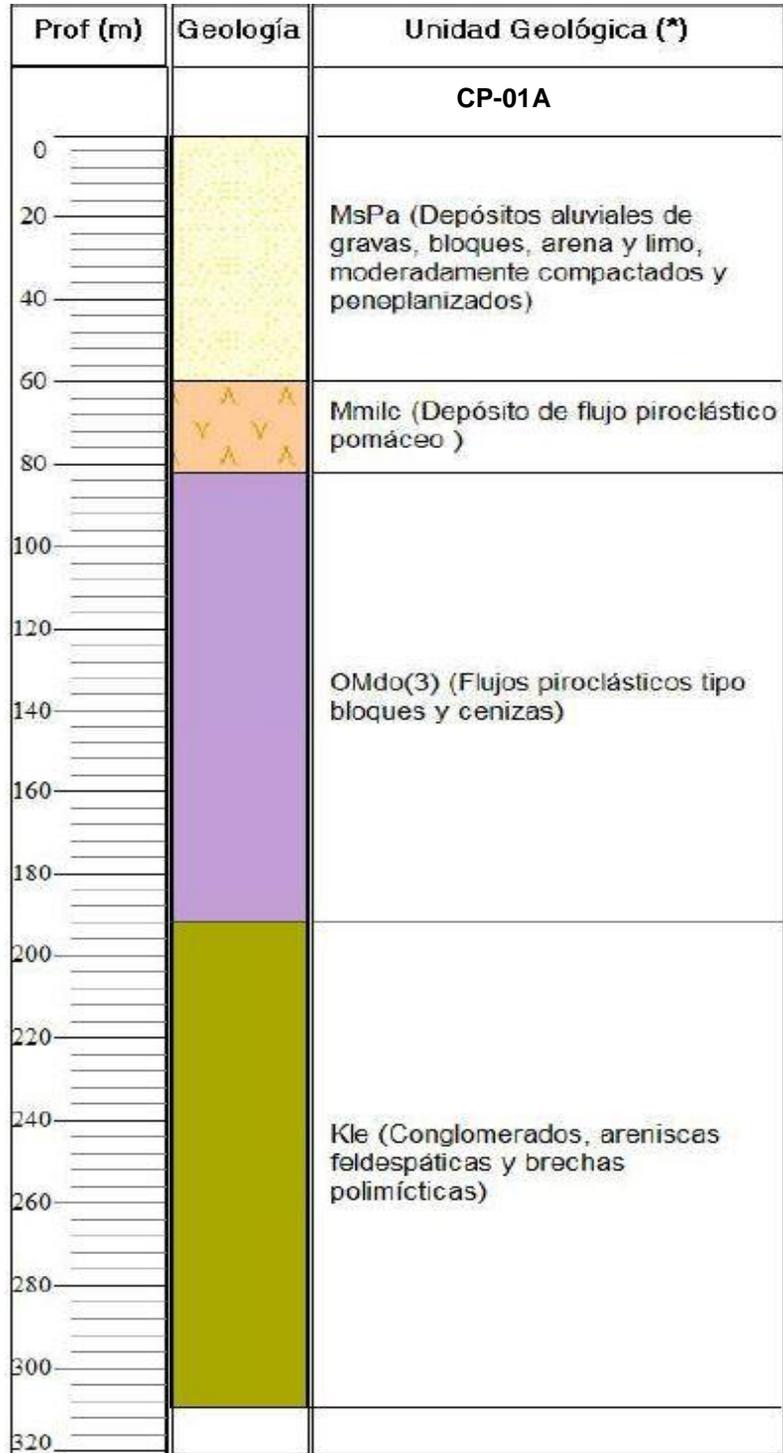


Figura 4-16. Columna litológica del pozo CP-01A.

Fuente: elaboración propia.

## 5. Caracterización hidrogeológica

En el presente capítulo se detallan las características hidrogeológicas de la cuenca en estudio a partir de parámetros hidráulicos de antecedentes, descripción de las unidades hidrogeológicas e identificación de acuíferos.

### 5.1 Parámetros hidráulicos

Con la finalidad de poder caracterizar las Unidades Hidrogeológicas se utilizan las constantes elásticas, que son una medida de su potencialidad, y que vienen definidas por la transmisividad y el coeficiente de almacenamiento.

#### 5.1.1 Permeabilidad y Transmisividad

La transmisividad (T) se refiere a la facilidad del acuífero para transmitir agua a través de su espesor saturado (b), y está directamente relacionada con la conductividad hidráulica (K), que es la facilidad de un fluido para moverse a través de los espacios interconectados de los materiales, y depende tanto del fluido como de los medios que atraviesa. La Tabla 5-1 muestra valores de conductividad hidráulica teóricos que podrían ser característicos de las unidades hidrogeológicas de Struckmeier & Margat (1995) (capítulo 5.2) y la clasificación del tipo de acuífero según Custodio & Llamas (2001), en función de la permeabilidad.

K (m/día)	Calificación Permeabilidad	Unidad hidrogeológica	Calificación acuífero
$10^4$	Muy alta	UH-3	Acuíferos buenos a moderados
$10^3$		UH-3	
$10^2$		Alta	
	UH-1 y UH-3		
$10^1$	Media	UH-1 y UH-3	
		UH-1, UH-2, UH-4	
1	Baja	UH-2 y UH-4	
$10^{-1}$		UH-4	
$10^{-2}$		Muy baja	UH-4 y UH-5
	UH-5		
$10^{-3}$	Muy baja	UH-5	Acuíferos pobres
$10^{-4}$		UH- 5 y UH-6	
$10^{-5}$		UH-6	
$10^{-6}$		UH-6	

Tabla 5-1. Tabla de conductividad hidráulica y UH  
Fuente: Custodio & Llamas, 2001 y Struckmeier & Margat, 1995.

En la recopilación de antecedentes de parámetros hidráulicos, se ha realizado una revisión de datos procedentes de pruebas de bombeo preexistentes de los estudios de la DGA (2009), CPH (2004), expedientes de pozos de la DGA y el Apéndice V2 de la Adenda Complementaria de la DIA Proyecto Continuidad Operacional Salvador (Codelco, 2017).

En la Tabla 5-2 y Tabla 5-3 se presentan los valores de conductividad hidráulica y transmisividad depurados y revisados que se han obtenido de los antecedentes disponibles para la zona norte y la zona central-sur de la cuenca Salar de Pedernales. Además, también se indica la unidad geológica a la que pertenecen los parámetros hidráulicos.

Adicionalmente se ha realizado un mapa de permeabilidades (Figura 5-1), los valores están agrupados por rangos para observar la distribución de esta constante elástica a lo largo de la zona de estudio.

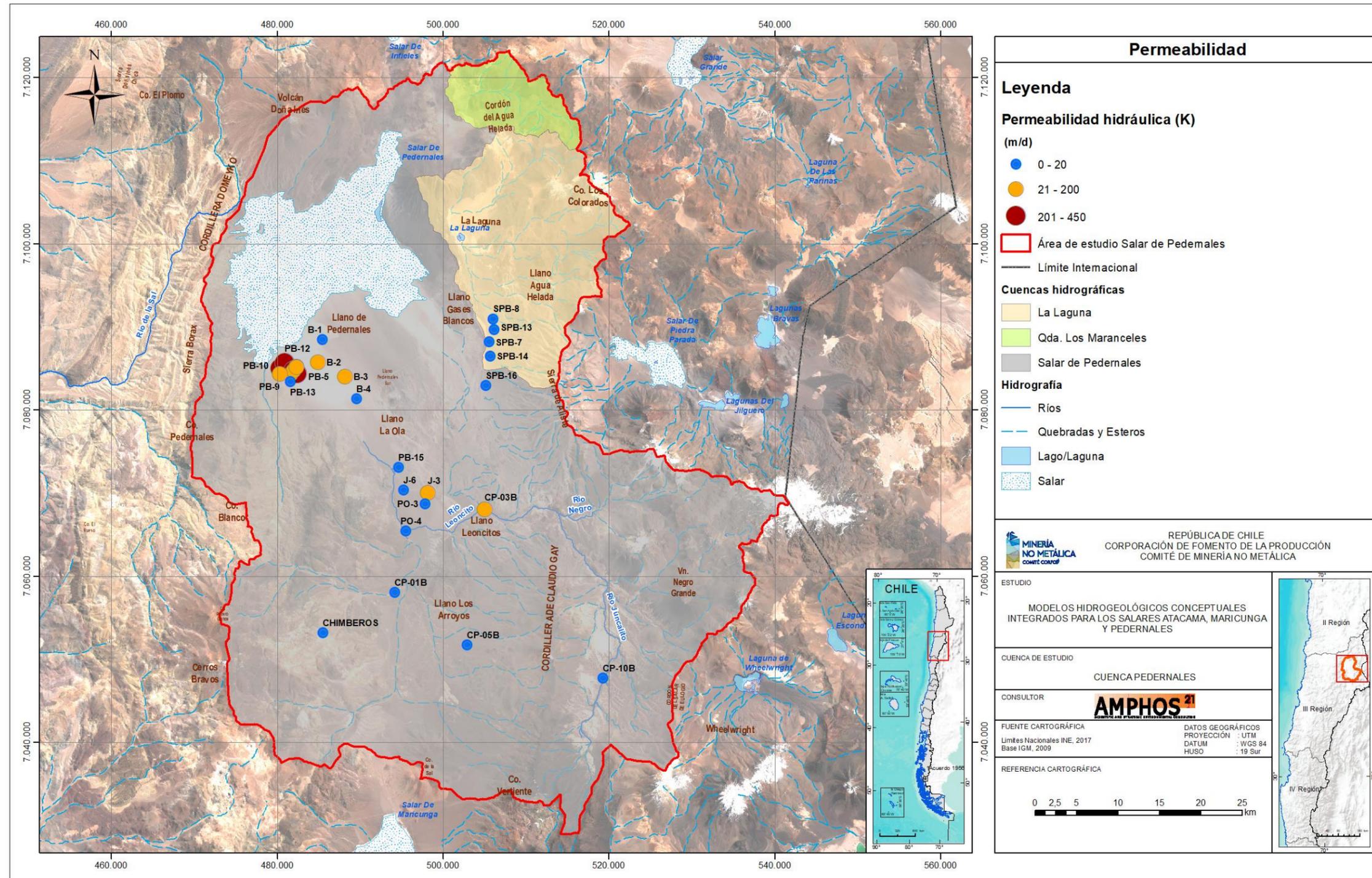


Figura 5-1. Mapa de distribución de los datos permeabilidad (m/d) más significativos.

Fuente: elaboración propia.

- Generalmente, los pozos conectados hidráulicamente con las unidades geológicas no consolidadas, tienen permeabilidades asociadas de rangos muy variables, van de 1 m/d a >200 m/d y se encuentran distribuidos a lo largo de Llano de Pedernales sur, límite meridional Pedernales-La Laguna y sur de La Ola. Por ejemplo, el pozo PB-10 da una permeabilidad superior a 200 m/d y el J-3 de 74 m/d.

ZONA NORTE							
Pozo	X (WGS84)	Y (WGS84)	Cota (msnm)	Profundidad (m)	Unidad Geológica (UG)	K (m/día)	T (m <sup>2</sup> /día)
B-1	485412	7088438	3393,6	80	Qala	15,2	366-838
B-2	4848401	7085753	3406,6	78	Qala	30-200	993-6020
B-3	488113	7084034	3451,9	129	Qala	24,6-100	1120-4320
B-4	489516	7081315	3482,5	120,5	Qala	1,4-3,4	70-544
B-6	481929	7084736	3389,3	71	Qala	193-262	8707-12445
B-7	482239	7085186	3387,9	85	Qala	85	4523-5000
PB-5	482368	7084379	3397,1	80	Qala	168-276	8395-12400
PB-6	481946	7084712	3390,5	71	Qala	103-223	5105-10040
PB-7	482251	7085150	3387,9	85	Qala	50,7-91,1	3530-6830
PB-8	481611	7084337	3389,7	68,5	Qala	177-197	3900-7980
PB-9	480293	7084339	3381,7	70	Qa	57-179	495-4980
PB-10	480320	7085031	3379,4	70	Qala	336-468	2630-11854
PB-12	480891	7085689	3373,4	52	Qala	320	11200
PB-13	481510	7083382	3403,0	90	Qa	8,04-22,2	482-1330
PB-15	494579	7073061	3572,1	113,5	Qala	0,18-0,87	18-87,2
SPB-1	504369	7078552	3800,1	274	Qala	-	16,0-40,1
SPB-7	505531	7088180	3706,6	294	Misa	0,75-1,25	225-437
SPB-8	505954	7090958	3713,9	294	TQac	3,17	1140-2110
SPB-10	503816	7094648	3622,8	294	MsPla	-	53,3-115
SPB-13	506114	7089630	3717,6	286	MsPla	5,54-8,11	1660-2430
SPB-14	505634	7086484	3736,2	294	TQac	8,6-23,6	1160-4720
SPB-16	505095	7082938	3755,2	292	TQac	2,48-10,7	745-2570

Tabla 5-2. Parámetros hidráulicos históricos zona norte de la cuenca en estudio.

Fuente: elaboración propia.

- El pozo CP-10B –situado en el Llano Leoncito-, aunque asociado a rocas fracturadas, muestra una permeabilidad media con un valor de 1,5 m/d (Tabla 5-3).
- En el Llano Los Arroyos, los pozos CP-01B y CP-05B tienen permeabilidades medias de 0,6 y 1,5 m/d respectivamente.

ZONA CENTRAL-SUR							
Pozo	X (WGS84)	Y (WGS84)	Cota (msnm)	Profundidad (m)	Unidad Geológica (UG)	K (m/día)	T (m <sup>2</sup> /día)
J-3	498113,8	7069987,4	3662,9	34	Qf	4,0-74,8	109-1460
J-6	495187,0	7070370,0	3645,0	36	Qa	4,0-28,0	204-990
PO-3	497811,1	7068716,4	3664,3	72	Qa	5,0-16,0	170-677
PO-4	495467,1	7065440,7	3677,0	90	Qa	2,0-14,0	80-680
CHIMBEROS	485491,0	7053134,0	3769,0	80	Qa	0,1-0,2	4,0-7,0
P-1 Anglo	492126,0	7057821,0	3660,0	100	Qa	*	116-2270
CP-01B	494127,0	7058047,0	3661,8	235	MsPa	0,4-1,7	64-439
CP-03B	504968,0	7068018,0	3806,2	144	Qa	80-165	4043-7667
CP-05B	502820,0	7051695,0	3907,3	247,56	MsPa	0,3-0,6	33,1-99,5
CP-10B	519201,0	7047715,0	4224,4	162,59	Msiw	0,7-1,5	102-454

Tabla 5-3. Parámetros hidráulicos históricos zona norte de la cuenca en estudio.

Fuente: elaboración propia.

### 5.1.2 Coeficiente de almacenamiento

El coeficiente de almacenamiento (S) se refiere a la capacidad de un acuífero para almacenar o liberar agua, y representa el volumen de agua por unidad de superficie que un elemento permeable absorbe o libera cuando hay un cambio unitario en la carga hidráulica. Los valores típicos de acuíferos libres oscilan entre 0,02 y 0,30, mientras que para acuíferos confinados, normalmente son inferiores a 0,005.

En la recopilación de los datos de coeficiente de almacenamiento (S) se ha realizado una revisión de datos procedentes de pruebas de bombeo preexistentes en el estudio de CPH (2004), Pontificia Universidad Católica de Chile (2008), expedientes de pozos de la DGA y el Apéndice V2 de la Adenda Complementaria de la DIA Proyecto Continuidad Operacional Salvador (Codelco, 2017).

Las perforaciones en las que se ha obtenido valores del coeficiente de almacenamiento son las siguientes (Tabla 5-4) y al igual que con la transmisividad y la conductividad hidráulica, se han agrupado en zona norte y central-sur.

Finalmente, cabe mencionar que existe muy poca información de coeficientes de almacenamiento en el mismo salar y sus inmediaciones.

<b>ZONA NORTE</b>						
<b>Pozo</b>	<b>X (WGS84)</b>	<b>Y (WGS84)</b>	<b>Cota (msnm)</b>	<b>Profundidad (m)</b>	<b>Unidad Geológica (UG)</b>	<b>S</b>
B-1	485411,8	7088438,5	3393,6	80	Qala	1,00E-01
B-2	484840,8	7085752,61	3406,6	78	Qala	4,59E-03 - 1,00E-01
B-4	489516,2	7081315,4	3482,5	120,5	Qala	9,0E-05 - 1,20E-03
PB-8	481611,0	7084337,0	3389,7	68,5	Qala	1,00E-01
PB-13	481510,0	7083382,0	3403,0	90	Qa	1,20E-01
PB-15	494579,5	7073061,5	3572,1	113,5	Qala	9,70E-02
SPB-1	504368,7	7078552,0	3800,1	274	Qala	4,27E-05 - 1,58E-04
SPB-7	505531,5	7088179,6	3706,6	294	Misa	7,88E-05 - 1,10E-04
SPB-8	505954,3	7090958,4	3713,9	294	TQac	2,9E-09 - 1,91E-05
SPB-10	503816,0	7094647,7	3622,8	294	MsPla	1,69E-04 - 3,13E-04
SPB-13	506114,7	7089629,6	3717,6	286	MsPla	6,79E-06 - 5,24E-06
SPB-14	505634,4	7086483,8	3736,2	294	TQac	6,25E-04 - 4,96E-04
SPB-16	505094,8	7082938,5	3755,2	292	TQac	1,0E-07 - 6,16E-07
<b>ZONA CENTRAL-SUR</b>						
<b>Pozo</b>	<b>X (WGS84)</b>	<b>Y (WGS84)</b>	<b>Cota (msnm)</b>	<b>Profundidad (m)</b>	<b>Unidad Geológica (UG)</b>	<b>S</b>
J-3	498113,8	7069987,4	3662,9	34	Qf	7,83E-03 - 1,30E-01
J-6	495187,0	7070370,0	3645,0	36	Qa	2,00E-02
P-1 Anglo	492126,0	7057821,0	3660,0	100	Qa	2,0E-02 - 12E-02
CP-01B	494127,0	7058047,0	3661,8	235	MsPa	1,51E-03 - 3,00E-05
CP-03B	504968,0	7068018,0	3806,2	144	Qa	1,56E-03 - 1,67E-03
CP-05B	502820,0	7051695,0	3907,3	247,56	MsPa	5,08E-04
CP-10B	519201,0	7047715,0	4224,4	162,59	Msiw	1,71E-06 - 3,14E-05

Tabla 5-4. Coeficiente de almacenamiento para la zona norte y central-sur de la cuenca Salar de Pedernales.

Fuente: elaboración propia.

## 5.2 Unidades hidrogeológicas (UH)

La definición de Unidades Hidrogeológicas (UH) se ha basado sobre la identificación y caracterización de los materiales geológicos, información estratigráfica y datos de parámetros hidráulicos disponibles.

De esta forma, las Unidades Hidrogeológicas (UH) se han clasificado según la guía para la elaboración de mapas hidrogeológicos de Struckmeier & Margat (1995), publicada por el “International Association of Hydrogeologist”. Los mapas hidrogeológicos publicados por SERNAGEOMIN también se basan en la metodología que se presenta en dicha guía.

La clasificación de Unidades Hidrogeológicas establece las siguientes características (Figura 5-2):

- **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 fallas y/o diaclasas. Constituyen unidades de espesor significativo y extensión relativamente importante y además, son altamente productivos (presentan valores elevados de transmisividad). Estos acuíferos, 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. Además de no tener recurso hidráulico, estas rocas son impermeables, presentan permeabilidades del orden de  $10^{-5}$  a  $10^{-6}$  m/d.

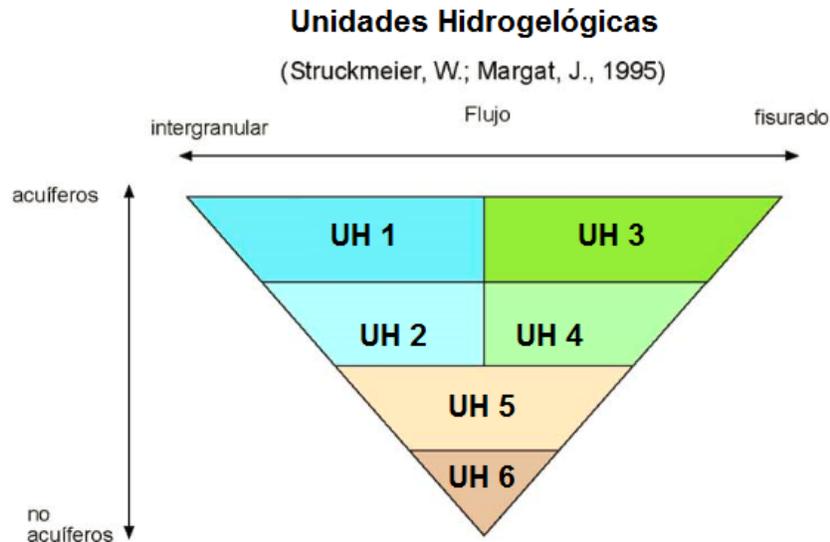


Figura 5-2. Clasificación de las Unidades Hidrogeológicas en la cuenca.

Fuente: elaboración propia.

A continuación se presenta un resumen de las características principales de las unidades hidrogeológicas definidas en este estudio, que incluye una breve descripción litológica, las Unidades Geológicas incluidas dentro de cada una de ellas, y sus características hidráulicas.

### 5.2.1 Unidad hidrogeológica 1 (UH 1)

La Unidad Hidrogeológica 1 está constituida por depósitos no consolidados de alta importancia hidrogeológica con muy alto potencial hidrogeológico (P.REF-073) con rangos de permeabilidad que van de 1 m/d a 470 m/d. Esta UH se ha agrupado en función de sus características litológicas en 2 subgrupos.

#### 5.2.1.1 UH1 formada por Depósitos aluviales y coluviales recientes

Constituidos por gravas, arenas y limos con selección y redondeamiento moderados, abarca las siguientes UG:

- PIHc: Depósitos coluviales (Pleistoceno-Holoceno).
- Qa: Depósitos aluviales (Cuaternario).

La UH1 muestra morfologías de canales y abanicos aluviales, asociados a los sistemas de drenaje, y presentan espesores variables, que puntualmente pueden alcanzar hasta 80 metros en la zona del Llano Pedernales Sur. Se presentan en las cabeceras y desembocaduras de las quebradas más importantes, constituyendo amplias llanuras en el Llano Leoncito, Llano la Ola, Llano Pedernales y Llano Pedernales Sur, así como en el Llano Los Arroyos, donde muestran carácter discontinuo.

La recarga anual es importante en las zonas apicales y se produce principalmente en la temporada de deshielos (octubre a diciembre).

#### 5.2.1.2 UH1 formada por Depósitos aluviales antiguos

Está constituida por gravas, bloques, arenas y limos, matriz-soportados, con bajo grado de redondeamiento y selección y moderadamente compactados. Muestra intercalaciones de ceniza fina. Su potencial hidráulico es alto a moderado. Comprende las siguientes Unidades Geológicas:

- MsPla: Depósitos aluviales aterrizados (Mioceno Superior-Plioceno).
- MsPa: Depósitos aluviales antiguos (Mioceno Superior-Plioceno Inferior).

Muestra una morfología aterrizada, con superficies planas de muy baja pendiente.

Recarga importante en las zonas apicales, principalmente en temporada de deshielos que es menor por nieve o lluvia caída directamente sobre esta unidad. Las aguas descargan a otras unidades o mediante extracción de agua por pozos de producción.

### 5.2.2 Unidad hidrogeológica 2 (UH 2)

La Unidad Hidrogeológica 2 está constituida por depósitos no consolidados de media a baja importancia hidrogeológica (P.REF-073) con permeabilidades del orden de  $10^1$  m/d.

#### 5.2.2.1 UH2 formada por Depósitos cuaternarios

Constituida por materiales recientes con distinto origen (gravitacional, eólico, volcánico, etc.), compuestos por bloques, gravas, arenas y limos en proporción variable, inmersos en una matriz areno-

arcillosa. Constituyen acuíferos libres con moderado a bajo potencial hidrogeológico. Se incluyen las siguientes sub-Unidades Geológicas:

- Qala, TQac, Qa, Qc, Qac: Depósitos aluviales (Pleistoceno-Holoceno).
- Qg: Depósitos glaciares (Pleistoceno-Holoceno).
- Qe: Depósitos eólicos (Pleistoceno-Holoceno).
- TQrm, PIHrm: Depósitos de remoción en masa (Pleistoceno-Holoceno).
- Qf: Depósitos fluviales (Pleistoceno-Holoceno).

Se disponen de forma discontinua por toda la cuenca, especialmente a los pies de los sectores más elevados, por lo que en general se asocian a zonas de pendientes fuertes y moderadas. Ocupan una extensión limitada, y cubren al resto de litologías de la cuenca.

#### 5.2.2.2 UH2 formada por Depósitos salinos antiguos

Forman costras salinas de sulfatos, cloruros y limos salinos, con cantidades subordinadas de boratos, levantadas y localmente deformadas, separadas de la zona de lagunas y costras salinas húmedas más recientes. Constituyen unidades libres salobres de gran extensión pero moderado potencial hidrogeológico. Incluyen las siguientes Unidades Geológicas:

- MsPIs. Costras sulfatadas, cloruradas y boratadas (Mioceno Superior-Plioceno).

Identificados en el Salar de Pedernales, infrayacen a los sedimentos salinos recientes, mostrando espesores variables, con potencias máximas de hasta 300 m en el sector suroriental del salar, mientras que hacia el noroeste disminuyen su potencia, mostrando un espesor no superior a 200 metros, con intercalaciones de carácter arenoso.

La recarga se produce principalmente de manera subterránea, a través de los acuíferos granulares que limitan lateralmente con estos depósitos salinos, y mediante recarga directa superficial a partir de las precipitaciones que tienen lugar sobre ellos.

#### 5.2.3 Unidad hidrogeológica 3 (UH 3)

La Unidad Hidrogeológica 3 está formada por rocas fracturadas que constituyen acuíferos fisurados o kársticos de alta importancia hidrogeológica con rangos de permeabilidad que van de 1 m/d a 165 m/d, aunque estos valores pueden ser de  $10^3$  e incluso  $10^4$  m/d.

#### 5.2.3.1 UH3 formada por Depósitos salinos recientes

Los depósitos más recientes están constituidos por sales (cloruros, sulfatos, y en menor medida boratos) y limos salinos húmedos, que se interpretan como depósitos evaporíticos actuales, generados mediante procesos de precipitación y disolución química.

Está constituido por las siguientes Unidades Geológicas:

- Qps: Depósitos de yesos con intercalaciones de terrígenos y piroclastos finos (Pleistoceno inferior).
- Qs: Sales y limos salinos recientes (Pleistoceno-Holoceno).

Su distribución espacial está restringida a la zona del Salar de Pedernales, con espesores no superiores a 25-50 metros. Se distribuyen fundamentalmente a lo largo del margen meridional y oriental del salar, en el sector de recarga activa, y de forma puntual en las lagunas del Llano de La Vega Helada de la cuenca hidrográfica La Laguna, en algunas quebradas al este del Llano de Los Gases Blancos y a los pies del volcán Panteón de Aliste.

El agua de recarga procede directamente de la precipitación de lluvia y nieve y por la recarga lateral de otras unidades aluviales existentes en su entorno. Constituyen las zonas de descarga más importantes de la cuenca, con una tasa de evaporación elevada.

#### 5.2.3.2 UH3 formada por Ignimbrita Wheelwright

Está constituida por rocas fracturadas de alta importancia hidrogeológica, y se corresponde con la siguiente Unidad Geológica (P.REF-073):

- Msiw: Ignimbrita Wheelwright (Mioceno Superior).

Se trata de un depósito de flujo piroclástico dacítico, de consolidado a semiconsolidado, compuesto por pómez de vesicularidad variable en matriz de ceniza media a gruesa. Se encuentra afectado por varias fallas subverticales. Rellena la parte alta de la cuenca hidrográfica del río Juncalito, entre la Cordillera de Claudio Gay al oeste y la caldera Wheelwright al este, con espesores de hasta 300 m. Subyace a la ignimbrita Laguna Verde (Pilv) y a los depósitos aluviales aterrazados (Pa) del Plioceno, y se dispone sobre depósitos volcánicos del Mioceno Medio y Superior (Mmv y Msv).

Recarga principal por escurrimiento superficial asociada a derretimiento de nieve. La descarga se produce a través del río Juncalito que recorre de sur a norte la Ignimbrita Wheelwright.

#### 5.2.4 Unidad hidrogeológica 4 (UH 4)

Esta Unidad Hidrogeológica está constituida por rocas fracturadas de media y baja importancia hidrogeológica. Dentro de este grupo se han clasificado Unidades Geológicas de distinta naturaleza y

composición. Constituye acuíferos fracturados libres a semiconfinados localmente con potencial hidrogeológico de moderado a bajo (P.REF-073). Esta UH tiene rangos de permeabilidad del orden de 1 a  $10^{-2}$  m/d.

#### 5.2.4.1 UH4 formada por Depósitos aluviales semiconsolidados

Formada por gravas y bloques en matriz arenosa en proporción variable, polimícticos, de angulosos a subredondeados, con mala a moderada selección de tamaños. Se encuentran semiconsolidados, moderadamente compactados, de suave a fuertemente plegados y localmente afectados por fallas. Muestran cementación local por carbonatos, e intercalaciones de lentes de arenas, cenizas e ignimbritas soldadas. Engloba las siguientes Unidades Geológicas:

- Msqm: Gravas de la Quebrada Manantiales (Mioceno Superior).
- Mga: Gravas de Atacama (Mioceno Medio).
- Mmrl: Estratos del río Lamas (Mioceno Medio).

Afloran en la mitad meridional de la cuenca. Se asocian a antiguos sistemas de drenaje y abanicos aluviales, estando actualmente ubicados en zonas relativamente elevadas y disectados por el sistema de drenaje activo. Muestran un espesor promedio entre 100 y 200 m, aunque se estima que puede ser mayor en algunos sectores de la cuenca como en el sector de La Ola.

Buena recarga en época de deshielos, restringida principalmente a los ápices de los abanicos aluviales, que reciben las aguas de las laderas y quebradas adyacentes.

#### 5.2.4.2 UH4 formada por Secuencias volcanoclásticas y sedimentarias

Bajo esta sub-Unidad Hidrogeológica se agrupan diferentes litologías, de origen volcanoclástico y sedimentario continental y marino, que muestran propiedades similares en cuanto a su comportamiento como acuífero. Incluye niveles yesíferos y cherts; tobas cineríticas y líticas; conglomerados y brechas volcanoclásticas, areniscas feldespáticas y cuarzo-feldespáticas, volcanoclásticas y tobáceas, limolitas y lutitas; calizas, calcarenitas y calcilutitas, areniscas y lutitas calcáreas. Presentan moderada capacidad para almacenar y transmitir agua subterránea, que mejora en las zonas fracturadas, y empeora en aquellas zonas asociadas a la presencia de las intercalaciones de lavas y depósitos piroclásticos, que dificultan el flujo.

Los niveles evaporíticos, de origen lacustre continental, y edad Oligoceno-Mioceno, afloran en el sector nororiental de la cuenca hidrográfica Salar de Pedernales, ocupando áreas restringidas, con espesores no superiores a 50 metros, acuñaándose hacia el este, norte y sur.

Esta secuencia lacustre se corresponde con las Unidades Geológicas:

- TOMrj, OMpA: Estratos Río Juncalito y Complejo Volcánico de Cerro Punta Amarilla (Oligoceno Superior-Mioceno Inferior).
- Misa: Secuencia Sierra Aliste (Mioceno Inferior).

Las tobas cineríticas y líticas, con intercalaciones de areniscas tobáceas y niveles evaporíticos, al igual que los anteriores, cubren discordantemente al resto de materiales. De edad Oligoceno, afloran en el sector oriental de la cuenca, muestran espesores estimados de al menos 300 metros, y están fuertemente plegadas. Dentro de estas litologías tobáceas se incluyen las siguientes sub-Unidades Geológicas:

- Ogb
- : Estrato de Llano Los Gases Blancos (Oligoceno).
- Kle: Estratos el Leoncito (Cretácico Superior).
- Kah: Fm Agua Helada (Cretácico Inferior).
- Kqm: Fm Quebrada Monardes (Cretácico Inferior).
- TrJem: Estratos del Mono (Triásico Superior-Jurásico Inferior).

Las areniscas, conglomerados y brechas muestran cementación ferruginosa y calcárea. Las areniscas se presentan bien seleccionadas, con estratificación paralela y cruzada y grado de fracturación moderado. Los conglomerados muestran clastos con un buen grado de redondeamiento. Presentan intercalaciones de limolitas, conglomerados finos y niveles calcáreos marinos. Afloran fundamentalmente en el sector suroccidental de la cuenca, mostrando espesores incluso superiores a 1000 metros. Forman parte de la roca basal en buena parte de la cuenca del Salar de Pedernales, y se estima que alcanzan potencias de hasta 3500 metros. Estos materiales terrígenos se corresponden con las siguientes Unidades Geológicas:

- JKp: Fm Pedernales (Jurásico Superior-Cretácico Inferior).
- Ja: Fm Asientos (Bajociano-Caloviano).
- Jm: Fm Montandón (Pliensbachiano-Bajociano Medio).

Los niveles calcáreos, de origen sedimentario marino, generalmente presentan niveles intercalados de areniscas volcanoclásticas de hasta 200 metros de espesor, y niveles locales de lavas. Muestran en algunos tramos un fuerte grado de fracturación tectónica y karstificación incipiente. De edad jurásica, sobreyacen discordantemente a las rocas del Paleozoico, y subyacen a las rocas sedimentarias detríticas del Cretácico. Afloran en los sectores oeste y suroeste de la cuenca. Forman parte de la roca basal del Salar de Pedernales, donde se estima que alcanzan espesores de hasta 1000 metros. Recarga estacional por escorrentía superficial, desde laderas y quebradas adyacentes, especialmente en épocas de deshielo.

---

#### 5.2.4.3 UH4 formada por Secuencias volcánicas y volcanosedimentarias

En esta sub-Unidad Hidrogeológica se agrupan materiales asociados a volcanismo, que presentan propiedades similares en cuanto a su comportamiento como acuíferos (P.REF-073). Dentro de estas litologías fundamentalmente lávicas se incluyen las siguientes Unidades Geológicas:

- Jqv: Estratos de Quebrada Vicuña (Jurásico Medio-Superior).
- TrJqs: Fm Quebrada del Salitre (Triásico Superior-Jurásico Inferior).

Se compone fundamentalmente de coladas de lavas y depósitos piroclásticos, con escasas intercalaciones de rocas sedimentarias y pequeños niveles intrusivos. Constituyen acuíferos fracturados, de carácter libre y semiconfinado. Muestran una conductividad hidráulica media-alta asociada al grado de fracturación de los materiales, por lo que se considera que presentan un moderado potencial hidrogeológico, más elevado en los depósitos asociados al sector central y oriental de la cuenca. Los niveles de lava, de composición basáltica y andesítica, edad mesozoica, y formadas por coladas en bancos de hasta 20 metros de espesor, afloran de forma puntual en el límite occidental de la cuenca del Salar de Pedernales, con espesores en torno a 200 metros. Las coladas muestran carácter brechoide a muro y un intenso grado de fracturación primaria a techo, homogéneo, de entre 1 a 10 fracturas por metro.

Los depósitos piroclásticos, constituidos por ignimbritas, tobas líticas, tobas cineríticas, areniscas tufáceas y depósitos de bloques y cenizas, con intercalaciones de niveles sedimentarios, muestran edades entre el Eoceno-Mioceno. Estos materiales están constituidos por la siguientes Unidades Geológicas:

- Misa: Secuencia Sierra Aliste indiferenciada (Mioceno Inferior).
- OMrjpa: Estratos Río Juncalito y Complejo Volcánico de Cerro Punta Amarilla (Oligoceno Superior-Mioceno Inferior).
- OMcg: Estratos de Claudio Gay (Oligoceno Superior-Mioceno Inferior).

Los materiales piroclásticos afloran en la mitad oriental de la cuenca del Salar de Pedernales, mostrando cierto nivel de plegamiento. A los pies de la Sierra de Aliste, se han identificado a lo largo de una franja norte-sur, donde alcanzan espesores entre 100-250 metros. En el entorno del Llano el Leoncito, alcanzan espesores incluso superiores a 300 metros. Afloran también en el entorno de la Cordillera de Claudio Gay, donde alcanzan potencias de al menos 500 metros.

Su recarga principal está asociada a escurrimiento superficial a partir de lluvia y nieve, en quebradas adyacentes, especialmente en zonas altas.

#### 5.2.4.4 UH4 formada por Ignimbritas

Tobas de mediana a fuertemente soldadas, constituidas por líticos y pómez, en una matriz de ceniza, vidrio y cristales, en proporción variable. Probables acuíferos fracturados (libre, semiconfinados y confinados), de gran extensión y continuidad lateral, pero espesor desconocido, aunque se estima no superior a 25-30 metros, lo que unido a una conductividad hidráulica moderada les confiere un potencial hidrogeológico de bajo a moderado.

Esta sub-unidad Hidrogeológica está constituida por las siguientes Unidades Geológicas:

- Pilv: Ignimbrita Laguna Verde (Plioceno Inferior).
- Miihv: Ignimbrita Vega Helada (Mioceno Inferior).

Muestran espesores no superiores a 25-30 metros y afloran en el sector oriental de la cuenca. La Ignimbrita Laguna Verde (Pilv) se ha identificado fundamentalmente en el sector Juncalito, sobre la Ignimbrita Wheelwright, mientras que la Ignimbrita Vega Helada está restringida a la sector de la Vega Helada, donde se apoya sobre la Secuencia Sierra de Aliste (Misa), y se encuentra fuertemente fallada y plegada en suaves anticlinales y sinclinales de orientación norte-sur.

Recarga por escurrimiento superficial, asociada a lluvia y nieve, y por posible flujo subterráneo procedente de cuencas adyacentes.

#### 5.2.5 Unidad hidrogeológica 5 (UH 5)

Esta UH está constituida por rocas y depósitos no consolidados de baja a muy baja importancia hidrogeológica (P.REF-073), con rangos de permeabilidad del orden de  $10^{-2}$  a  $10^{-4}$  m/d.

##### 5.2.5.1 UH5 formada por Depósitos lacustres del Cuaternario

Limos, arenas y conglomerados de moderadamente a fuertemente consolidados, puntualmente cementados por sales, bien seleccionados. Se incluyen dentro de este grupo las siguientes Unidades Geológicas:

- Qala: Depósitos aluviales, terrazas (Pleistoceno-Holoceno).
- Ql: Depósitos lacustres (Pleistoceno-Holoceno).

Estos depósitos, se disponen horizontalmente, disectados y en parte cubiertos por el sistema de drenaje actual, estando asociados a depósitos de fondo o de borde de laguna. Sus afloramientos están restringidos al borde oriental del Salar de Pedernales y a las zonas topográficamente más bajas del Llano de La Vega Helada, en la cuenca hidrográfica La Laguna, donde actualmente existen lagunas salinas. Muestran espesores no superiores a 5-10 metros.

Probables zonas de descarga por evaporación asociada a lámina libre.

#### 5.2.5.2 UH5 formada por Depósitos piroclásticos

Depósitos piroclásticos de bloques y cenizas, de moderada a fuertemente consolidados, y tobas de débilmente soldadas a soldadas. Posible ocurrencia de acuíferos libres y confinados, con una potencia no superior a 20 metros, que les confiere un potencial hidrogeológico de bajo a moderado.

- Psv: Volcanes y complejos volcánicos del Plioceno Superior, depósitos de flujo piroclástico
- Msisa: Ignimbrita San Andrés (Mioceno Superior).
- Msv: Volcanes y complejos volcánicos del Mioceno Superior, depósitos de flujo piroclástico
- Mmilc: Ignimbrita Los Cristales (Mioceno Medio).
- Mmv: Volcanes y complejos volcánicos del Mioceno Medio, Ignimbrita Doña Inés.
- Mijj: Ignimbrita Juncalito (Mioceno Inferior).
- Mipp: Estratos de Piedra Pómez (Mioceno Inferior).
- Mip: Complejo volcánico el Perro y centros volcánicos adyacentes, Ignimbrita el Perro (Mioceno Inferior).
- Miilt: Ignimbrita los Terneros (Mioceno Inferior).
- Misa: Secuencia Sierra Aliste, flujos piroclásticos (Mioceno Inferior).
- OMrjpa: Estratos Río Juncalito y Complejo Volcánico de Cerro Punta Amarilla (Oligoceno Superior-Mioceno Inferior).
- Kcc: Estratos Cerro Los Carneros (Cretácico Superior).

Se corresponden con depósitos de entre 50 y 300 metros de espesor, ubicados normalmente en las zonas de mayor relieve de la cuenca, constituyendo en muchos casos los límites que definen las cuencas y subcuencas hidrográficas.

Recarga por escurrimiento superficial, asociada al derretimiento de nieve en los faldeos de zonas elevadas, y por flujo subterráneo en las inmediaciones de quebradas secundarias.

#### 5.2.5.3 UH5 formada por Secuencias volcánicas

Coladas de lava de composición predominantemente andesítica y basáltica, y en menor proporción dacítica y riolítica. Posible existencia de acuíferos libres fracturados, de espesor variable, pero en general inferior a 50 metros, y baja permeabilidad, por lo que se les estima un potencial hidrogeológico de bajo a nulo. Se compone de las siguientes Unidades Geológicas:

- PIHv: Volcanes y complejos volcánicos del Cuaternario, lavas andesíticas (Pleistoceno-Holoceno).
- Psv: Volcanes y Complejos volcánicos del Plioceno Superior.
- Msv: Volcanes y complejos volcánicos del Mioceno Superior.
- Mmv: Volcanes y complejos volcánicos del Mioceno Medio.
- Mip: Complejo volcánico el Perro y centros volcánicos adyacentes, lavas y cuerpo de magnetita (Mioceno Inferior).
- OMrjpa: Estratos Río Juncalito y Complejo Volcánico de Cerro Punta Amarilla, lavas (Oligoceno Superior-Mioceno Inferior).
- OMcg: Estratos de Claudio Gay, lavas (Oligoceno Superior-Mioceno Inferior).
- Eolv: Estratos de la Vertiente (Eoceno-Oligoceno).
- Kcc: Estratos Cerro Los Carneros (Cretácico Superior).
- Kqm: Fm Quebrada Monardes, lavas (Cretácico Inferior).
- Ja: Fm Asientos, lavas (Bajociano-Caloviano).

Las coladas presentan espesores variables, hasta decenas de metros. Delimitan la cuenca en su sector oriental, constituyendo los relieves más elevados y definiendo los límites hidrográficos de esta área. Se presentan de forma puntual en el sector central, dando lugar a direcciones preferenciales y bifurcaciones en los flujos superficiales y la red de drenaje. Están asociadas a zonas de pendientes elevadas. Presentan fracturación variable, pero generalmente de bajo grado, y niveles brechoides.

Recarga escasa y muy local debido a la fuerte pendiente.

#### **5.2.6 Unidad hidrogeológica 6 (UH 6): Sustrato rocoso / basamento**

Considerada la roca basal indiferenciada, constituye el zócalo impermeable de la cuenca, delimitando el acuífero en su zona inferior. Los materiales que se incluyen son: areniscas, brechas y conglomerados paleozoicos; complejos intrusivos de composición granítica, granodiorítica, riolítica y dacítica; y lavas riolíticas, dacíticas y en menor medida andesíticas y basálticas. Engloba las siguientes Unidades Geológicas:

- Psv: Volcanes y complejos volcánicos del Plioceno Superior.
- Piv: Volcanes y complejos volcánicos del Plioceno Inferior.
- Msv: Volcanes y complejos volcánicos del Mioceno Superior.
- Mmh: Intrusivos Hipoabisales del Mioceno Medio.
- Mmv: Volcanes y complejos volcánicos del Mioceno Medio.

- Miv: Volcanes y complejos volcánicos del Mioceno Inferior.
- Mip: Complejo volcánico el Perro y centros volcánicos adyacentes (Mioceno Inferior).
- TOMde: Complejos de Domos Coalescentes, Domos de Esperanza (Oligoceno Superior-Mioceno Inferior).
- OMrjpa: Estratos Río Juncalito y Complejo Volcánico de Cerro Punta Amarilla (Oligoceno Superior-Mioceno Inferior).
- Oird: Pórfidos riodacíticos (Oligoceno).
- Ks: Complejos Intrusivos del Cretácico Superior.
- Kcc (2): Estratos de Cerro Los Carneros (Cretácico Superior).
- TrJqs (3): Fm Quebrada del Salitre (Triásico Superior - Jurásico Inferior).
- PzTrp: Fm Pantanoso (Pérmico - Triásico).
- Pzsp: Pórfidos Riolíticos del Paleozoico Superior.
- Pzgp: Batolito Pedernales (Pérmico).
- Pzlt: Fm La Tabla (Carbonífero – Pérmico).

Constituyen los materiales más competentes y los mayores relieves de la cuenca, y junto con la UH5, definen los límites hidrográficos de la zona de estudio. Afloran fundamentalmente en el sector occidental de la zona de estudio, y de forma dispersa cerca de los límites de la misma, mostrando fuertes pendientes en los afloramientos en los que aparecen.

La recarga y capacidad de almacenamiento están limitadas por las fuertes pendientes que muestran los afloramientos. No se puede descartar sin embargo, un mayor potencial de recarga en aquellos afloramientos situados en las zonas altas al este de la cuenca, con mayores valores de precipitación.

En la Tabla 5-5 se resumen las principales características de cada una de las UH's, y en la Figura 5-3 se ilustra su distribución en planta. En este mapa se puede observar como la UH 1 se extiende en una franja central dirección N-S, con una mayor presencia en la zona septentrional de la zona de estudio respecto a la meridional, además en la zona La Ola esta unidad reduce considerablemente sus dimensiones. La UH 2 y se encuentra formando el Salar de Pedernales y repartida en la zona central y sur formando depósitos de material aluvial, piroclástico y gravitacional. El Salar de Pedernales ha sufrido procesos de disolución y fractura, por lo cual se encuentran zonas de mayor permeabilidad hidráulica, estas se han caracterizado como UH 3. Esta misma unidad aflora también en la parte S-E de la cuenca representada por flujos piroclásticos fracturados. La UH 4, UH 5 y UH 6, se encuentran distribuidas a lo largo de toda la zona de estudio, estos materiales se alzan formando los cerros.

Unidad Hidrogeológica	Descripción litológica	Unidades y Sub-Unidades Geológicas a las que pertenecen	Parámetros hidráulicos representativos
UH 1	Gravas, arenas y limos de origen aluvial y coluvial.	MsPla, MsPa, Qa, PIHc	K: 5-100 m/d
			Espesor saturado: 30-150 m
UH 2	Bloques, gravas, arenas y limos de origen aluvial, gravitacional, evaporítico y piroclástico.	MsPls, Qala, TQac, Qa, Qc, Qac, Qg, Qg, Qe, TQrm, PIHrm, Qf, Qv.	K: 1-5 m/d
			Espesor saturado: 5-30 m
UH 3	Depósito de flujo piroclástico de consolidado a semi-consolidado.	Qps, Qs y Msiw.	K: 1-100 m/d
			Espesor saturado: 200 m
UH 4	Tobas, secuencias sedimentarias y volcano-sedimentarias.	Pilv, Msqm, Mga, Mmrl, Miivh, Misa, OMrjpa, OMcg, Ogb, EOh, Kle, Kah, Kqm, JKp, Jqv, Ja, Jm, TrJem.	K: 10 <sup>-1</sup> -15 m/d
			Espesor saturado medio: 300 m
UH 5	Tobas, lavas y depósitos piroclásticos.	PIHa, PIH, PIHv, Plich, Psv, Msisa, Msv, Mmilc, Mmv, Mij, Mipp, Mip, Miilt, Misa, OMio, OMde. OMv, OMdo, OMrjpa, OMcg, Eolv, Eeb, PEvi, PECv, Kcc, Kll, Kqm, JKsf, Ja.	K: 10 <sup>-2</sup> -10 <sup>-4</sup> m/d
			Espesor saturado medio: 300 m
UH 6	Secuencias volcánicas y sedimentarias poco fracturadas, complejos intrusivos.	Psv, Piv, Msv, Mmh, Mmv, Miv, Mip, OMde, OMv, OMdo, OMrjpa, Oird, Ep,	K: 10 <sup>-5</sup> m/d

Tabla 5-5. Tabla resumen de Unidades Hidrogeológicas y parámetros hidráulicos.

Fuente: elaboración propia.

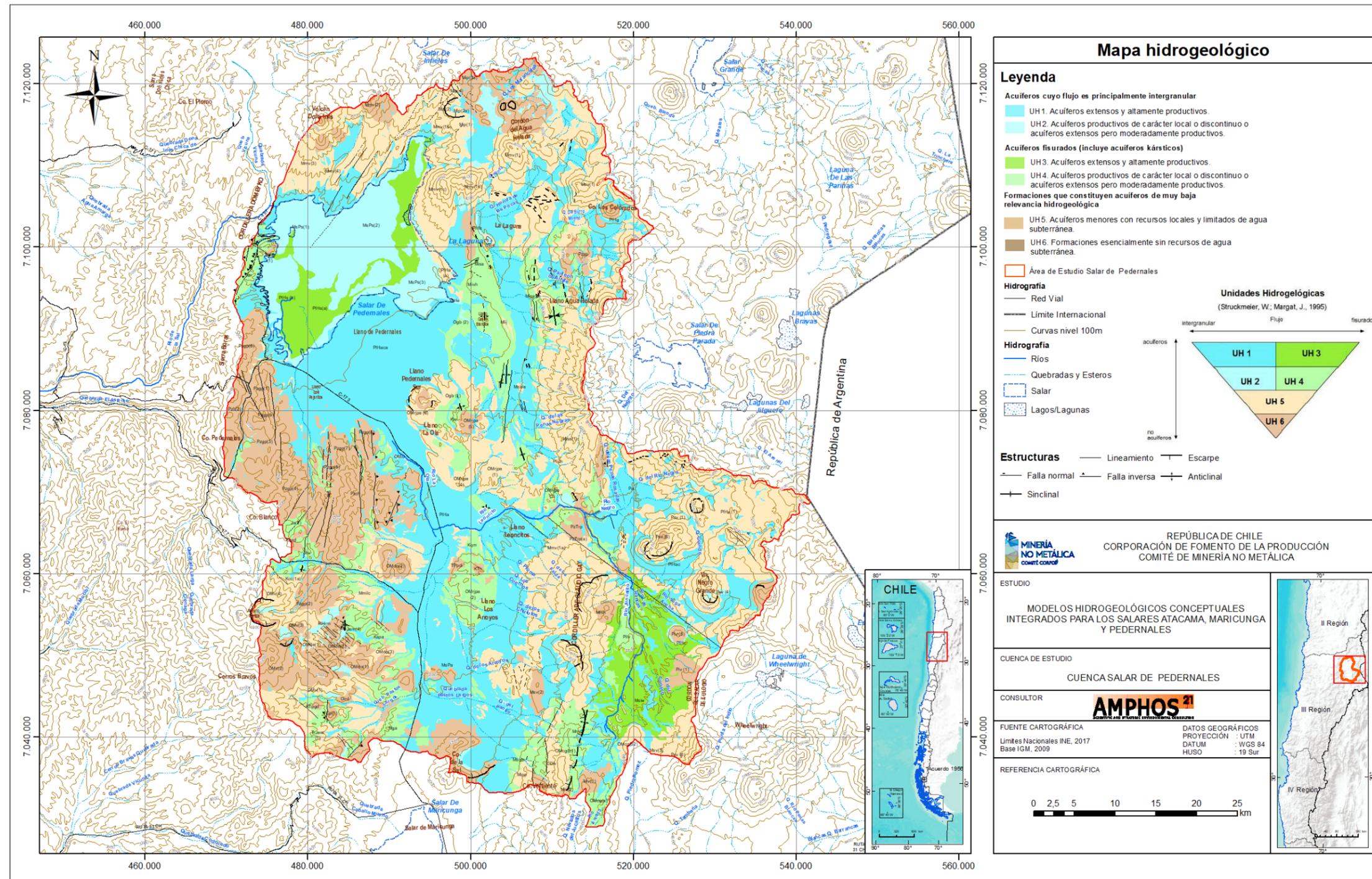


Figura 5-3. Mapa hidrogeológico cuenca Salar de Pedernales.

Fuente: elaboración propia

### 5.3 Geometría de los acuíferos (3D Leapfrog)

Los acuíferos de mayor desarrollo dentro de la cuenca Salar de Pedernales están formados por los materiales no consolidados Neógenos-Cuaternarios (Unidades Hidrogeológicas 1 y 2) acumulados en las zonas más deprimidas y llanas.

En planta se sitúan al norte alrededor del salar, en la zona central de la cuenca se estrechan y en la zona sur otra vez ocupan mayor extensión. A su vez, estos materiales no consolidados están rodeados por materiales de baja a nula importancia hidrogeológica, están representados por materiales de origen volcánico y el basamento rocoso. Al sureste de la zona de estudio, se encuentran materiales de elevada importancia hidrogeológica pertenecientes a la Unidad Hidrogeológica 3, se trata de ignimbritas miocenas fracturadas.

A partir de la información geofísica disponible y de las columnas estratigráficas procedentes de los sondeos de los pozos, se procederá a hacer una descripción sobre la geometría y dimensiones del acuífero y del Salar de Pedernales.

### 5.3.1 Prospecciones geofísicas

La cuenca Salar de Pedernales ha sido objeto de diversas campañas de levantamiento geofísico, que han permitido explorar gran parte de la zona de estudio. A continuación, se presentan las características principales de los estudios geofísicos históricos conocidos (Tabla 5-6).

Año	Autor	Técnica	Contenido	Longitud (km)	Sector
1976	Instituto de Investigaciones Geológicas	RS,	3 perfiles (mixtos)	35	Llano de Pedernales
		SE-S			
1998	Geodatos	TEM	3 perfiles	20,1	Llano de Pedernales Sur
2000	Gerencia Exploraciones CODELCO	GRAV	1 perfil	16,6	Llano los Pajaritos
2001	Geodatos	TEM	5 estaciones, 3 perfiles		Cordón Conito de los Infieles
2004	-	TEM	2 perfiles	7,2	Cordón Conito de los Infieles
2004	Geodatos	TEM	5 perfiles	72	Llano de Pedernales
		TEM	5 perfiles	72	Llano El Leoncito y Llano Los Arroyos
2004	Geodatos	TEM	3 perfiles	18	Llano de Pedernales
		GRAV	3 perfiles	42	Llano de Pedernales
2006	-	SEV	3 sondeos verticales	-	Qda. de los Chululos
2007	Geodatos	TEM	9 perfiles	63	La Ola
		GRAV	7 perfiles	53	La Ola
2008	-	SEV	2 sondeos verticales	-	NE Salar de Maricunga

Tabla 5-6. Estudios geofísicos conocidos en la cuenca Salar de Pedernales.

**Abreviaciones:** (1) RS: Refracción Sísmica; (2) SE-S: Sondaje Eléctrico configuración Schlumberger; (3) TEM: Transiente Electro Magnético; (4) GRAV: Gravimetría; (5) SEV: Sondeo Eléctrico-Vertical.

Fuente: elaboración propia.

A continuación se muestra un mapa con la distribución de los perfiles utilizados (Figura 5-4).

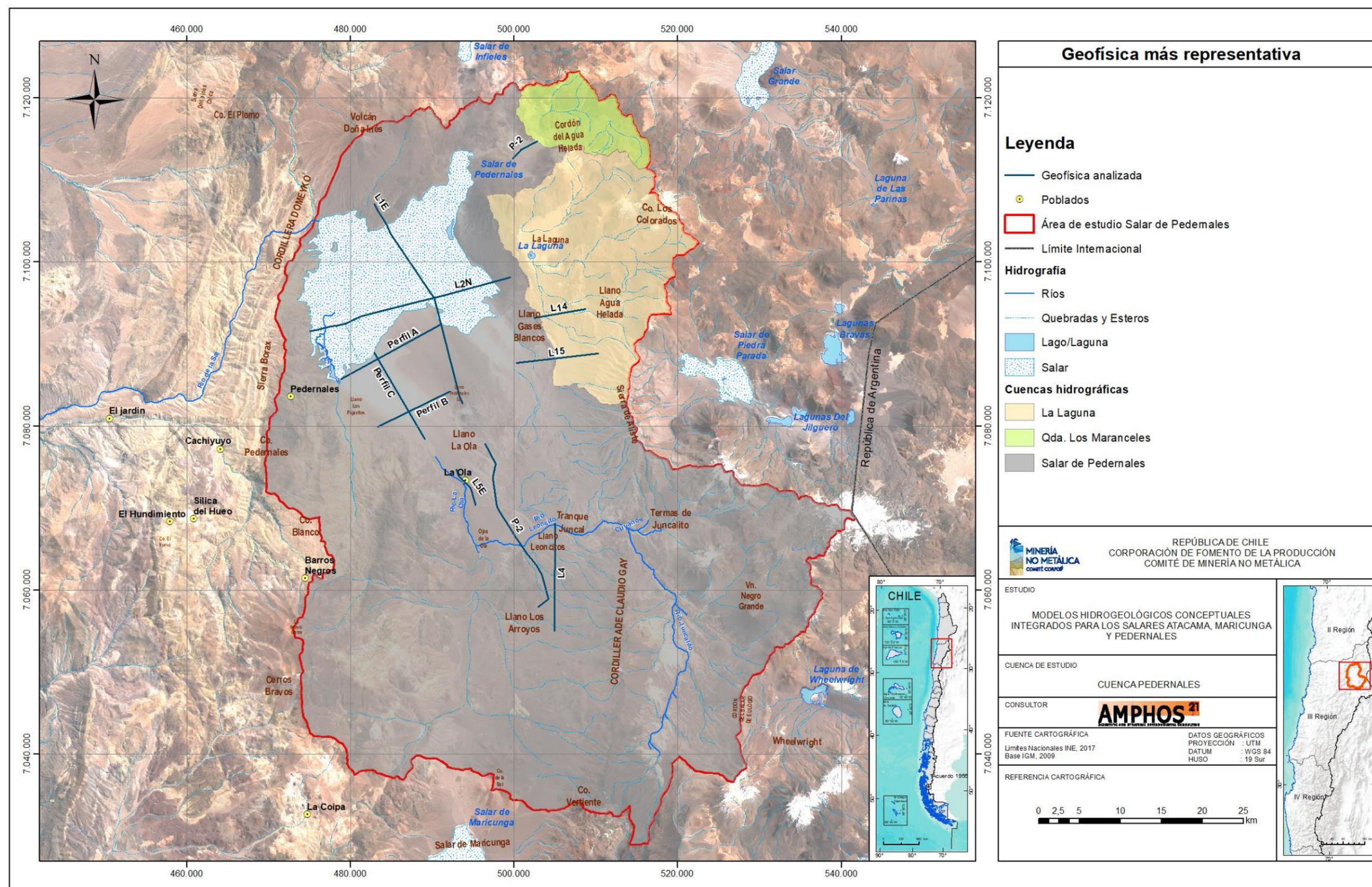


Figura 5-4. Perfiles geofísicos utilizados para la descripción de la geometría acuífera.

Fuente: elaboración propia.

### Estudio Geofísico Llano de Pedernales-III Región, 1976

El estudio más antiguo del que se dispone (Instituto de Investigaciones Geológicas, 1976) (P\_REF.055), utilizó técnicas de refracción sísmica y sondaje eléctrico (configuración tipo Schlumberger) para la investigación del sector denominado Llano de Pedernales, en el SE del salar. Se levantaron en total 3 perfiles, cubriendo una longitud equivalente a 35 km lineales (Figura 5-5). El análisis de velocidad de propagación de onda sísmica permitió definir la configuración estratigráfica del perfil, determinando la existencia de roca basal a una profundidad de entre 150 y 450 m, un estrato intermedio poco permeable de sedimentos con intercalaciones de roca, con un grado de compactación creciente en profundidad; y un relleno superficial de alta permeabilidad, con espesor aproximado de 40 m. El análisis de resistividad eléctrica determinó la presencia de nivel freático en el relleno superficial, estimándose un espesor saturado de 30 m. Se indicó además la posibilidad de existir intercalaciones permeables de poca potencia en el estrato intermedio, asociadas a lentes de grava, que podrían constituir unidades acuíferas secundarias; sin embargo, esto no fue investigado en mayor profundidad.

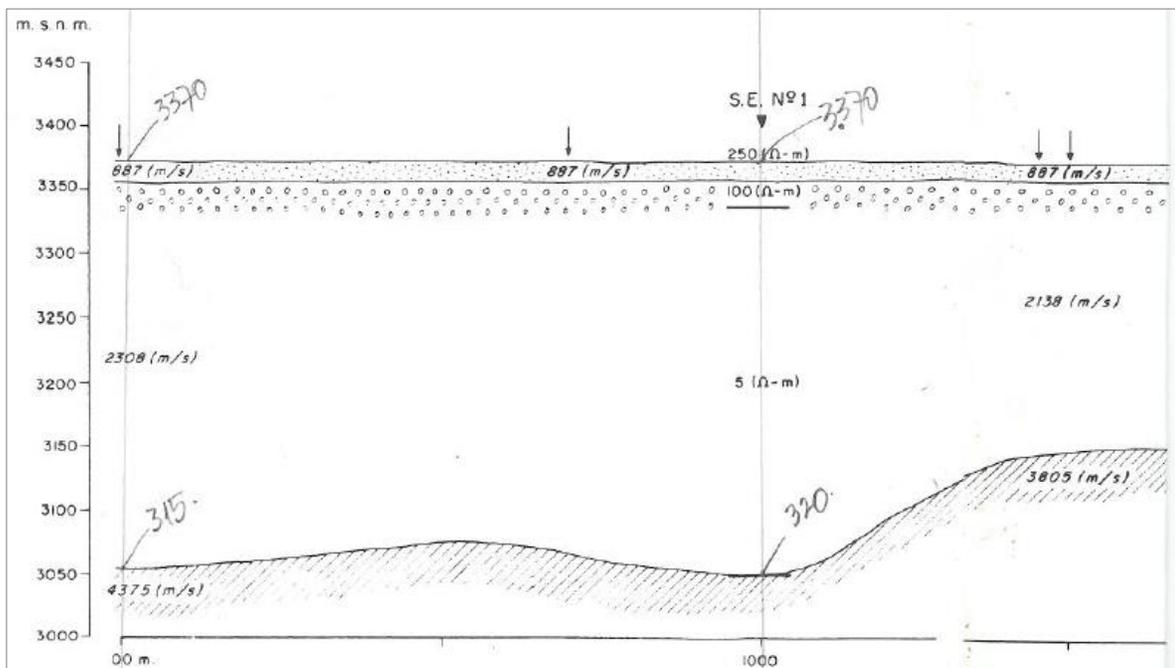


Figura 5-5. Perfil Geofísico Llano de Pedernales.

Fuente: Instituto de Investigaciones Geológicas, 1976.

En cuanto a unidades geoelectricas, en este estudio geofísico se definen cuatro:

- Primera unidad superficial de alta resistividad (250-1350 ohm\*m) y de espesor variable entre 2 y 28 m. Constituye el relleno superficial de sedimentos modernos de alta porosidad y no saturados.
- Segunda unidad con menor resistividad aparente (30-100 ohm\*m), de espesor variable entre 16 y 120 m que corresponde también al relleno superficial mencionado con la diferencia de que esta unidad está saturada en agua.
- Tercera unidad de resistividad baja (0,8-5 ohm\*m) con un espesor de entre 45 y 290 m. Corresponde a un medio sísmico de alta compactación y está saturado en agua, aunque indica una baja permeabilidad.
- La cuarta unidad geoelectrica tiene alta resistividad y representa la roca basal.

Entre los años 2004 y 2013 se han desarrollado otros estudios entorno al salar y hacia el SE de la cuenca, utilizando principalmente las técnicas de Transiente Electromagnético (TEM) y Gravimetría.

#### **Estudio Geofísico Transiente Electromagnético (TEM) Sector Salar de Pedernales**

El año 2004 la empresa Geodatos elaboró un estudio para la División Salvador de Codelco (P\_REF.056), en el cual se analizaron 78 estaciones TEM, que conformaron un total de 5 perfiles, con una longitud equivalente a 72 km lineales. Para su estudio se apoyaron en columnas estratigráficas procedentes de sondeos cercanos, de los cuales no se dispone para el presente estudio. Los resultados del estudio indican que en el entorno inmediato del sector S del salar, el basamento se encuentra a una profundidad de entre 200 y 600 m, sobre el cual yace un depósito de material saturado, donde se registran núcleos de salmueras de espesor variable, con potencias máximas del orden de 300 m hacia el W (Figura 5-6) y cuyos límites en proyección horizontal son considerablemente mayores al área donde se observa salmuera en superficie. En la zona norte del salar, se puede observar como la costra de halita y yeso llega hasta profundidades de entre 80-100 m y subyacente a ésta, se encuentran materiales no consolidados tales como gravas y/o gravillas y arenas medias-gruesas. Además, estos materiales están saturados en 100-200 m de columna por salmuera, como se observa en el perfil TEM L1E (Figura 5-6).

La mayoría de las columnas estratigráficas de las que se dispone para la caracterización geológica en el presente estudio en la zona del salar no son profundas, de 40 a 50 m. Sin embargo, en el sondaje SPD-1 de 327 m de profundidad (ver Capítulo 4) se puede observar esta disposición de materiales con la que se apoya la caracterización del perfil TEM L1.

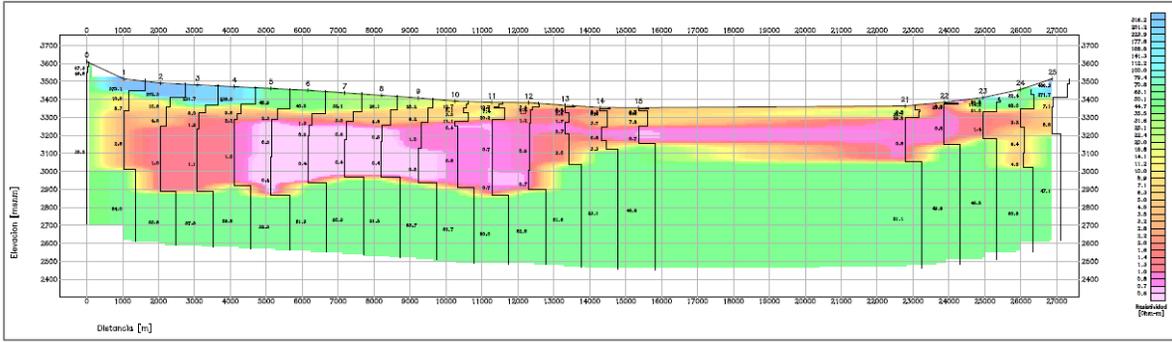


Figura 5-6. Perfil TEM L1E Salar de Pedernales (Geodatos 2004). Orientación S-N.

Fuente: Geodatos 2004.

Perpendicular al perfil L1E se levantó el TEM L2N (Figura 5-7), en el cual se puede observar que el basamento es más profundo en el sector este del Salar de Pedernales, con profundidades que van de 300 a 450 m en contraposición de la zona oeste con profundidades máximas de 250 m. Además, se pueden observar dos núcleos de salmuera de espesor variable, de entre 100-200 m en el sector oeste y 30-90 m en el este.

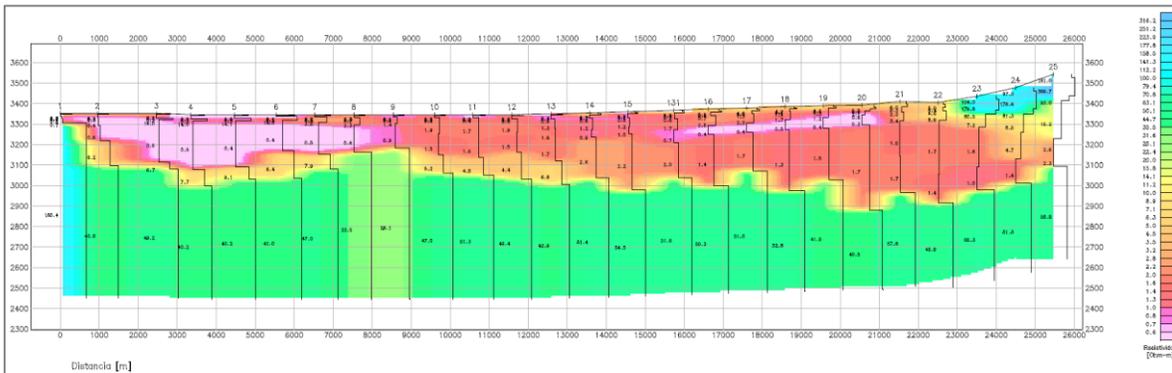


Figura 5-7. Perfil TEM L2N Salar de Pedernales. Orientación W-E.

Fuente: Geodatos 2004.

Además, se levantó información en 2 sectores ubicados aguas arriba de la cuenca, aproximadamente a 20 km y 40 km hacia el SE del salar (sectores Llano El Leoncito y Llano Los Arroyos, respectivamente), mediante 3 perfiles TEM que cubrieron una longitud aproximada de 72 Km lineales.

A partir de los sondajes adyacentes al perfil TEM L5E (Figura 5-8) del llano El Leoncito J-1, J-2, J-6, J-7 y PB-15 se determina la existencia de un estrato superficial de arenas y gravas, con un espesor medio de unos 10 m, el cual yace sobre sedimentos saturados compuestos por gravas y arenas con intercalaciones de cenizas y tobas. A mayor profundidad se reconoce un tercer estrato de tobas cuyo espesor aumenta en dirección N.

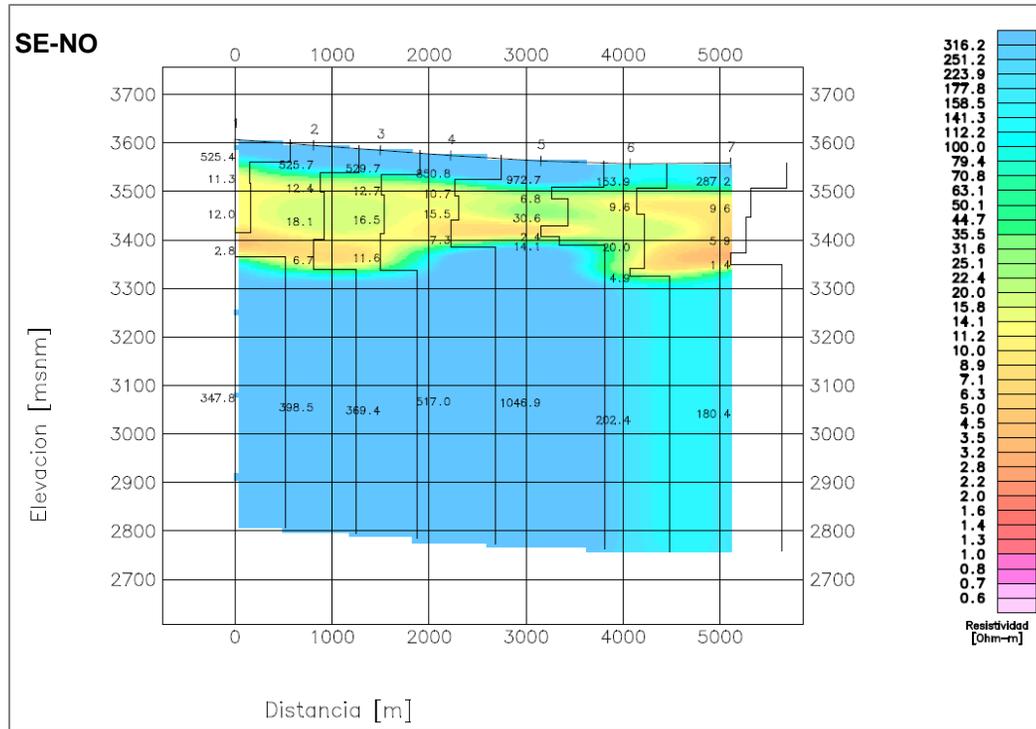


Figura 5-8. Perfil TEM L5E Llano El Leoncito. Orientación SE-NO.

Fuente: Geodatos 2004.

En el sector más alejado del salar (Figura 5-9), se identificó que el estrato superficial de gravas, arenas y tobas secas que tiene un espesor que aumenta de NE a SW, alcanzando un espesor de entre 60 a 120 m, bajo el cual yace un segundo estrato de gravas y arenas saturadas, cuyo espesor presenta importantes variaciones, teniendo un valor promedio de 40 m. Bajo este último se reconocen unidades asociadas a tobas y rocas sedimentarias muy conductoras, las cuales yacen sobre el basamento.

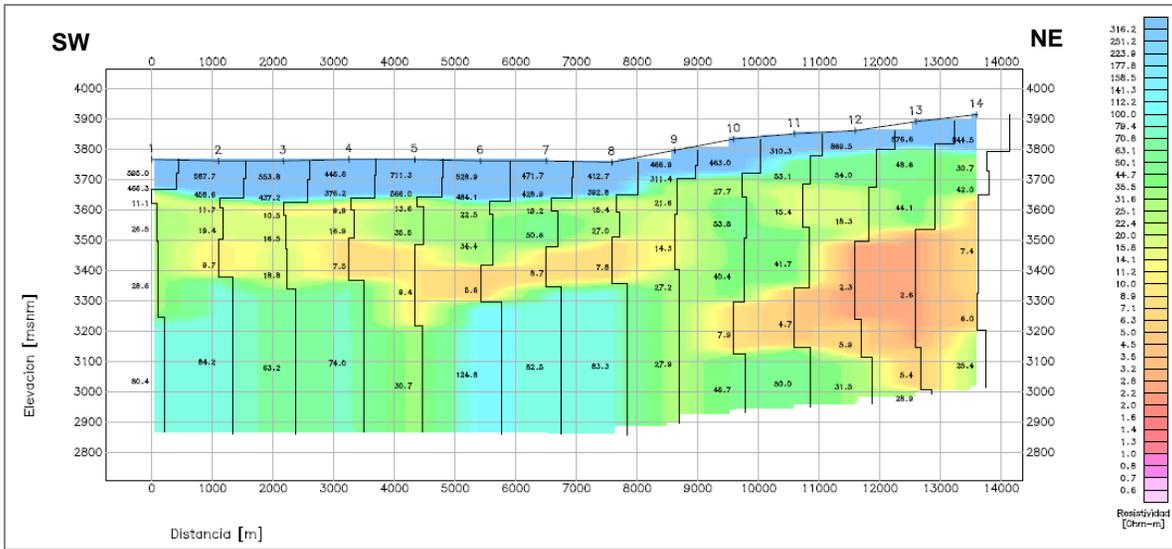


Figura 5-9. Perfil TEM L4 en sector Llano Los Arroyos. Orientación SW-NE.

Fuente: Geodatos 2004.

### Estudio Geofísico Transiente Electromagnético (TEM) Sector Pajaritos

Posteriormente (Geodatos, 2004) (P\_REF.057), profundizó la investigación en el sector S de la cuenca Salar de Pedernales, denominado Llano Los Pajaritos, mediante el levantamiento de 3 perfiles TEM (17,6 km) y 3 perfiles gravimétricos (41,5 km). A partir de los perfiles TEM (Figura 5-10) se determinó que existe un primer horizonte correspondiente a sedimentos superficiales secos, con un espesor de entre 50 y 170 m creciente hacia el poniente; bajo el cual yace un estrato de gravas con presencia de limos y/o arcillas, en el cual se registra el nivel piezométrico a una profundidad variable de entre 100 y 250 m, y que estaría limitado en el SW de la cuenca por un ascenso local del basamento. En zonas cercanas al salar se interpreta la existencia de roca basal fracturada, la cual estaría saturada con salmuera.

Cabe destacar que los sondeos disponibles en esta zona tienen máximo una profundidad de 80 m. No obstante, se han podido ver representados los sedimentos superficiales compuestos por arena fina a gruesa en los sondeos P-15 y P-17.

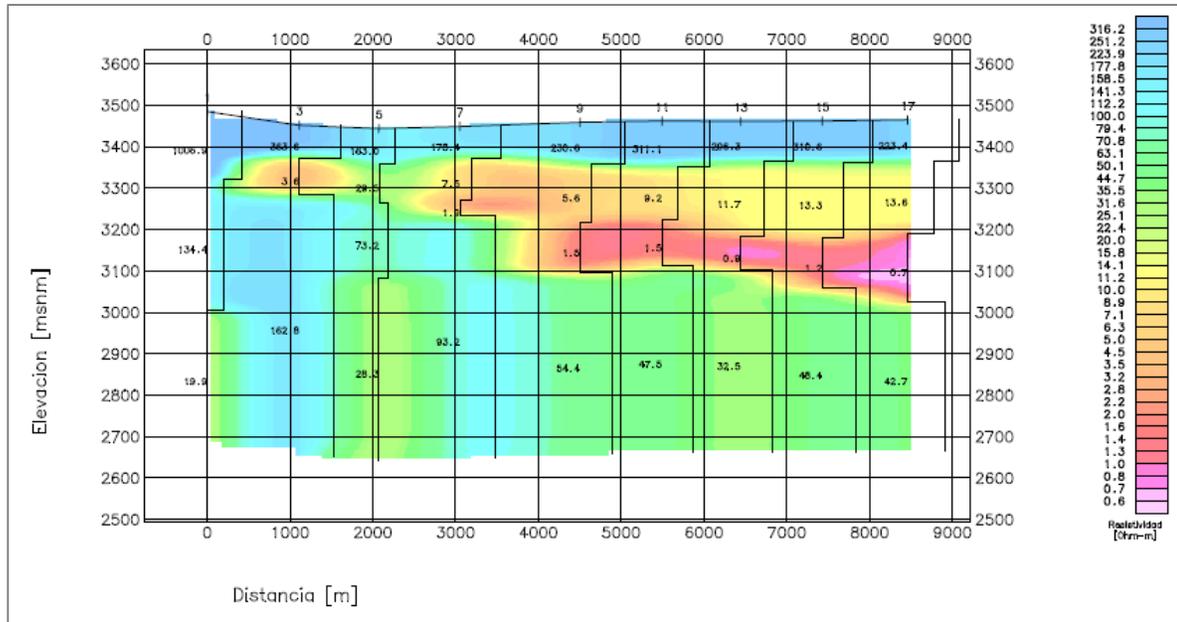


Figura 5-10. Perfil TEM P2 en sector Llano Los Pajaritos.

Fuente: Geodatos 2004.

En este caso, la información TEM permitió identificar hasta cinco unidades geoelectricas principales:

- **UG1:** Sedimentos superficiales secos, con resistividades superiores a 50 ohm\*m, y con espesores variables entre 50 y 170 m.
- **UG2:** Gravas con resistividades entre 10 y 20 ohm\*m, comprende sectores con materiales de granulometría gruesa
- **UG3:** Gravas arcillosas con resistividades entre 4 y 10 ohm\*m, comprende sectores con predominio de sedimentos finos como limos y/o arcillas
- **UG4:** Agua salada, corresponde a sedimentos saturados con aguas saladas y/o salmueras, con resistividades menores que 3 ohm\*m
- **UG5:** Roca basal, presenta resistividades superiores a 50 ohm\*m, alcanzado niveles sobre 150 ohm-m, indicativos de roca de baja permeabilidad y bajo nivel de fracturamiento. Se encuentran también resistividades inferiores a 20 ohm\*m producto de un cambio litológico o incremento del nivel de fracturamiento.

### 5.3.2 Identificación de la salmuera e interfaz salina

El Salar de Pedernales se encuentra localizado en el sector septentrional de la zona de estudio. En superficie, el Salar tiene unas dimensiones en planta aproximadas de 22 km x 10 km. En esta zona los espesores de yeso y halita pueden llegar a los 400 m.

- Al sur del Salar afloran en superficie los materiales no consolidados de la UH 1 y el norte el salar se encuentra delimitado por las UH 5 y UH 6.
- Con el objetivo de identificar el área aproximada de la cuña salina se ha recurrido a la geofísica, hidroquímica y a las columnas litológicas. Con esta información, se observa que la cuña se ha desarrollado hacia el sur.
- En el suroeste del salar, después de analizar las columnas litológicas y los datos de conductividad hidráulica en las aguas no se han identificado indicios de que la cuña se haya desarrollado en esta dirección. Sin embargo, al SE del Salar la conductividad eléctrica medida en el pozo SPX-5 muestra un valor de 26.000  $\mu\text{s}/\text{cm}$ , lo cual indica que la cuña salina sí se desarrolla en este sector.
- Al sureste del salar se observa, a partir de las columnas disponibles, la existencia en profundidad de materiales no consolidados y tobas fracturadas, lo cual indica que no hay un desarrollo del salar en esta dirección.

Teniendo en cuenta la información citada, se ha trazado la proyección aproximada de la salmuera tal y como se muestra en la Figura 5-11.

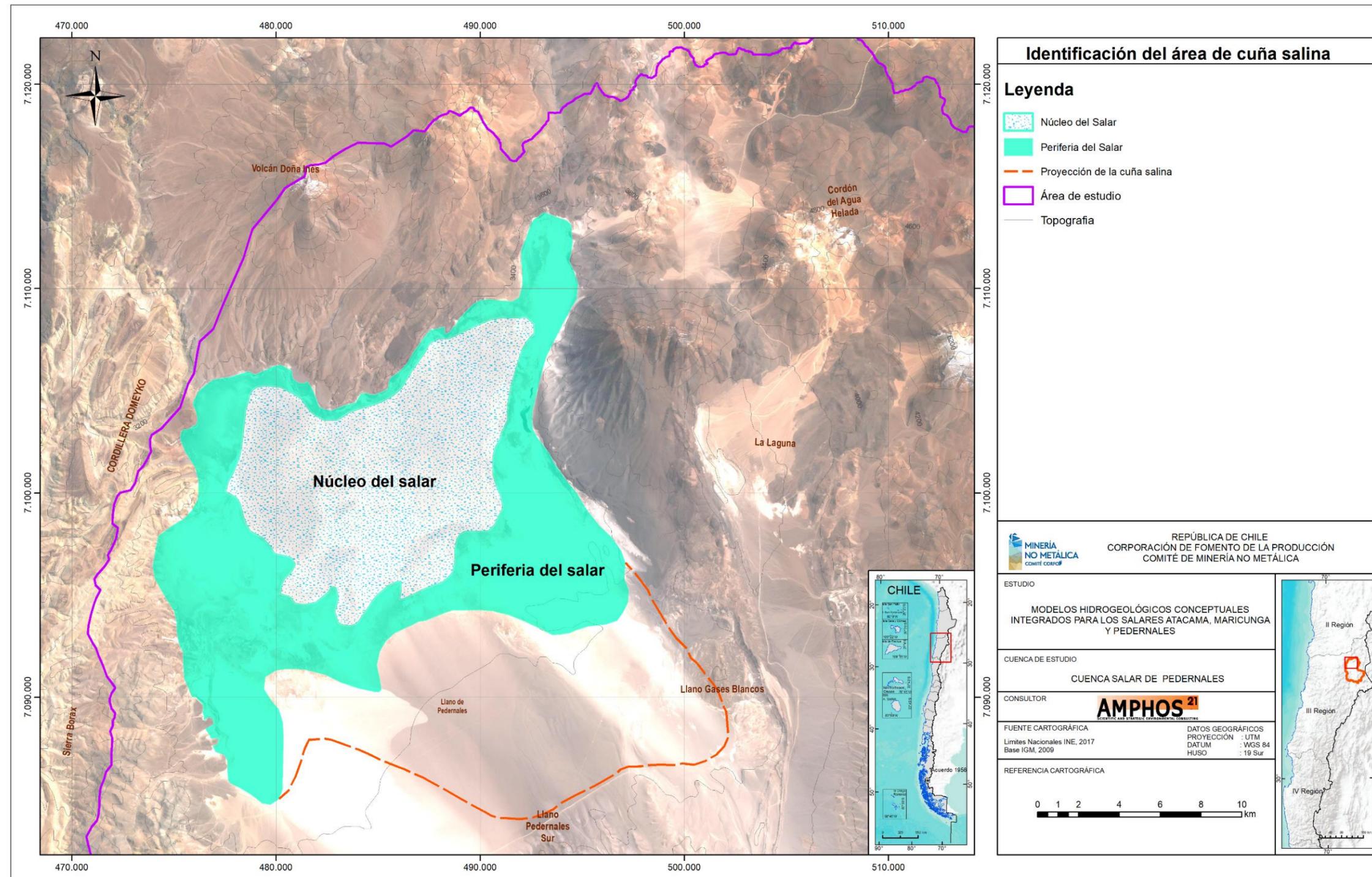


Figura 5-11 Identificación de áreas del salar y salmuera.

Fuente: elaboración propia.

### 5.3.3 Geometría de los acuíferos y 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.

El modelo hidrogeológico planteado hasta el momento, cuyo detalle y conceptos básicos se muestran en la tabla Tabla 5-5 y Figura 5-3, se ha simplificado y agrupado en “sistemas acuíferos”, debido a que existen acuíferos con propiedades similares que se encuentran conectados. De esta manera, se han definido 4 volúmenes, uno correspondiente al sistema acuífero no consolidado (UH 1 y 2), otro que representa al sistema acuífero fracturado (UH 3 y 4), un tercer volumen correspondiente a la costra salina fracturada (UH 3) y por último el basamento (UH 5 y 6). En la Figura 5-12 se observa una vista en planta de los volúmenes construidos, incluido el basamento y en la Figura 5-13 únicamente los volúmenes 1, 2 y 3 que representan el sistema acuífero. Para observar con mayor detalle las características de los volúmenes se han realizado perfiles de corte del modelo 3D: 10 perfiles con orientación E-W (cada 8 Km), 10 perfiles con orientación N-S (cada 5 Km) y un perfil en la dirección SE-NW, todos ellos se encuentran en el Anexo VI-03. En el presente informe se han mostrado los más representativos. La escala vertical de los perfiles que se encuentran en el anexo está exagerada x3.

- **Volumen 1, acuífero no consolidado:** Acuífero conformado por sedimentos no consolidados ubicado a lo largo de la cuenca en estudio formado principalmente por sedimentos detríticos aluviales y coluviales que corresponden a las Unidades Hidrogeológicas 1 y 2. Sus espesores van de 400 a 500 m en la zona del Salar de Pedernales (Figura 5-14, Figura 5-15), 30 a 80 m en los sectores de La Ola y Leoncito, respectivamente, en donde se estrecha en planta su extensión considerablemente (Figura 5-16, Figura 5-17). Por último, las potencias del acuífero no consolidado van de 30 a 50 m en el Llano Los Arroyos (Figura 5-18). Nótese cómo en este sector el espesor del sistema acuífero fracturado predomina frente al no consolidado. Finalmente, el volumen calculado, mediante *Leaprog* para el acuífero no consolidado en toda la cuenca, es de 110.570 hm<sup>3</sup> (siendo el volumen saturado de 73.134 hm<sup>3</sup>).
- **Volumen 2, acuífero fracturado:** Este acuífero engloba las Unidades Hidrogeológicas 3 y 4 representadas por materiales consolidados fracturados tales como ignimbritas y tobas. En la zona N -Llano de Pedernales- tiene potencias de 200 a 300 m (Figura 5-15). Más hacia el sur, en La Ola las potencias son aproximadamente de 200 m (Figura 5-16) y en la zona meridional de la cuenca destaca el fracturado frente a los materiales no consolidados, con espesores de hasta 300 m (Figura 5-18). El volumen calculado a partir de *Leapfrog* es de 219.280 Hm<sup>3</sup> (siendo el volumen saturado de 175.070 hm<sup>3</sup>).

- **Volumen 3, costra salina fracturada:** se trata del menor de los volúmenes, se sitúa aflorando en la zona meridional del Salar de Pedernales y está formado por depósitos evaporíticos fracturados con espesores que van de 20 a 30 m de profundidad (Figura 5-14). El volumen calculado del *Leapfrog* es próximo a 1.870 hm<sup>3</sup> (siendo el volumen saturado de aproximadamente 1.684 hm<sup>3</sup>). Estos depósitos de halita pueden alcanzar los 200-300 metros pero en profundidad se encuentran mezclados con finos por ello se han considerado en el Volumen 1 y no en el 3.

**Volumen 4, basamento:** Forma la base poco permeable de la cuenca, está constituido por las Unidades Hidrogeológica 5 y 6 y sobre él se disponen los 3 volúmenes acuíferos ya descritos. En la zona septentrional de la cuenca se encuentra a 700-800 m de profundidad, en la zona central de La Ola a unos 300 m (Figura 5-16), mientras que en el sector meridional; a 250 m aproximadamente (Figura 5-18). El volumen del basamento es próximo a 6.008.200 hm<sup>3</sup>, 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.

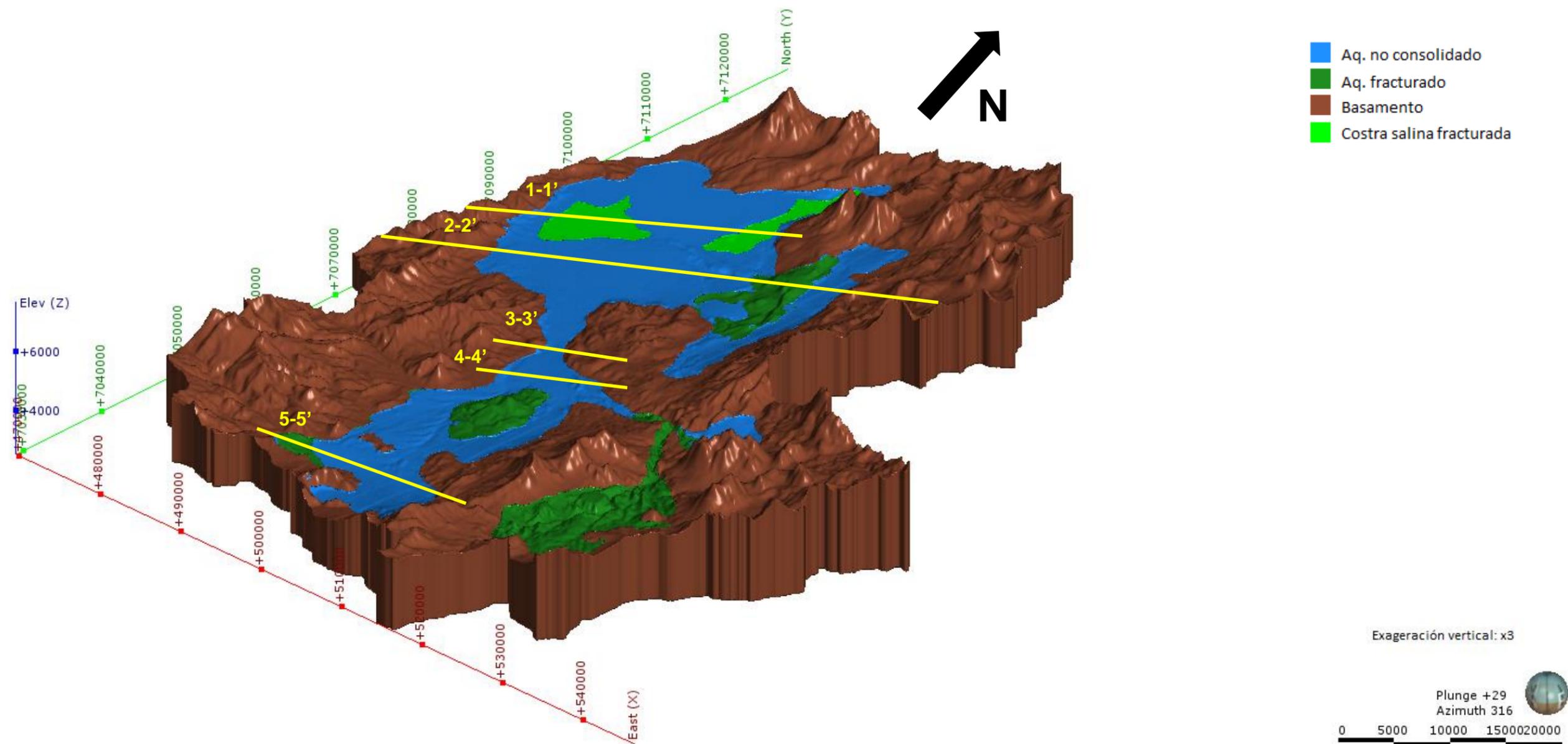


Figura 5-12. Vista 3D de los volúmenes de la cuenca.

Fuente: elaboración propia.

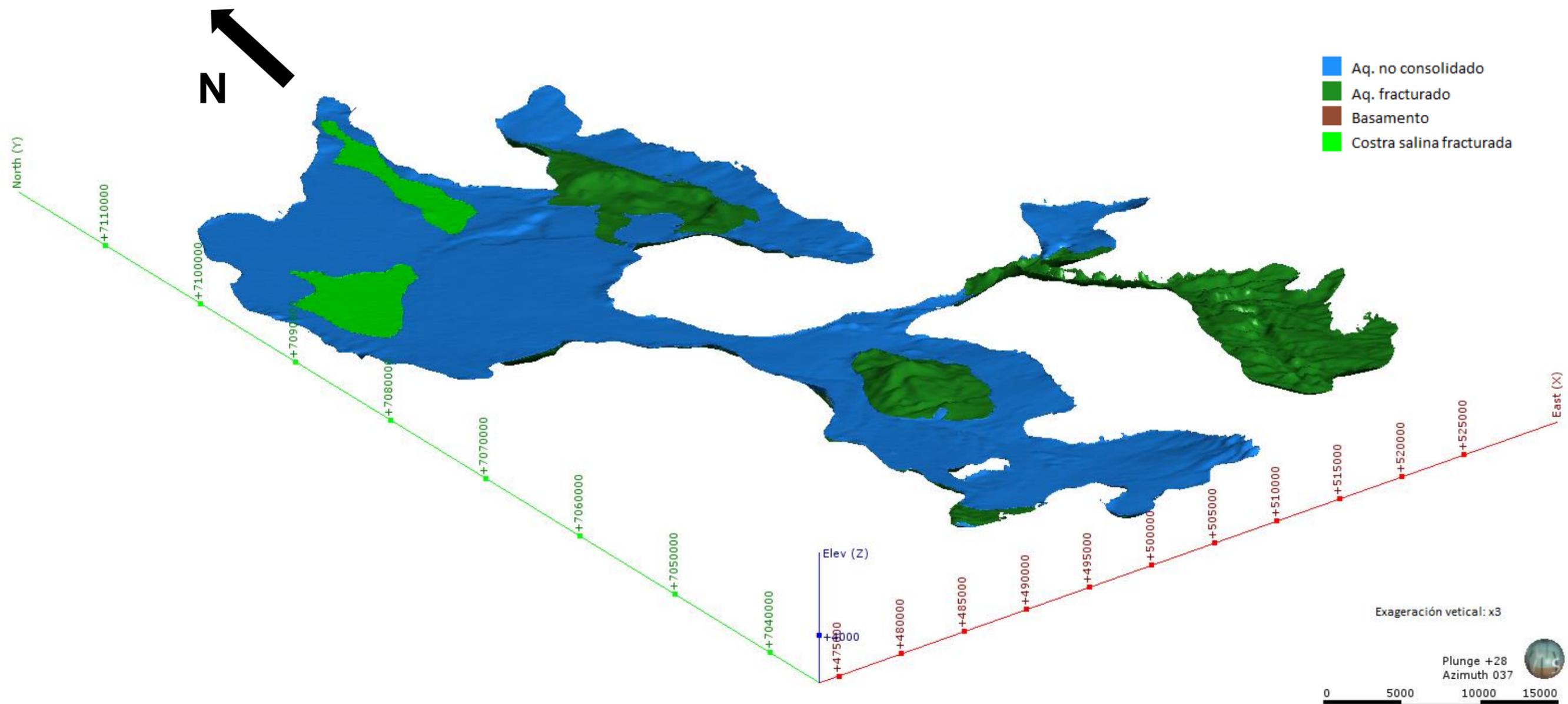


Figura 5-13. Vista 3D de los volúmenes acuíferos de la cuenca.

Fuente: elaboración propia.

### Perfil 1-1'

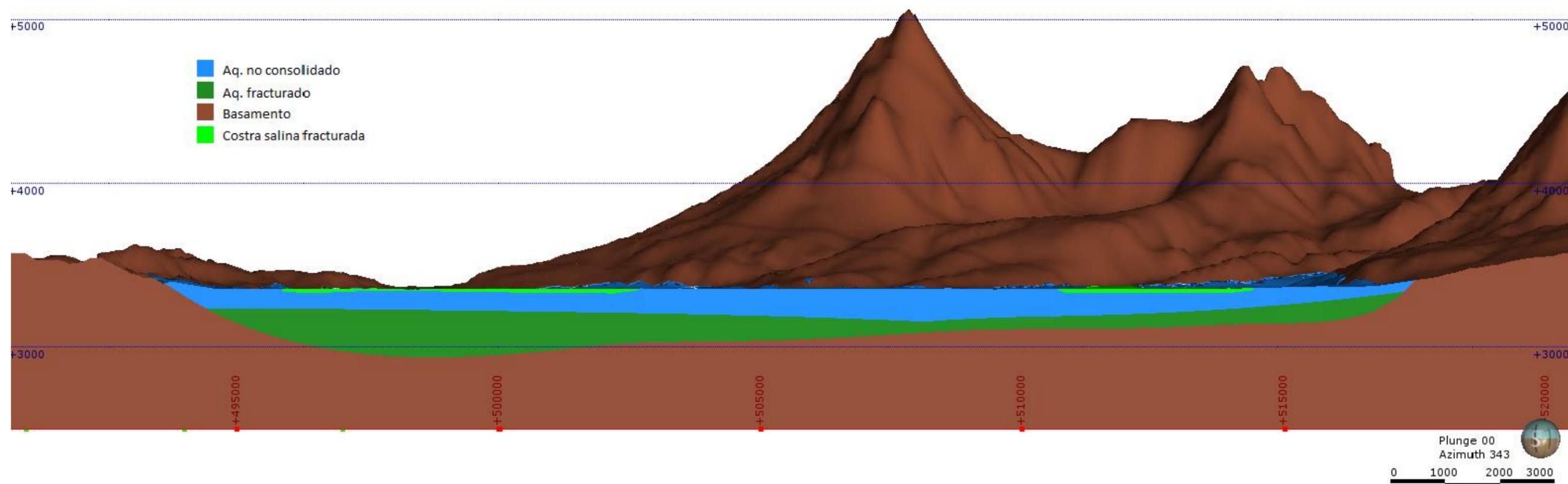


Figura 5-14. Corte hidrogeológico 1-1' Leapfrog SW-NE zona Salar de Pedernales. Exageración vertical: x3.

Fuente: elaboración propia.

### Perfil 2-2'

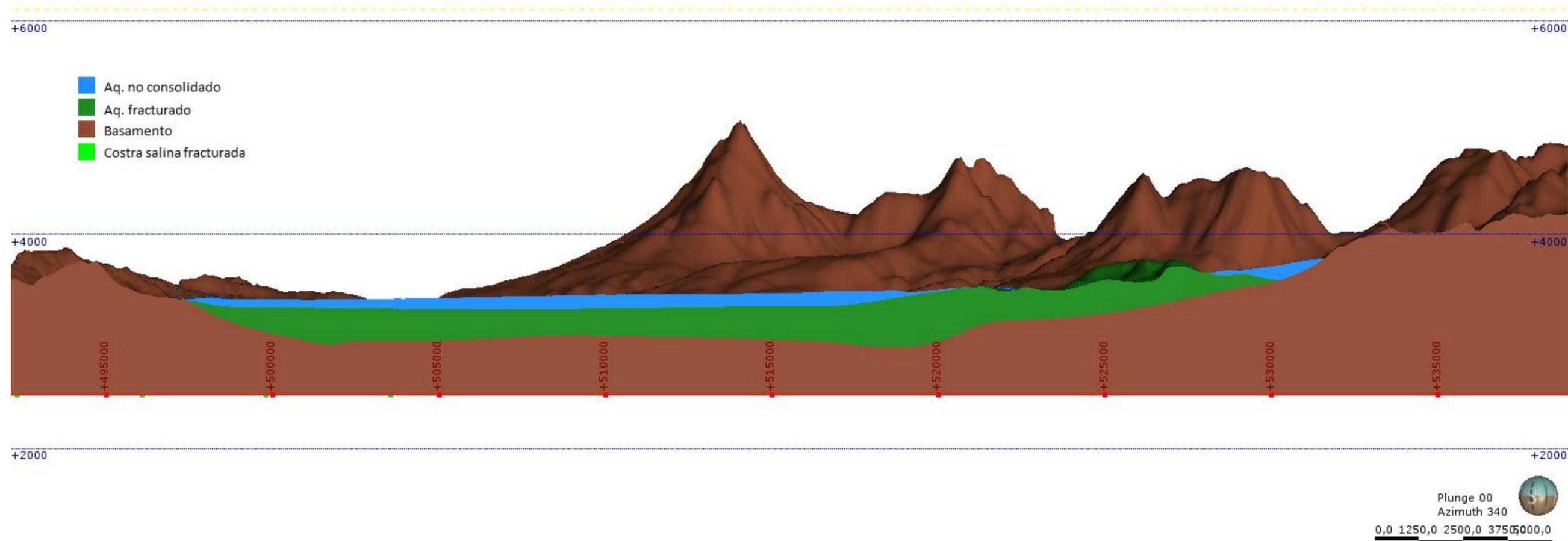


Figura 5-15. Corte hidrogeológico 2-2' Leapfrog SW-NE zona Llano de Pedernales. Exageración vertical: x3.  
Fuente: Elaboración propia.

### Perfil 3-3'

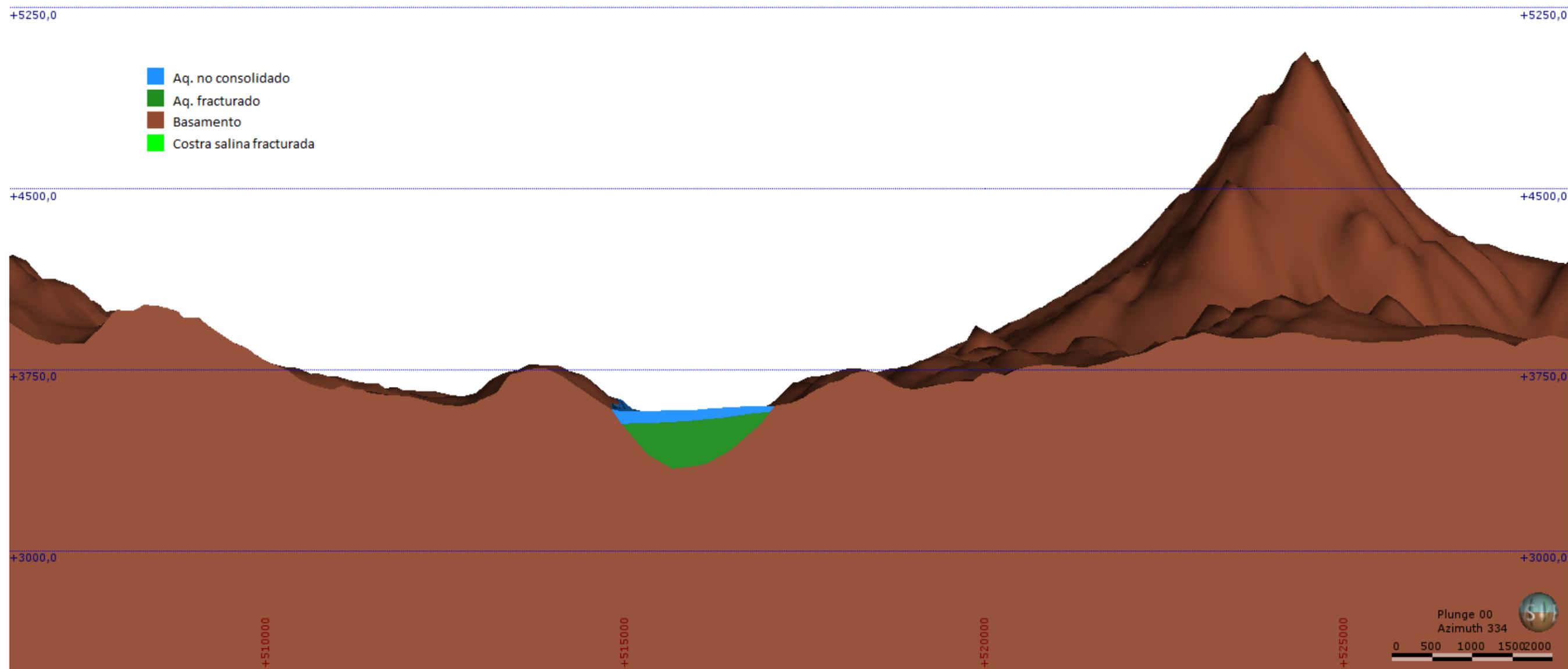


Figura 5-16. Corte hidrogeológico 3-3' Leapfrog W-E zona La Ola. Exageración vertical: x3

Fuente: Elaboración propia.

Perfil 4-4'

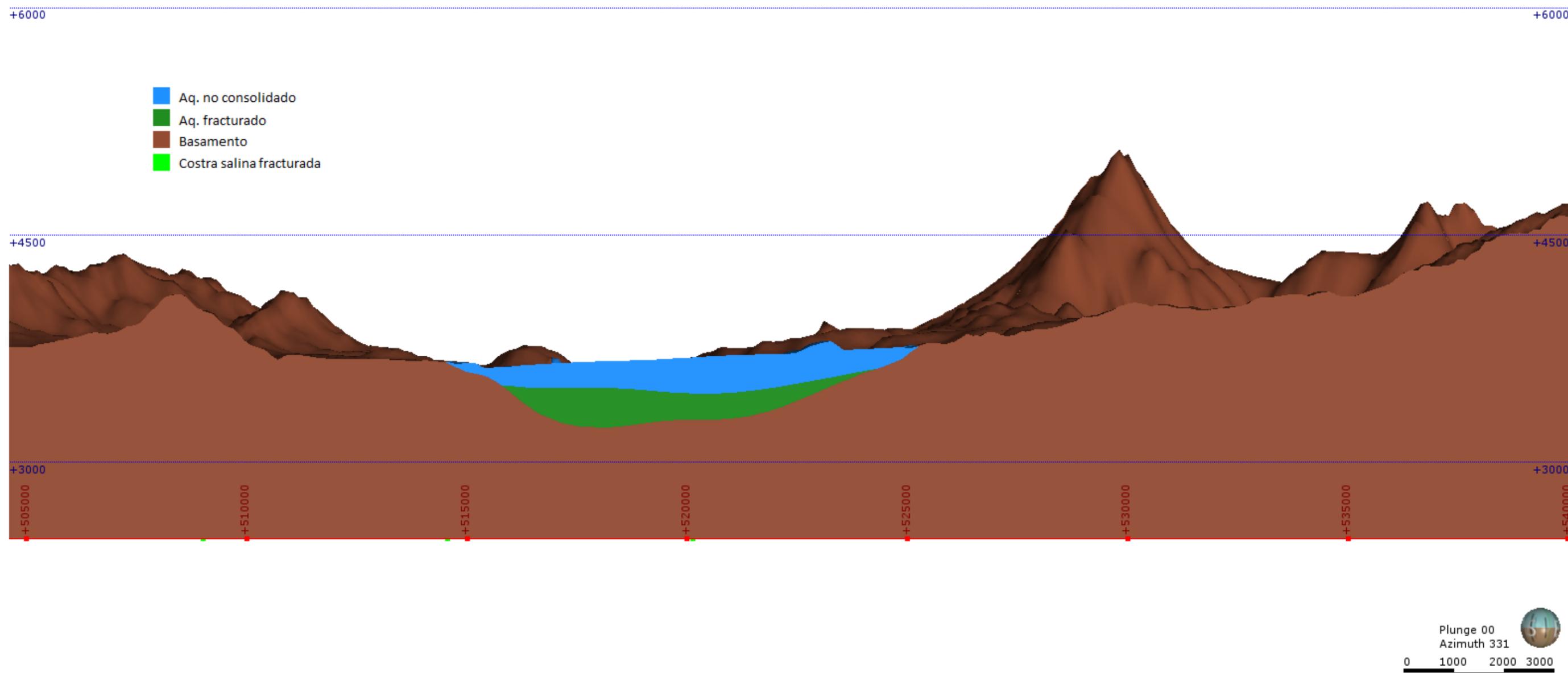


Figura 5-17. Corte hidrogeológico 4-4' Los Pajaritos SW-NE zona Los Leoncitos. Exageración vertical: x3.

Fuente: elaboración propia.

### Perfil 5-5'

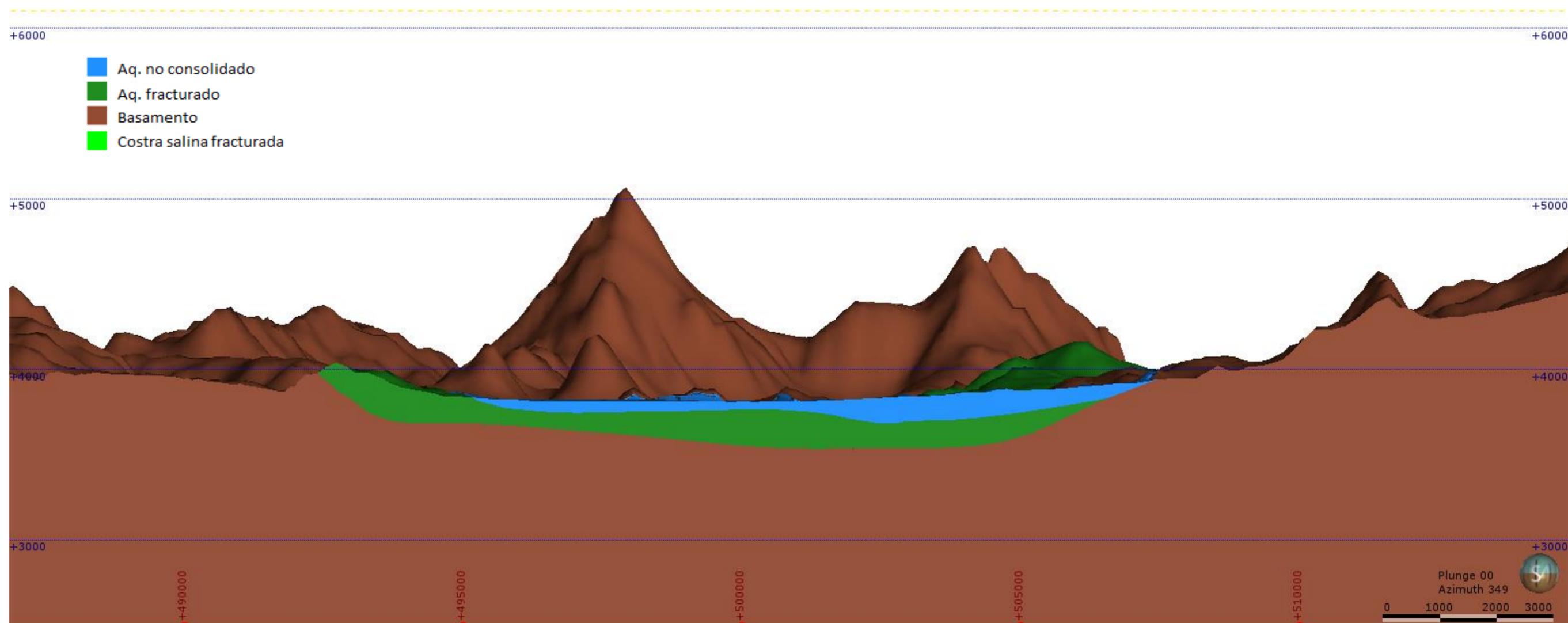


Figura 5-18. Corte hidrogeológico 5-5' Leapfrog W-E zona Llano de los Arroyos. Exageración vertical: x3.

Fuente: elaboración propia.

### 5.3.3.1 Perfiles Hidrogeológicos

Con el objetivo de comprender la extensión en profundidad de las Unidades Hidrogeológicas se han realizado 3 perfiles hidrogeológicos esquemáticos de la zona de estudio (Figura 5-19, Figura 5-20 y Figura 5-21):

- Perfil Hidrogeológico A-A': Este perfil tiene una extensión W-E de 25 km y está situado en la zona septentrional de la cuenca de estudio, en el Salar de Pedernales. En la zona central del perfil se observa la presencia en superficie de los materiales evaporíticos de la UH 2 con una potencia de 150 m a 200 m. Además, se observan pequeños afloramientos de material evaporítico fracturado correspondiente a la UH 3 con un espesor de 10 m a 20 m. Estos materiales evaporíticos se acuñan en los márgenes, concretamente en el margen este se observa como limitan con los materiales de la UH5 de baja importancia hidrogeológica los cuales a su vez, infrayacen a materiales coluviales de la UH 1 que proceden de la disgregación de material en las quebradas adyacentes al salar. Estratigráficamente debajo del salar, se encuentran los materiales de la UH 4 y UH 5, afectados por cabalgamientos inversos dirección O-E a causa de la tectónica regional. La UH4 presenta potencias de 100 m a 300 m. El nivel piezométrico es muy somero a lo largo de todo el perfil, de media se sitúa a 3 m de profundidad.
- Perfil Hidrogeológico B-B': Este perfil con dirección O-E se sitúa en la zona N-O de la cuenca, zona de conexión subterránea entre las cuencas hidrográficas Pedernales-La Laguna. Al este del perfil afloran los materiales de la UH 5 topográficamente más elevados con espesores superiores a los 300 m. Hacia el oeste, los materiales de la UH 4 se asientan sobre los anteriores con espesores de al menos 300 m a 350 m. La UH1 aflora en superficie en la zona más deprimida en el margen oeste y también se observa como se ha depositado en el flanco oeste de las laderas, con potencias que van de 60 m a 200 m. El nivel piezométrico se encuentra a una profundidad de 80 m a 100 m al este del perfil, en la zona de los gases blancos corta la topografía y aflora dando lugar a manantiales, por último en el sector más
- Perfil Hidrogeológico C-C': Está situado en el límite meridional de la zona de estudio con dirección suroeste-noreste. En este perfil se puede destacar que los materiales no consolidados de la UH 1 tienen una extensión menor en profundidad respecto a las tobas y rocas ígneas fracturadas de las unidades UH 4 y UH 5. Lateralmente, la UH 1 se extiende 9 km con potencias que van de los 50 m a 80 m. En los márgenes del perfil, se alcanzan las quebradas constituidas por materiales más consolidados de la UH 4 y UH 5 con potencias de 150 m y al menos 300 m respectivamente. El nivel piezométrico se sitúa en los materiales consolidados de la UH4 y UH5 a una profundidad media de 90 m a 110 m.

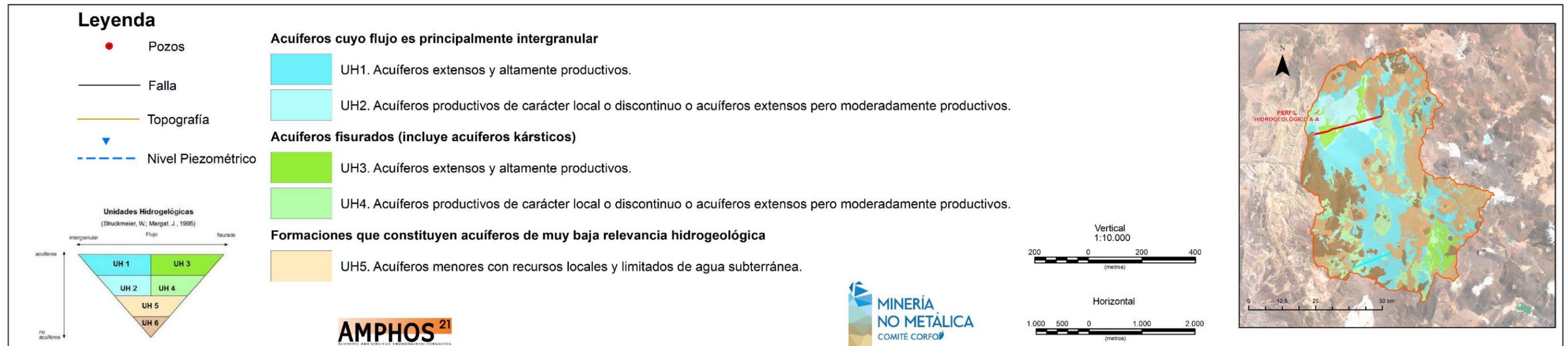
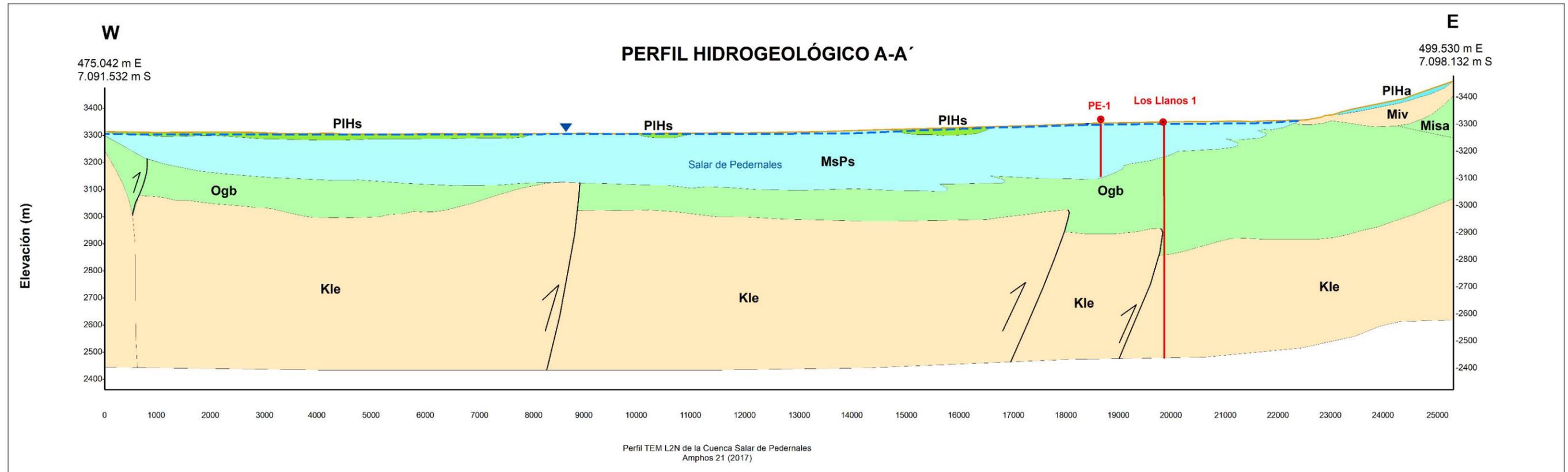


Figura 5-19. Corte hidrogeológico A-A' zona Salar de Pedernales.

Fuente: elaboración propia.

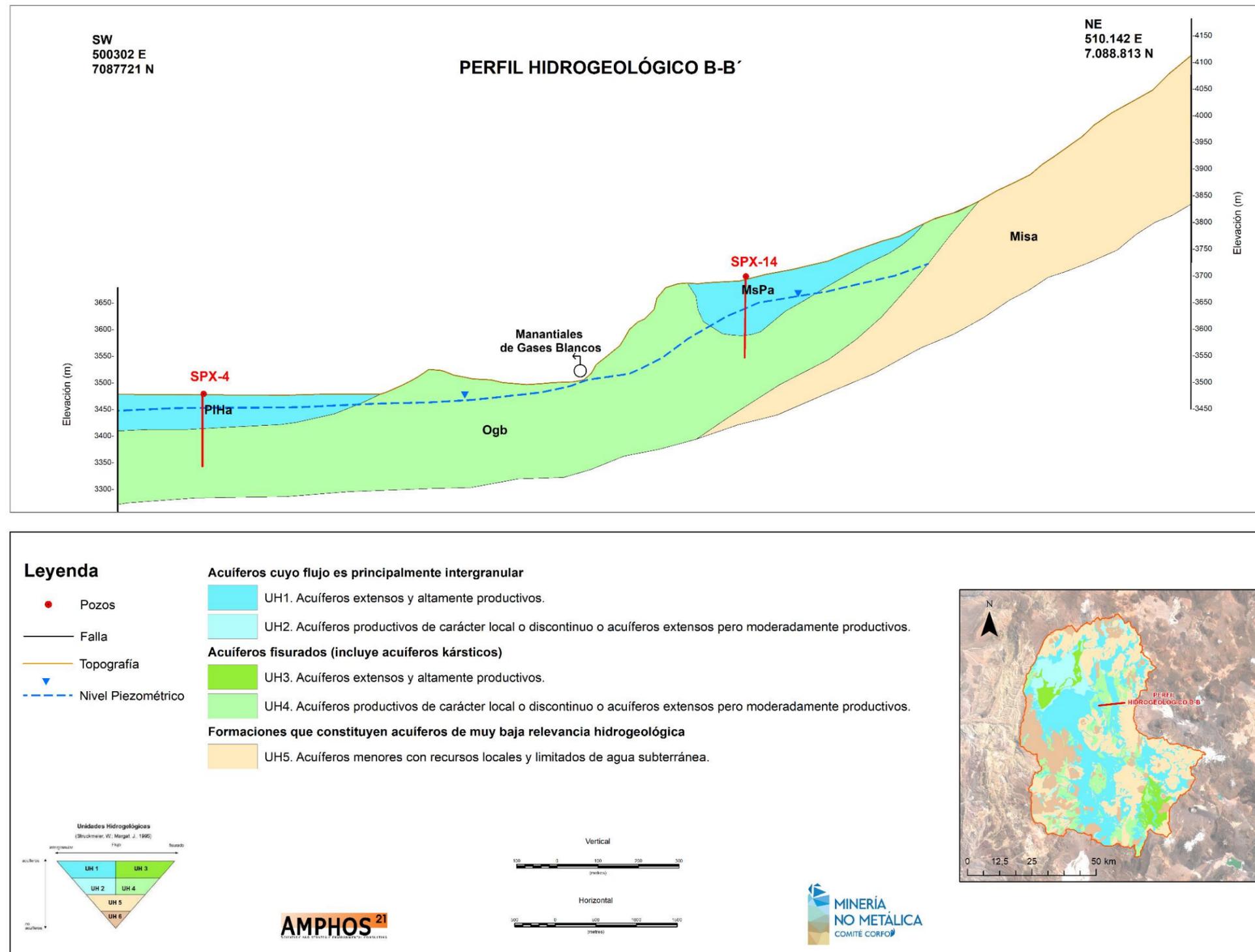
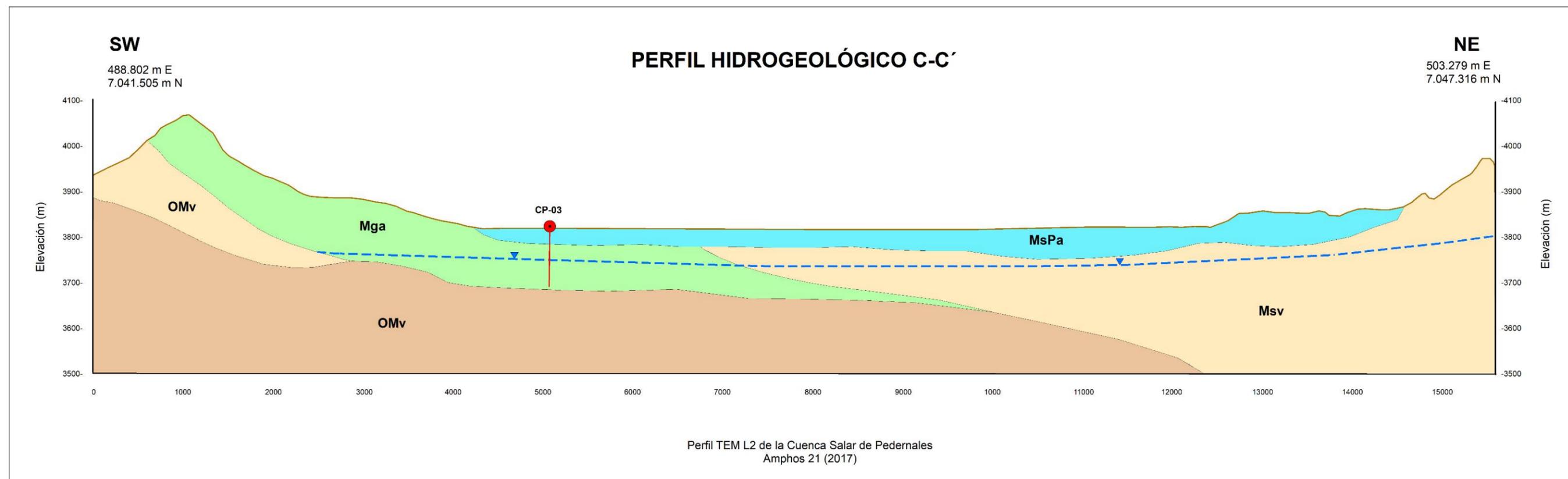


Figura 5-20. Corte hidrogeológico B-B' zona Pedernales-La Laguna

Fuente: elaboración propia.



**Leyenda**

- Pozo\_CP-03
- Topografía
- - - Nivel Piezométrico

**Acuíferos cuyo flujo es principalmente intergranular**

UH1. Acuíferos extensos y altamente productivos.

**Acuíferos fisurados (incluye acuíferos kársticos)**

UH4. Acuíferos productivos de carácter local o discontinuo o acuíferos extensos pero moderadamente productivos.

**Formaciones que constituyen acuíferos de muy baja relevancia hidrogeológica**

UH5. Acuíferos menores con recursos locales y limitados de agua subterránea.

UH6. Formaciones esencialmente sin recursos de agua subterránea.

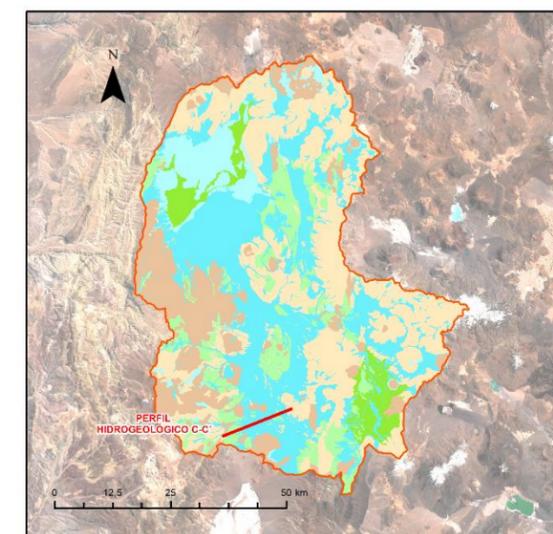
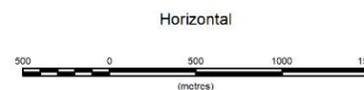
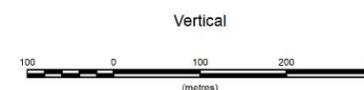
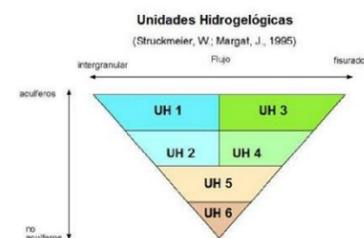


Figura 5-21. Perfil hidrogeológico C-C' zona Llano de los Arroyos.

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 (fases anteriores, EIA o DIA de proyectos mineros, expedientes otorgados por la DGA), así como los nuevos catastrados en la campaña de terreno de la Fase 3 del proyecto DGA realizado por Amphos 21 (P\_REF.073 y P\_REF.074, 2016).

Adicionalmente, en la base de datos de los niveles (Anexo 1) se han añadido diversos puntos de humedales (alimentados por agua subterránea) identificados mediante imágenes satelitales. La finalidad ha sido la obtención de cotas piezométricas adicionales y de esta manera complementar la generación de isopiezas para determinar el funcionamiento hidrogeológico de la cuenca.

El inventario de niveles de agua existentes en la zona de estudio está conformado por un total de 133 puntos distribuidos de la siguiente forma:

- 123 subterráneos de los cuales 18 son calicatas, 98 son piezómetros y 7 son pozos de producción.
- 10 son humedales, manantiales o lagunas.

En la Tabla 5-7 se muestra un listado de todos los puntos estudiados, en la que aparecen sus coordenadas, su tipología, el número de medidas del nivel piezométrico disponibles, y el rango temporal en el que éstas se han efectuado.

La mayor concentración de puntos de agua subterránea se sitúa en la zona septentrional de la cuenca. Los pozos-piezómetros están distribuidos en el mismo salar de Pedernales, en el Llano Pajaritos, Llano Pedernales Sur y en Llano de Agua Helada y las calicatas se localizan alrededor del límite del salar. En la zona central, los puntos de agua se encuentran principalmente en el Llano de La Ola y Llano de Leoncito. Y en la zona sur, se encuentran más dispersos y representados principalmente por piezómetros de mayor profundidad. En la Figura 5-22 se puede observar la distribución espacial en la cuenca del Salar de Pedernales de los puntos de agua con información de nivel.

CÓDIGO POZO	COORDENADAS WGS84			CONTROL PIEZOMÉTRICO			
	NORTE	ESTE	COTA (msnm)	Tipo de punto	Número de datos	Rango de fechas	
B-2	484840,8	7085752,6	3411,0	Pozo-Piezómetro	2	25-03-2003	10-03-2014
B-4	489516,2	7081315,4	3486,0	Pozo-Piezómetro	2	25-03-2003	11-03-2014
B-5	482359,0	7084412,0	3399,1	Pozo de producción	1	08-05-1982	
B-6	481929,0	7084736,0	3392,0	Pozo de producción	2	01-04-1977	01-08-1982
B-7	482239,0	7085186,0	3390,2	Pozo de producción	2	01-08-1982	01-10-1982
BJ-01	512091,0	7068128,0	3919,5	Pozo-Piezómetro	1	21-02-2016	
BJ-02	512089,0	7068120,0	3920,0	Pozo-Piezómetro	1	21-02-2016	
BJ-03	512000,0	7068115,0	3919,5	Pozo-Piezómetro	1	21-02-2016	
CC1	475960,4	7089724,8	3356,8	Pozo-Piezómetro	1	01-01-2009	
CC10	483034,5	7092144,5	3351,7	Pozo-Piezómetro	1	01-01-2009	
CC11	484525,9	7093364,6	3354,1	Pozo-Piezómetro	1	01-01-2009	
CC12	485267,9	7095330,1	3352,2	Pozo-Piezómetro	1	01-01-2009	
CC13	486171,0	7094070,0	3360,0	Pozo-Piezómetro	1	01-01-2009	
CC15	488193,1	7095754,2	3352,3	Pozo-Piezómetro	1	01-01-2009	
CC17	494753,7	7093413,1	3393,0	Pozo-Piezómetro	1	01-01-2009	
CC2	475492,9	7093095,2	3353,7	Pozo-Piezómetro	1	01-01-2009	
CC21	492604,4	7099456,2	3351,4	Pozo-Piezómetro	1	01-01-2009	
CC22	492844,0	7100684,0	3351,0	Pozo-Piezómetro	1	01-01-2009	
CC24	486718,3	7106701,3	3362,0	Pozo-Piezómetro	1	01-01-2009	
CC26	490123,5	7108975,0	3362,0	Pozo-Piezómetro	1	01-01-2009	
CC27	492747,9	7110027,3	3360,0	Pozo-Piezómetro	1	01-01-2009	
CC28	492437,3	7106392,0	3349,9	Pozo-Piezómetro	1	01-01-2009	
CC29	492308,0	7102515,5	3350,3	Pozo-Piezómetro	1	01-01-2009	
CC3	475977,4	7095007,6	3351,6	Pozo-Piezómetro	1	01-01-2009	
CC4	475140,0	7095400,0	3355,0	Pozo-Piezómetro	1	01-01-2009	
CC8	481037,7	7090102,6	3356,4	Pozo-Piezómetro	1	01-01-2009	
Chimberos	485491,0	7053134,0	3766,0	Pozo-Piezómetro	1	28-08-1997	
CP-01A	494110,7	7058035,1	3662,0	Pozo-Piezómetro	1	01-01-2013	
CP-01B	494129,2	7058049,8	3673,0	Pozo-Piezómetro	1	01-01-2013	
CP-02	502239,5	7064854,2	3732,3	Pozo-Piezómetro	1	01-01-2013	
CP-03A	504990,0	7068033,3	3806,3	Pozo-Piezómetro	1	01-10-2016	
CP-04A	493780,8	7051547,5	3723,3	Pozo-Piezómetro	1	01-01-2013	
CP-05	502842,1	7051702,7	3908,2	Pozo-Piezómetro	1	01-01-2013	
CP-05B	502824,7	7051705,7	3907,3	Pozo-Piezómetro	1	01-01-2013	
CP-06	493448,6	7043349,5	3806,5	Pozo-Piezómetro	1	01-01-2013	
CP-07	503316,3	7043082,4	3919,6	Pozo-Piezómetro	1	01-01-2013	
CP-08	503724,2	7038660,2	4036,7	Pozo-Piezómetro	1	01-01-2013	
CP-09	504870,4	7058107,3	3944,1	Pozo-Piezómetro	1	01-10-2016	
CP-10	519261,1	7047649,3	4223,7	Pozo-Piezómetro	1	01-01-2013	
CP-10B	519199,2	7047716,8	4224,4	Pozo-Piezómetro	1	01-01-2013	
CP-13	492131,4	7038887,5	3875,3	Pozo-Piezómetro	1	01-01-2013	
E-1'	485391,0	7088451,0	3395,8	Pozo-Piezómetro	2	01-01-1976	
E-2'	483030,0	7084666,0	3402,3	Pozo-Piezómetro	2	01-01-1976	
E-7a	484100,8	7082987,4	3428,7	Pozo-Piezómetro	2	19-12-2014	
HAC-15	495437,0	7064800,0	3634,2	Humedal	1	01-10-2016	
HAC-30	500938,0	7065260,0	3725,0	Humedal	1	01-10-2016	01-05-2003
HAC-37	512927,0	7095417,0	4141,0	Manantiales	1	01-10-2016	01-05-2003

Tabla 5-7. Puntos de agua con información de nivel.

CÓDIGO POZO	COORDENADAS WGS84			CONTROL PIEZOMÉTRICO			
	NORTE	ESTE	COTA (msnm)	Tipo de punto	Número de datos	Rango de fechas	
HAC-38	508236,0	7095340,0	3850,0	Manantiales	1	01-10-2016	20-10-2016
J-1	494611,0	7073087,0	3576,3	Pozo-Piezómetro	2	25-09-2003	
J-2	494200,0	7074730,0	3567,0	Pozo-Piezómetro	1	25-09-2003	
J-3	498113,8	7069987,4	3667,1	Pozo-Piezómetro	3	01-01-1982	
J-3'	498128,0	7069977,0	3667,8	Pozo-Piezómetro	1	25-09-2003	
J-4	498164,0	7069963,0	3673,0	Pozo-Piezómetro	2	04-02-1982	01-10-2016
J-4'	498164,0	7069972,0	3668,9	Pozo-Piezómetro	2	04-02-1982	
J-5	500250,0	7070130,0	3697,0	Pozo-Piezómetro	1	25-09-2003	21-03-2014
J-6	495090,0	7070810,0	3600,0	Pozo-Piezómetro	1	25-09-2003	
J-7	493069,5	7073532,0	3553,9	Pozo-Piezómetro	2	12-04-1982	25-09-2003
LAGPED-02	503250,3	7090832,3	3519,9	Humedal	1	01-10-2016	25-09-2003
LGN.F001	502514,0	7100317,0	3503,0	Pozo-Piezómetro	1	01-10-2016	
LGN.F003	501678,0	7102032,0	3508,4	Manantiales	1	01-10-2016	
P-1	479321,0	7087069,0	3369,6	Pozo-Piezómetro	2	01-05-2003	12-03-2014
P-1 Anglo	492126,0	7057821,0	3672,9	Pozo de producción	1	10-03-2014	
P-18	484438,0	7090212,0	3373,3	Pozo-Piezómetro	1	01-07-2003	
P-19a	480343,5	7085059,5	3378,5	Pozo-Piezómetro	2	25-09-2003	
P-2	482731,0	7089164,0	3367,0	Pozo-Piezómetro	1	01-05-2003	10-03-2014
P-2 Anglo	492234,2	7057716,7	3672,9	Pozo de producción	1	01-05-2003	
P-4	482080,0	7086418,0	3379,5	Pozo-Piezómetro	2	01-01-1976	
P-4a	481828,3	7086312,1	3377,9	Pozo-Piezómetro	2	25-09-2003	17-12-2014
P-5a	483761,6	7087465,8	3385,7	Pozo-Piezómetro	2	25-09-2003	
P-7	481406,0	7083669,0	3397,0	Pozo-Piezómetro	2	01-01-1976	01-05-2003
P-7a	481357,8	7083490,0	3397,6	Pozo-Piezómetro	2	25-09-2003	17-12-2014
P-8	484842,0	7085766,0	3407,9	Pozo-Piezómetro	2	01-01-1976	01-05-2003
PB-1	494921,0	7068711,0	3619,1	Pozo-Piezómetro	1	02-06-1982	18-12-2014
PB-10	480320,0	7085031,0	3379,9	Pozo-Piezómetro	2	14-09-2001	01-05-2003
PB-11	479586,7	7084362,2	3384,3	Pozo-Piezómetro	2	01-10-2001	19-12-2014
PB-12	480891,2	7085689,5	3379,0	Pozo-Piezómetro	2	30-10-2001	01-05-2003
PB-13	481510,0	7083382,0	3400,6	Pozo-Piezómetro	1	08-05-2002	
PB-14	501292,7	7103430,6	3523,8	Pozo-Piezómetro	2	02-11-2002	14-09-2001
PB-15	494579,5	7073061,5	3574,6	Pozo-Piezómetro	2	05-12-2003	10-03-2014
PB-5	482368,0	7084379,0	3399,9	Pozo-Piezómetro	1	13-01-1983	19-12-2014
PB-6	481946,0	7084712,0	3392,8	Pozo-Piezómetro	1	24-08-1982	
PB-7	482251,0	7085150,0	3391,0	Pozo-Piezómetro	1	10-10-1982	26-09-2016
PB-8	481605,0	7084342,5	3395,1	Pozo-Piezómetro	2	31-01-1986	12-03-2014
PB-9	480292,7	7084339,3	3384,2	Pozo-Piezómetro	2	23-09-1999	
PE-1	490324,5	7095987,1	3356,5	Pozo-Piezómetro	1	05-12-2003	
PE-2	491914,3	7089950,7	3426,4	Pozo-Piezómetro	1	05-12-2003	
PE-3	499089,9	7053167,1	3772,8	Pozo-Piezómetro	2	05-12-2003	01-05-2003
PED-14	476511,0	7086969,0	3367,0	Pozo-Piezómetro	1	13-01-2015	17-12-2014
PED-2	480482,0	7106113,0	3356,8	Pozo-Piezómetro	1	20-02-2015	
PED-6	503257,0	7090127,0	3513,8	Humedal	1	01-10-2016	
PO-1	495192,2	7070378,6	3606,4	Pozo-Piezómetro	2	25-09-2003	
PO-2	495444,6	7068119,1	3631,0	Pozo-Piezómetro	2	25-09-2003	
PO-3	497811,1	7068716,4	3670,4	Pozo-Piezómetro	2	16-03-1982	
PO-4	495560,0	7066020,0	3637,0	Pozo-Piezómetro	1	25-09-2003	

Tabla 5-7. Puntos de agua con información de nivel (continuación 1)

CÓDIGO POZO	COORDENADAS WGS84			CONTROL PIEZOMÉTRICO			
	NORTE	ESTE	COTA (msnm)	Tipo de punto	Número de datos	Rango de fechas	
PO-8	481795,1	7084711,6	3389,5	Pozo-Piezómetro	1	01-07-2003	19-12-2014
POLLP	482209,7	7084742,0	3393,1	Pozo-Piezómetro	2	25-09-2003	21-03-2014
S-1	478660,2	7101017,6	3353,4	Pozo-Piezómetro	1	01-10-2016	12-03-2014
S-10	479609,8	7101584,2	3354,6	Pozo-Piezómetro	1	19-11-1975	
S-11	477825,0	7103152,8	3350,7	Pozo-Piezómetro	1	19-11-1975	
S-2	480648,8	7100837,9	3352,5	Pozo-Piezómetro	2	24-04-2003	11-03-2014
S-3	480927,4	7103715,9	3352,4	Pozo-Piezómetro	2	24-04-2003	
S-4	478628,7	7102430,6	3353,0	Pozo-Piezómetro	1	21-03-2014	
S-6	477663,4	7101110,2	3352,7	Pozo-Piezómetro	2	24-06-2003	
S-7	479655,9	7100920,8	3352,7	Pozo-Piezómetro	2	24-06-2003	17-12-2014
S-8	480715,8	7102214,2	3355,0	Pozo-Piezómetro	1	19-11-1975	17-12-2014
S-9	480708,8	7105031,6	3353,3	Pozo-Piezómetro	2	24-06-2003	
SAACOL-790	481760,1	7083890,7	3398,5	Pozo-Piezómetro	1	28-02-1986	09-03-2014
SON-1	483659,0	7099220,0	3356,0	Pozo-Piezómetro	1	23-06-2011	08-03-2014
SON-2	485288,9	7097426,5	3358,0	Pozo-Piezómetro	1	17-12-2014	
SON-3	486953,0	7100941,0	3358,0	Pozo-Piezómetro	1	23-06-2011	01-10-2016
SON-4	486217,0	7102237,0	3356,5	Pozo-Piezómetro	1	23-06-2011	
SON-5	487638,1	7100959,4	3356,7	Pozo-Piezómetro	1	23-06-2011	
SON-6	483695,2	7101915,2	3354,0	Pozo-Piezómetro	1	01-10-2016	
SPB-1	504460,8	7078737,2	3805,6	Pozo-Piezómetro	2	25-09-2003	
SPB-10	503816,0	7094647,7	3625,1	Pozo-Piezómetro	2	21-05-2003	
SPB-13	506114,7	7089629,6	3720,2	Pozo-Piezómetro	1	01-10-2016	
SPB-14	505634,4	7086483,8	3738,4	Pozo-Piezómetro	2	25-03-1999	
SPB-16	505094,8	7082938,5	3759,0	Pozo-Piezómetro	2	25-09-2003	01-10-2016
SPB-7	505531,5	7088179,6	3709,5	Pozo-Piezómetro	2	21-05-2003	01-10-2016
SPB-8	505954,3	7090958,4	3718,7	Pozo-Piezómetro	2	21-05-2003	
SPX-1	504366,6	7078540,5	3803,4	Pozo-Piezómetro	1	18-12-2014	01-10-2016
SPX-10	503800,6	7094609,3	3624,6	Pozo-Piezómetro	1	01-10-2016	01-10-2016
SPX-13	506112,7	7089655,0	3719,5	Pozo-Piezómetro	1	01-10-2016	01-10-2016
SPX-14	505644,5	7086419,4	3740,7	Pozo-Piezómetro	2	25-09-2003	01-10-2016
SPX-16	505091,6	7082894,4	3759,0	Pozo-Piezómetro	1	01-10-2016	
SPX-2	503620,6	7080589,5	3749,3	Pozo-Piezómetro	2	25-09-2003	
SPX-3	503077,6	7082723,9	3687,9	Pozo-Piezómetro	2	25-09-2003	
SPX-4	502055,2	7085336,8	3617,6	Pozo-Piezómetro	2	25-09-2003	01-10-2016
SPX-5	500330,6	7087643,4	3543,0	Pozo-Piezómetro	1	25-09-2003	
SPX-7	505525,5	7088136,4	3710,0	Pozo-Piezómetro	1	01-10-2016	01-10-2016
SPX-8	505969,5	7090920,4	3719,0	Pozo-Piezómetro	1	01-10-2016	01-10-2016
SPX-9	504974,6	7093445,3	3674,0	Pozo-Piezómetro	2	21-05-2003	01-10-2016
Vega Laguna	507876,9	7095240,7	3811,6	Manantiales	1	01-10-2016	

Tabla 5-7: Puntos de agua con información de nivel (continuación 2).

Fuente: elaboración propia.

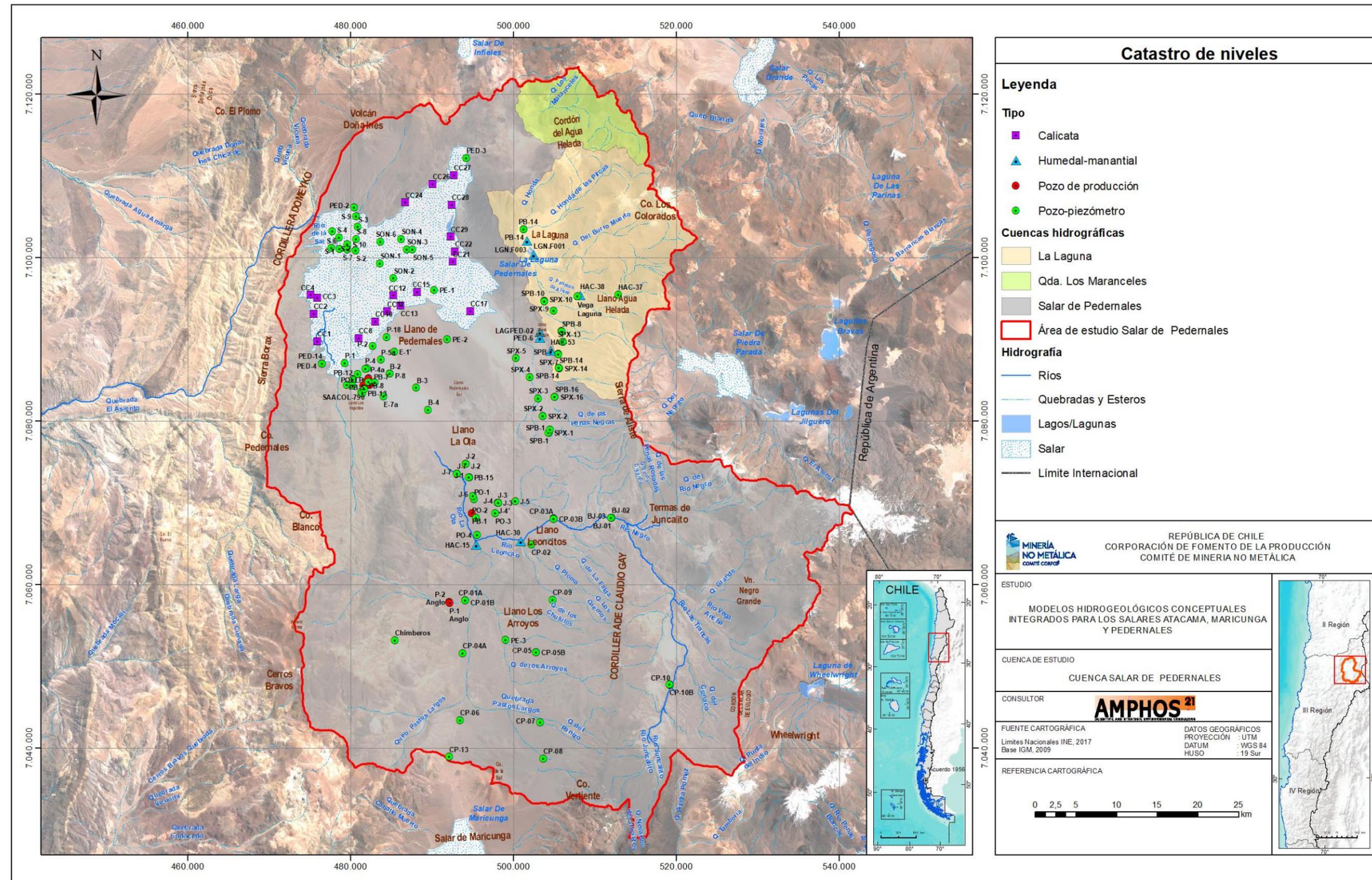


Figura 5-22. Mapa con los puntos con información de nivel agrupados por tipo de punto.

Fuente: elaboración propia.

### 5.4.2 Evolución de niveles

Se dispone de series de datos de niveles de aguas en tres pozos que permiten realizar una valoración preliminar de la evolución temporal de los niveles en el sistema acuífero de la zona de estudio. Es el caso de los pozos J-2 y J-7 que se encuentran situados en La Ola, el J-3 en Llano Leoncito (Figura 5-23) y los puntos SON-2 y SON-6 (Figura 5-24) en el Salar de Pedernales.

- J-2, J-3 y J-7: Como se observa en la Figura 5-23 no hay cambios significativos en el nivel del agua, las subidas y bajadas son centimétricas y seguramente relacionadas por cambios en la recarga o climáticos. Hay una tendencia general de estabilidad de niveles desde el año 1982 hasta 2014. Si bien es cierto que para el pozo J-3 no hay registros suficientes para hacer esta afirmación, no tiene variaciones en 2014 respecto a 1982.

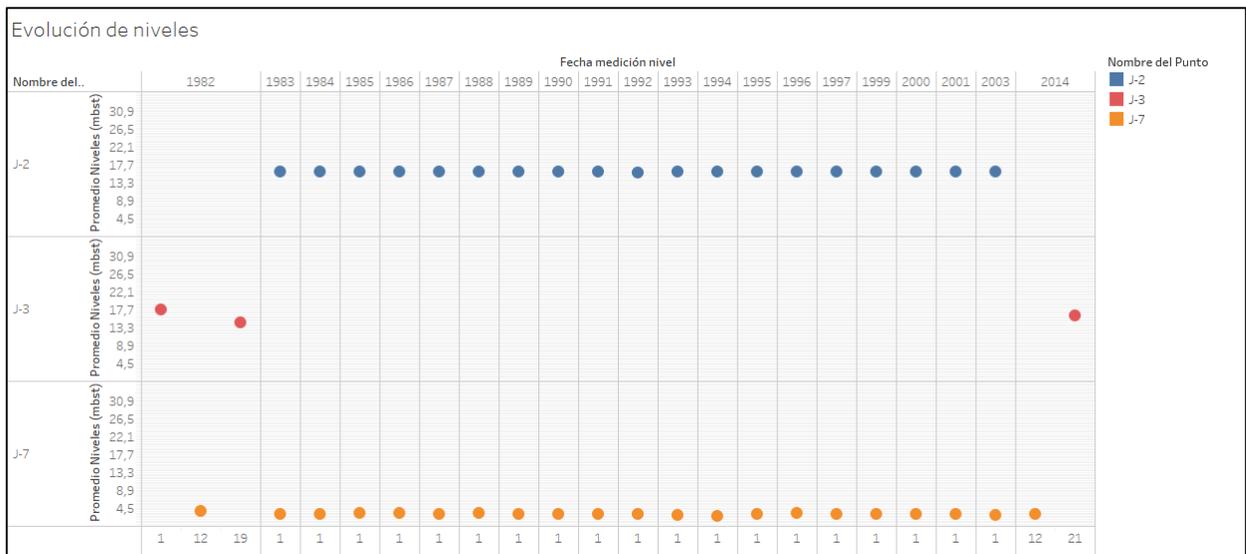


Figura 5-23. Evolución de los niveles de agua para los pozos J-2, J-3 y J-7, promedios anuales.

Ubicación: La Ola y Llano Leoncito (zona central).

Fuente: elaboración propia.

- **SON-2 y SON-6:** En el caso de estos dos pozos, las diferencias de nivel también son centimétricas, en el gráfico Figura 5-24 se observa claramente como existe una tendencia estable, por lo tanto, no se observan variaciones de niveles significativas para el período analizado, los cambios podrían deberse a cambios por la recarga o factores estacionales.

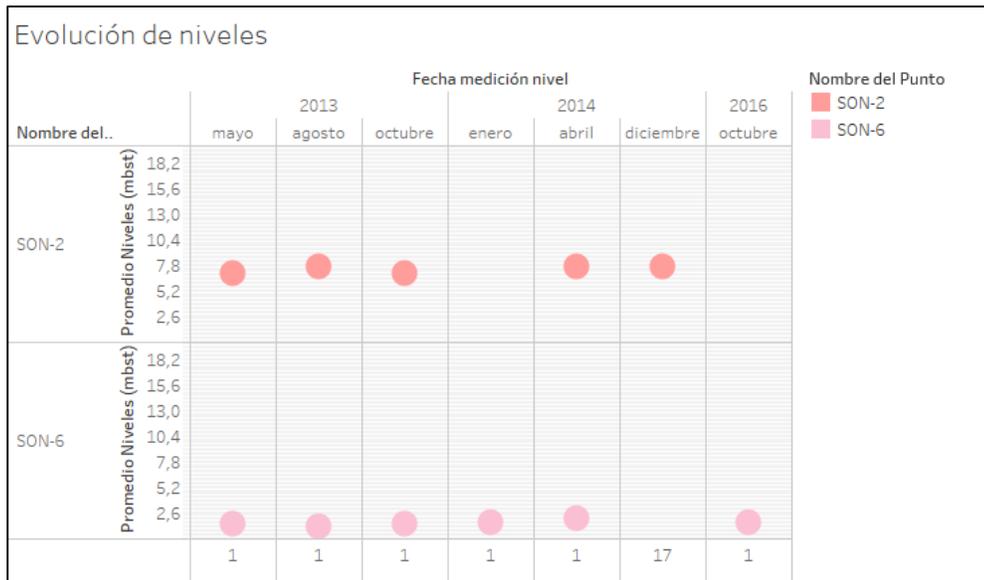


Figura 5-24. Evolución de los niveles de agua en los pozos SON-2 y SON-6.

Ubicación: Salar de Pedernales.

Fuente: elaboración propia.

### 5.4.3 Funcionamiento del flujo en la zona de estudio

A partir de toda la información de niveles de agua disponible en los antecedentes de las cuencas hidrográficas Salar de Pedernales, La Laguna y Quebrada Maranceles (base de datos catastro de puntos de agua y niveles) se ha elaborado una piezometría en el 2016 de la zona de estudio. Teniendo en cuenta que no se han observado variaciones significativas en la evolución de los niveles de agua, se han utilizado medidas piezométricas de años anteriores en otros puntos de la base de datos para poder complementar una piezometría más actual que abarque toda cuenca.

El acuífero identificado en la zona de estudio está constituido por materiales detríticos y fracturados con distintas propiedades hidráulicas, pero que muestran características similares en cuanto a su superficie piezométrica. Las isopiezas se han representado en la Figura 5-27 con una equidistancia de 20 m y se han realizado zooms de la zona N y S de la cuenca para una mejor visualización (Figura 5-25 y Figura 5-26). Cabe destacar, que en la zona del salar se han representado dos isopiezas cada 10 m para

completar la piezometría. Posteriormente, a partir de las isopiezas ya trazadas se dibujaron las principales líneas de flujo de agua subterránea en la cuenca.

Como se puede observar, 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, y disminuye a medida que la superficie alcanza cotas más bajas. De este modo, la dirección de flujo principal de la cuenca presenta a grandes rasgos una orientación SSE-NNW, desde las zonas más altas de la cuenca, hacia la depresión topográfica representada por el Salar de Pedernales.

La recarga en la cuenca se produce principalmente mediante precipitaciones (lluvia y nieve). Las zonas de recarga se localizan en las partes más elevadas (Cordillera de Domeyko y Cordillera de Claudio Gay) y posteriormente las aguas descienden hacia cotas más bajas descargando finalmente al Salar de Pedernales y lagunas (del Salar y de la Laguna):

- Destaca la confluencia entre el río Juncalito y el río Negro, donde la elevación del sustrato paleozoico (UH 6) causado por la existencia de un cabalgamiento con rumbo SW-NE, provoca el ascenso de las aguas acumuladas en la subcuenca del Juncalito y un aumento del caudal superficial del curso de agua (río Juncalito).
- Las aguas procedentes tanto de la recarga directa sobre el acuífero como de la infiltración indirecta continúan su descenso hacia las zonas bajas, alcanzando el Llano de Los Arroyos, el Llano Leoncito y el Llano La Ola (llanos formados principalmente por la UH 1) y en el caso de las aguas procedentes del norte de la Cordillera de Claudio Gay, el Llano de la Vega Helada (cuenca hidrográfica La Laguna).
- En el Llano La Ola confluyen las aguas recogidas en el sector meridional de la cuenca, que discurren tanto de forma superficial como subterránea, y en él se produce un estrechamiento de la sección de paso hacia el norte de la cuenca (presencia de tobas).
- En el funcionamiento de flujo subterráneo se ha observado la existencia de una conexión hidráulica entre el Salar de Pedernales en su borde oriental, en la zona conocida como el Llano de los Gases Blancos, y el Llano de Agua Helada, situado en el extremo nororiental de la cuenca. Se ha identificado en esta zona un acuífero constituido por materiales fracturados (UH 4) en sector de los manantiales de Gases Blancos y se ha validado con los perfiles geofísicos la continuidad de esta unidad en profundidad.
- Los cursos de agua principales, río La Ola, río El Leoncito, río Juncalito y su afluente, el río Negro, se encuentran relacionados con el sistema acuífero de manera efluente en la mayoría de los casos.

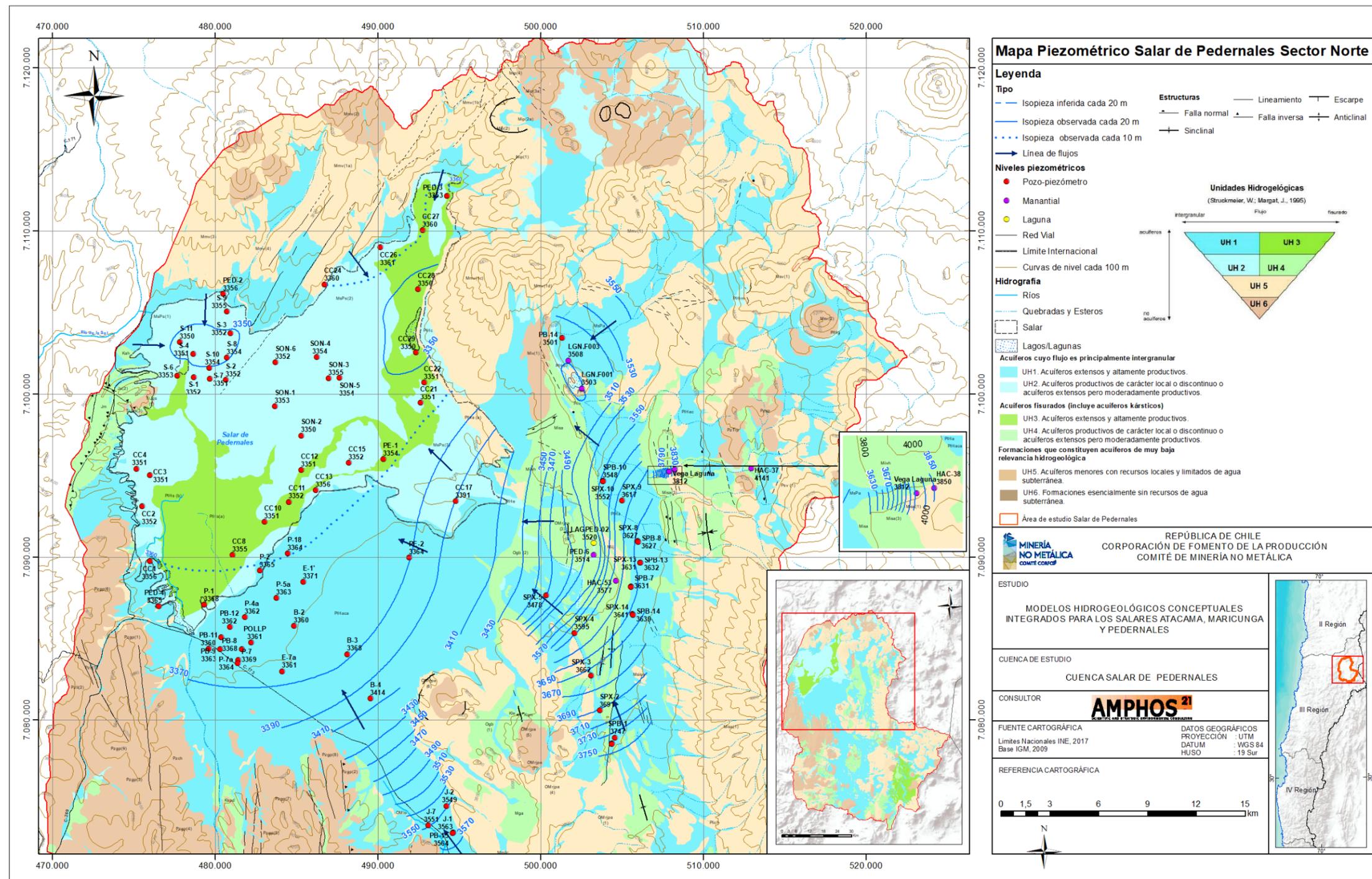


Figura 5-25. Mapa piezométrico (sector norte, 2016) con direcciones del flujo subterráneo en la parte septentrional de zona de estudio.

Fuente: elaboración propia.

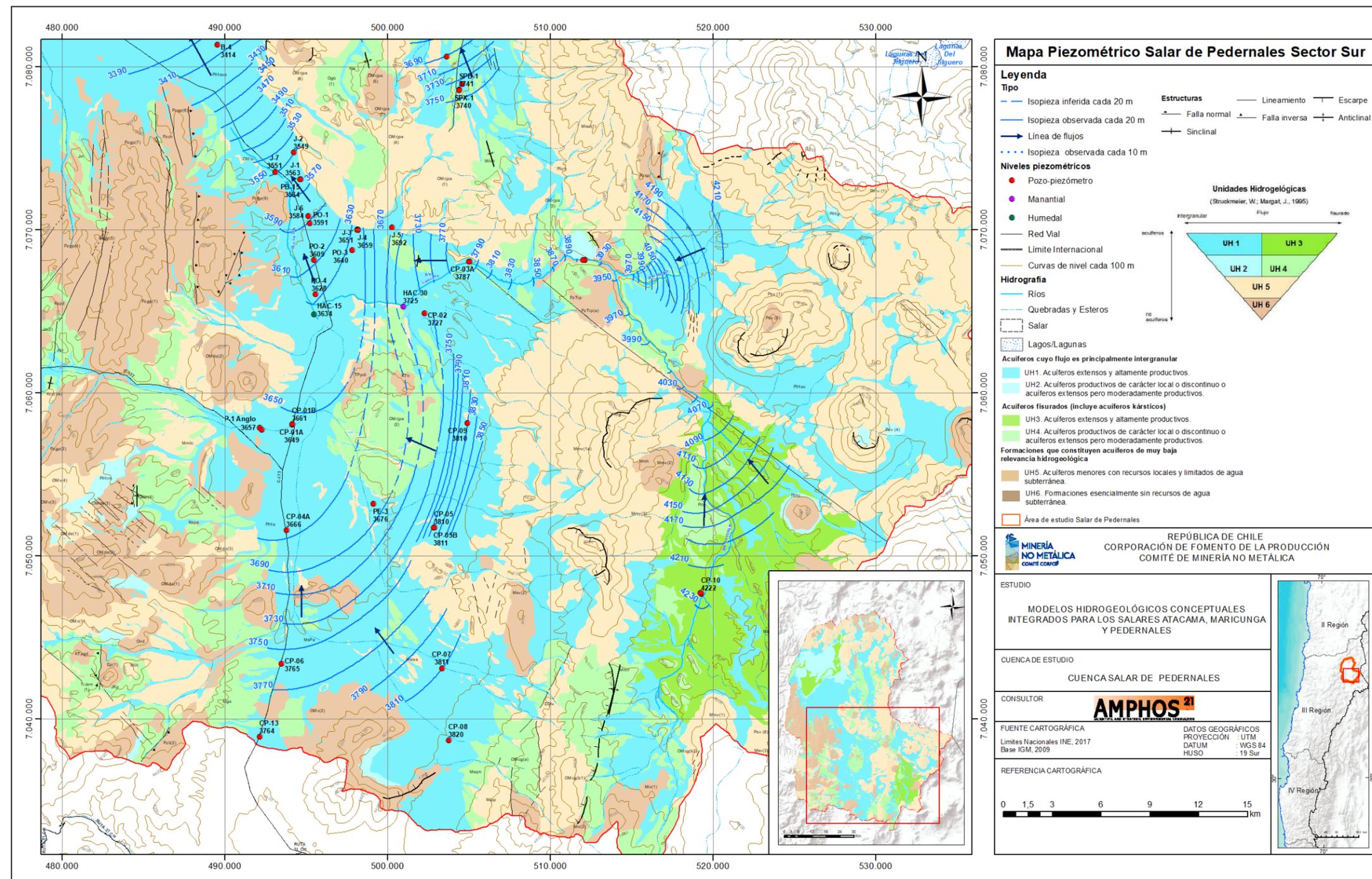


Figura 5-26. Mapa piezométrico (sector sur, 2016) con direcciones del flujo subterráneo en la parte meridional de zona de estudio.

Fuente: elaboración propia.

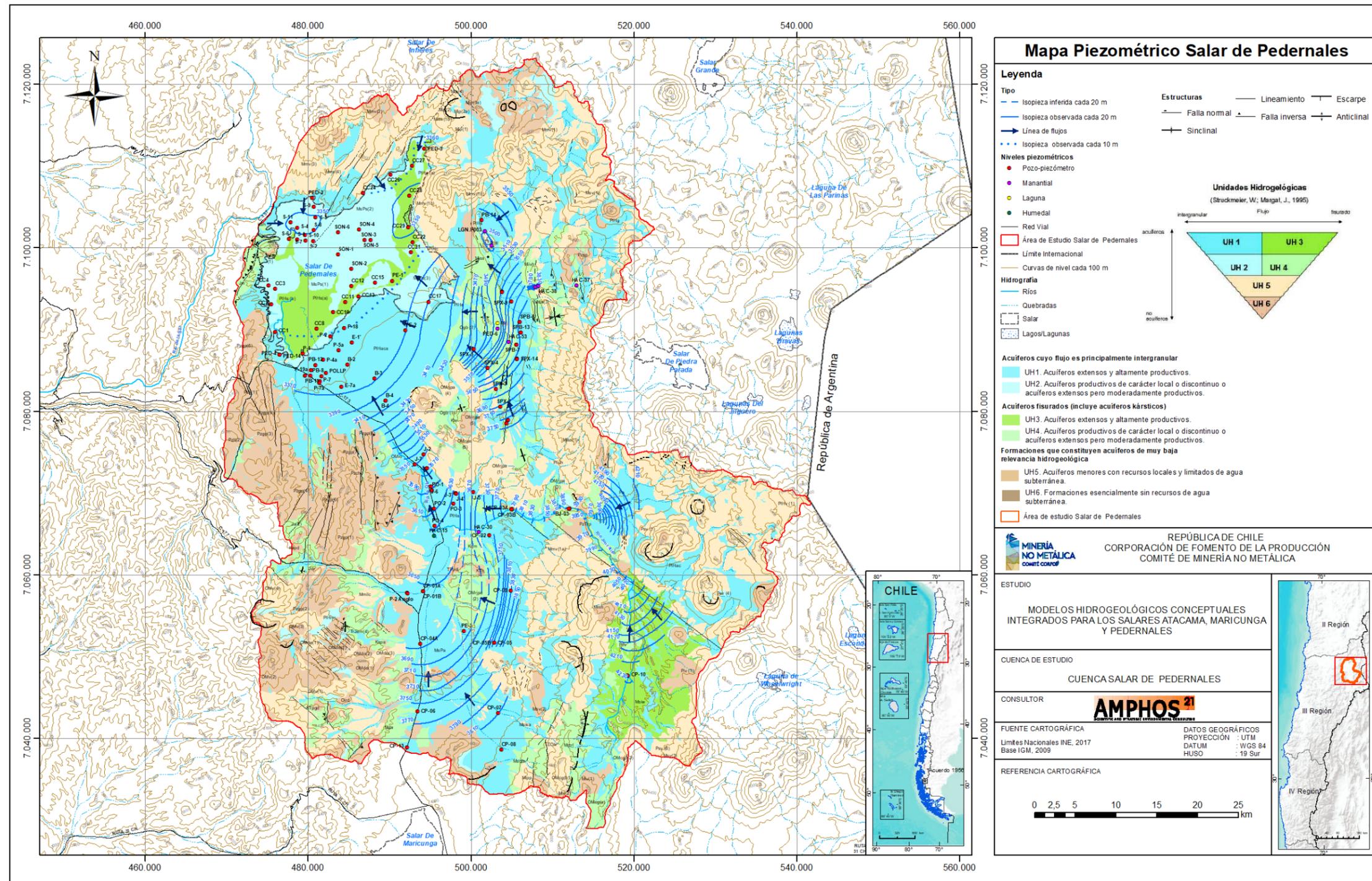


Figura 5-27. Piezometría cuenca Salar de Pedernales.

Fuente: elaboración propia.

## 5.5 Volumen almacenamiento total del acuífero saturado

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 Pedernales. 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 por un lado el acuífero compuesto por depósitos no consolidados (con un volumen saturado igual a 73.134 Hm<sup>3</sup>) y los acuíferos en roca fracturada y costra salina fracturada (con volúmenes saturados de 175.070 Hm<sup>3</sup> y 1.684 Hm<sup>3</sup>, respectivamente), los cuales se unieron por tener semejantes características hidrogeológicas.

El coeficiente de almacenamiento (S) se ajustó considerando los resultados de las pruebas de bombeo realizadas en el área de estudio (ver capítulo 5) entregando un rango que va de 0,05 a 0,08 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 **3.674 a 6.027 hm<sup>3</sup>** para el volumen de almacenamiento total en la cuenca Salar de Pedernales. A continuación se resumen los cálculos para el rango de volumen de almacenamiento total del acuífero saturado en la cuenca Salar de Pedernales (Tabla 5-8).

Acuíferos	Volumen	Coeficiente de almacenamiento		Volumen de almacenamiento	
	(VA)	(S)/ porosidad efectiva		(hm <sup>3</sup> )	
	(hm <sup>3</sup> )	Mín.	Max.	Mín.	Max.
Acuífero no consolidado	73.134	0,05	0,08	3.657,7	5.851,7
Acuífero fracturado + Costra salina fracturada	176.754	0,0001	0,001	17,7	176,8
<b>Volumen total en la cuenca (VT)</b>				<b>3.674,4</b>	<b>6.027,5</b>

Tabla 5-8. Volumen de almacenamiento total del sistema acuífero dulce y salmuera de la cuenca Salar de Pedernales.

Fuente: elaboración propia.

## 6. Hidrogeoquímica e isótopos

### 6.1 Información disponible

Para la caracterización hidroquímica e isotópica de la cuenca Salar de Pedernales se ha recopilado información de distintas fuentes, con lo cual se ha realizado una base de datos con un total de 224 registros (Ver Anexo I). Los estudios revisados y la información disponible en cada uno de ellos, se detalla en los capítulos 2.7 y 0 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
	Dren
Superficial	Río/Estero
	Laguna/Lago
Manantial/Vertiente	Manantial
	Manantial termal
Humedal	Humedal
Precipitación	Nieve

Tabla 6-1: Tipos y subtipos de punto para clasificación hidroquímica.

Fuente: elaboración propia.

Por otro lado, los puntos también se han clasificado en base a su ubicación, para lo cual se han definido 5 sectores, los cuales se ilustran en la Figura 6-2, y se describen a continuación.

- 1) Áreas de recarga La Ola y Juncalito: este sector se ubica en la zona sur de la cuenca hidrográfica Salar de Pedernales, específicamente en la parte oriental de la Cordillera de Domeyko y en el sector norte de la Cordillera Claudio Gay. En este sector el acuífero se encuentra encajonado en las zonas de quebradas y se emplaza en depósitos no consolidados

y en profundidad en rocas fracturadas. En este sector se produce una importante recarga asociada a las precipitaciones.

- 2) La Laguna: se encuentra al noreste de la zona de estudio. Este sector recibe una recarga desde la zona de Aliste, ubicada en su límite centro-oriente, y una parte del flujo posee dirección norte hacia la laguna y otra hacia el poniente, hacia el salar de Pedernales.
- 3) Llanos Leoncito-La Ola-Pedernales: este sector comprende la zona intermedia del área de estudio, donde el acuífero se emplaza en depósitos no consolidados de espesor medio 35 m y en rocas fracturadas de espesor medio 100 m.
- 4) Salar de Pedernales: este sector se encuentra al norponiente del área de estudio y comprende la zona de emplazamiento del salar y sus alrededores. En éste el acuífero se emplaza en depósitos no consolidados de baja a moderada importancia hidrogeológica compuestos principalmente de halita, yeso y sedimentos.
- 5) Precipitación: este sector hace referencia a una única muestra correspondiente a nieve, tomada al nororiente del salar de Pedernales.

Por último, en los Anexos I y IV se muestra cada punto que contiene información hidroquímica y/o isotópica, indicando su cantidad de registros, fechas de monitoreo, tipo y subtipo de punto al cual fue clasificado, el sector y la cuenca hidrográfica donde se emplaza.



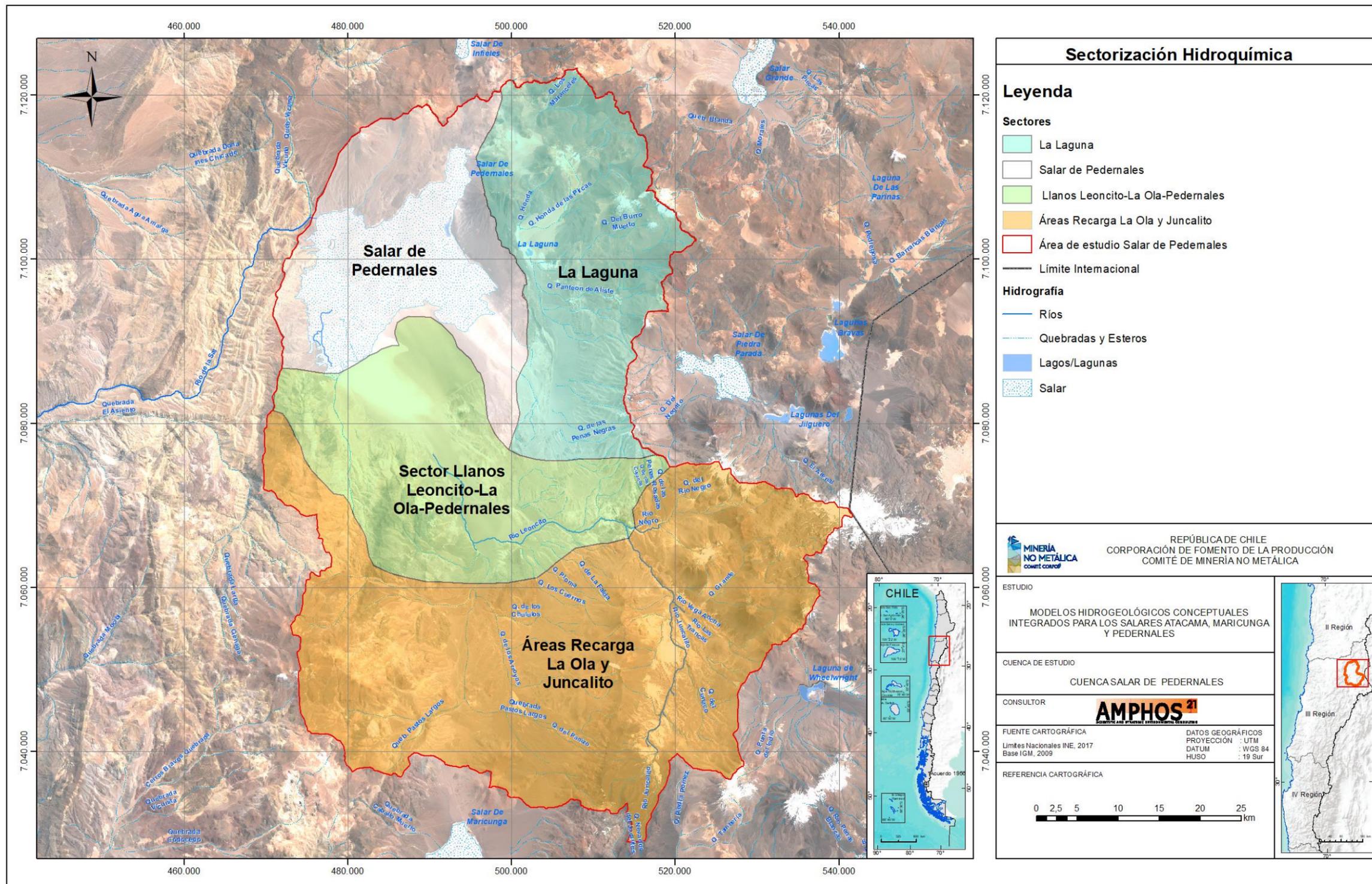


Figura 6-2: Sectorización Hidroquímica.

Fuente: elaboración propia.

### 6.3 Validación de los datos

La validación de los datos se ha realizado mediante el cálculo del balance iónico (BI) por cada muestra o análisis disponible de los antecedentes. Los cationes (disueltos) que se han tenido en cuenta son  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{B}^{3+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$  y  $\text{Zn}^{2+}$ , mientras que los aniones (disueltos) son:  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{Br}^-$  y  $\text{PO}_4^{3-}$ .

La concentración de los iones se ha transformado de mg/l a meq/l y se ha aplicado la siguiente ecuación:

$$\frac{\sum \text{cationes} - \sum \text{aniones}}{\sum \text{cationes} + \sum \text{aniones}} * 100$$

El error que se considera no admisible es el que se encuentra fuera del rango -10% y 10%. Sin embargo, debido a que en la zona de estudio algunas de las aguas se encuentran mineralizadas naturalmente presentando altas concentraciones de elementos, principalmente 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.

En la Tabla 6-2 se indican las muestras que presentan un error de balance iónico fuera de rango y si han sido admitidas como datos confiables para ser utilizados en la caracterización hidroquímica.

Nombre del punto	Tipo de punto	Fuente	Fecha muestreo	BI (%)	Estado	Observaciones
SPX-8	Subterráneo	Sernageomin, 2005	19-04-2001	22,2	Admitido	No muestra variaciones significativas en comparación con otras campañas
B-2	Subterráneo	DGA, 2015	18-12-2014	-75,7	No admitido	Muestras diferencias significativas con la muestra de 1995
Dren D	Manantial/Vertiente	DGA, 2016	13-09-2016	30,6	No admitido	No tiene registros de otras campañas para poder comparar las concentraciones
HSC-25	Manantial/Vertiente	Sernageomin, 2005	01-01-2000	-63,3	No admitido	Falta información sobre la concentración de los parámetros mayoritarios (Ca, Na, K, HCO <sub>3</sub> , CO <sub>3</sub> )

Tabla 6-2. Muestras con BI fuera de rango.

Fuente: elaboración propia.

Nombre del punto	Tipo de punto	Fuente	Fecha muestreo	BI (%)	Estado	Observaciones
HSC-26	Manantial/Vertiente	Sernageomin, 2005	01-01-2000	-67,0	No admitido	Falta información sobre la concentración de los parámetros mayoritarios (Ca, Na, K, HCO <sub>3</sub> , CO <sub>3</sub> )
PED.F056	Manantial/Vertiente	DGA, 2009	15-05-2008	36,2	No admitido	Falta información sobre su concentración de HCO <sub>3</sub>
PES10	Superficial	DGA, 2015	19-12-2014	45,7	No admitido	No tiene registros de otras campañas para poder comparar las concentraciones
SPX-9	Subterráneo	Sernageomin, 2005	19-04-2001	12,1	No admitido	Muestras diferencias significativas con la muestra de 1998
CP-05	Subterráneo	CODELCO, 2017	15-09-2016	11,0	Admitido	No muestra variaciones significativas en comparación con otras campañas
CP-08	Subterráneo	CODELCO, 2017	21-03-2017	10,2	Admitido	No muestra variaciones significativas en comparación con otras campañas
CP-10	Subterráneo	CODELCO, 2017	13-12-2016	16,6	No admitido	Muestras diferencias significativas con las muestras de campañas anteriores, especialmente en su concentración de SO <sub>4</sub>
CP-13	Subterráneo	CODELCO, 2017	21-06-2016	10,7	Admitido	No muestra variaciones significativas en comparación con otras campañas
PED.F061	Superficial	DGA, 2009	15-05-2008	10,9	Admitido	Falta información sobre su concentración de HCO <sub>3</sub>
PED.F065	Superficial	EDRA, 1999	23-02-1997	14,4	Admitido	Falta información sobre su concentración de HCO <sub>3</sub>
PED.F066	Superficial	EDRA, 1999	23-02-1997	12,5	Admitido	Falta información sobre su concentración de HCO <sub>3</sub>
PED.F067	Superficial	EDRA, 1999	23-02-1997	10,8	Admitido	Falta información sobre su concentración de HCO <sub>3</sub> . Posee concentración de CaCO <sub>3</sub> y presenta pH>8,3
PED.F068	Superficial	EDRA, 1999	23-02-1997	12,3	Admitido	Falta información sobre su concentración de HCO <sub>3</sub> . Posee concentración de CaCO <sub>3</sub> y presenta pH>8,3
PED.F069	Superficial	EDRA, 1999	23-02-1997	12,1	Admitido	Falta información sobre su concentración de HCO <sub>3</sub> . Posee

Tabla 6-2: Muestras con BI fuera de rango (continuación 1)

Nombre del punto	Tipo de punto	Fuente	Fecha muestreo	BI (%)	Estado	Observaciones
						concentración de CaCO <sub>3</sub> y presenta pH>8,3
PED.F070	Superficial	EDRA, 1999	23-02-1997	13,3	Admitido	Falta información sobre su concentración de HCO <sub>3</sub> . Posee concentración de CaCO <sub>3</sub> y presenta pH>8,3
SPB-8	Subterráneo	EDRA, 1999	07-02-1999	11,6	Admitido	No muestra variaciones significativas en comparación con otras campañas

Tabla 6-2: Muestras con BI fuera de rango (continuación 2).

Fuente: elaboración propia.

Cabe mencionar que las muestras PED.F067, PED.F068, PED.F069 y PED.F070, no presentan su concentración de HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, sin embargo, presentan su concentración de CO<sub>3</sub><sup>-2</sup> y además su pH es mayor a 8,3. Por lo tanto, se puede asumir que en estas aguas la concentración de carbonato es más significativa que la del bicarbonato, con lo cual pueden caracterizarse sus facies.

Por otro lado, hay algunas muestras que presentan un error iónico dentro del rango admisible; sin embargo, no se analizaron todos sus parámetros mayoritarios y, por lo tanto, sus resultados no pueden ser utilizados para ciertos análisis tales como la caracterización de las facies mediante diagramas de Piper.

En la Tabla 6-3 se presentan las muestras admitidas, pero sin el análisis del anión mayoritario Bicarbonato y, por tanto, no consideradas para los diagramas Piper.

Nombre del punto	Tipo de punto	Fuente	Fecha muestreo	Balance iónico (%)
Chimberos	Subterráneo	Sernageomin, 2005	27-03-2000	-0,6
HAC-22	Subterráneo	DGA, 2009	14-05-2008	4,9
PED.F054	Superficial	DGA, 2009	14-05-2008	2,8
PED.F055	Superficial	DGA, 2009	14-05-2008	-3,5
PED.F058	Humedal	DGA, 2009	15-05-2008	9,0
PED.F059	Manantial/Vertiente	DGA, 2009	15-05-2008	6,1
PED.F060	Superficial	DGA, 2009	15-05-2008	0,3
PED.F061	Superficial	DGA, 2009	15-05-2008	10,9
PED.F062	Superficial	DGA, 2009	15-05-2008	2,6

Tabla 6-3: Muestras no consideradas para diagrama Piper.

Nombre del punto	Tipo de punto	Fuente	Fecha muestreo	Balance iónico (%)
PED.F063	Superficial	DGA, 2009	15-05-2008	-2,6
PED.F064	Manantial/Vertiente	DGA, 2009	15-05-2008	-2,3
PED.F065	Superficial	EDRA, 1999	23-02-1997	14,4
PED.F066	Superficial	EDRA, 1999	23-02-1997	12,5

Tabla 6-3: Muestras no consideradas para diagrama Piper (continuación).

Fuente: elaboración propia.

## 6.4 Parámetros físico-químicos

Las temperaturas mínimas registradas en las aguas de la zona de estudio, corresponden a muestras superficiales (1,3°C) y de manantiales/vertientes (1,9°C), tomadas en mayo del 2005 en los alrededores del Llano La Ola, además de la muestra de nieve (2,6°C); en septiembre del 2016, al norte de La Laguna. 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.

Por su parte, las máximas temperaturas corresponden al manantial termal HAC-2 (40,2 y 38,8°C) ubicado en las Termas de Juncalito (Baños de Río Negro, afluente del Río Juncalito). Otras zonas con rangos elevados de temperatura corresponden a los manantiales termales ubicados al oriente de La Laguna, en las faldas del cerro Panteón de Aliste y en las zonas altas del Río Juncalito (Río Vega Ancha).

Se observa que, en general, las temperaturas de las aguas subterráneas son más elevadas, especialmente en las zonas del Llano de la Vega Helada (Sector La Laguna, al oriente del Salar). A su vez, las aguas superficiales varían entre 1,3 y 24,1°C.

En cuanto al pH, los rangos varían entre 6,18 y 10,1 con un promedio de 7,84, siendo los valores de las aguas superficiales ligeramente más alcalinos que los de las aguas subterráneas ( $\bar{X}$ :8,26 y 7,61; respectivamente). Adicionalmente, los manantiales/vertientes presentan un promedio de 7,72 y los humedales; 8,24. La variación es restringida, probablemente, por un efecto tampón que ejerce la geología sobre este parámetro. Cabe mencionar que el único valor que se dispara es el valor de la nieve, con un pH de terreno de 13,77, aunque con un pH de laboratorio de 7. No se dispone de más puntos de precipitación para realizar comparaciones concluyentes, por lo que el alto valor se asocia a un error de medición.

La conductividad eléctrica (CE) depende directamente de la concentración de sólidos disueltos en el agua (TSD). Estos parámetros muestran una amplia diversidad de valores (57 a >250.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), reflejando la heterogeneidad de los puntos y sectores muestreados. Los valores más elevados se encuentran en el sector Salar de Pedernales, en lagunas, pozos-piezómetros y en el Dren de Agua

Helada, correspondiendo a aguas muy saladas o salmuera; mientras que los menores valores se localizan en las aguas superficiales y manantiales del sector Áreas de Recarga La Ola y Juncalito. Estas últimas corresponden a las zonas más altas de la cuenca y se clasifican como aguas dulces a ligeramente salobres.

En la Figura 6-3 se presenta un gráfico entre la relación de la CE y el TSD, en la cual es posible observar cierta relación entre la concentración de sólidos disueltos y las direcciones de flujo del agua superficial y subterránea. Las aguas del sector Áreas de Recarga La Ola y Juncalito provienen de las zonas más elevadas que delimitan la cuenca y poseen, en general, las menores concentraciones. Posteriormente, estos aportes transitan por los Llanos de La Ola, Leoncito y Pedernales adquiriendo mayores concentraciones para, finalmente, descargar a la zona más baja de la cuenca en el Salar de Pedernales, donde las aguas aumentan significativamente el contenido de sales debido a procesos reiterativos de evaporación y reconcentración mineral.

Complementariamente, en la Figura 6-4 se presenta la distribución espacial de la conductividad eléctrica en la zona de estudio. Se observa, nuevamente, que las conductividades más bajas se presentan en los puntos próximos a las zonas de recarga y que la concentración de sólidos disueltos aumenta a medida que el agua desciende hacia los sectores centrales alcanzando sus mayores valores en el sector del Salar de Pedernales.

En cuanto a la cuenca hidrográfica adyacente de La Laguna, es posible advertir que las zonas altas de recarga (Quebrada Panteón de Aliste) se encuentran influenciadas por manantiales termales, dando origen a aguas con mayores conductividades que en los otros sectores elevados de la cuenca. Éstas parecen recargar a la laguna ubicada en la zona más baja de esta cuenca hidrográfica, concentrándose y evaporándose. Sin embargo, en la parte más austral del Sector La Laguna (ver Figura 6-1), en el Llano de la Vega Helada y al sur, es posible observar una recarga más diluida desde las zonas altas hasta llegar a la Loma de los Gases Blancos. Al norte de este sector, las muestras poseen conductividades por sobre los 10.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , lo que podría explicarse por reconcentración en pequeñas lagunas y manantiales (HAC-49, PED-6, HAC-54, HAC-34 y LADPEG-02) y una influencia de la cuña del salar hasta el pozo SPX-5.

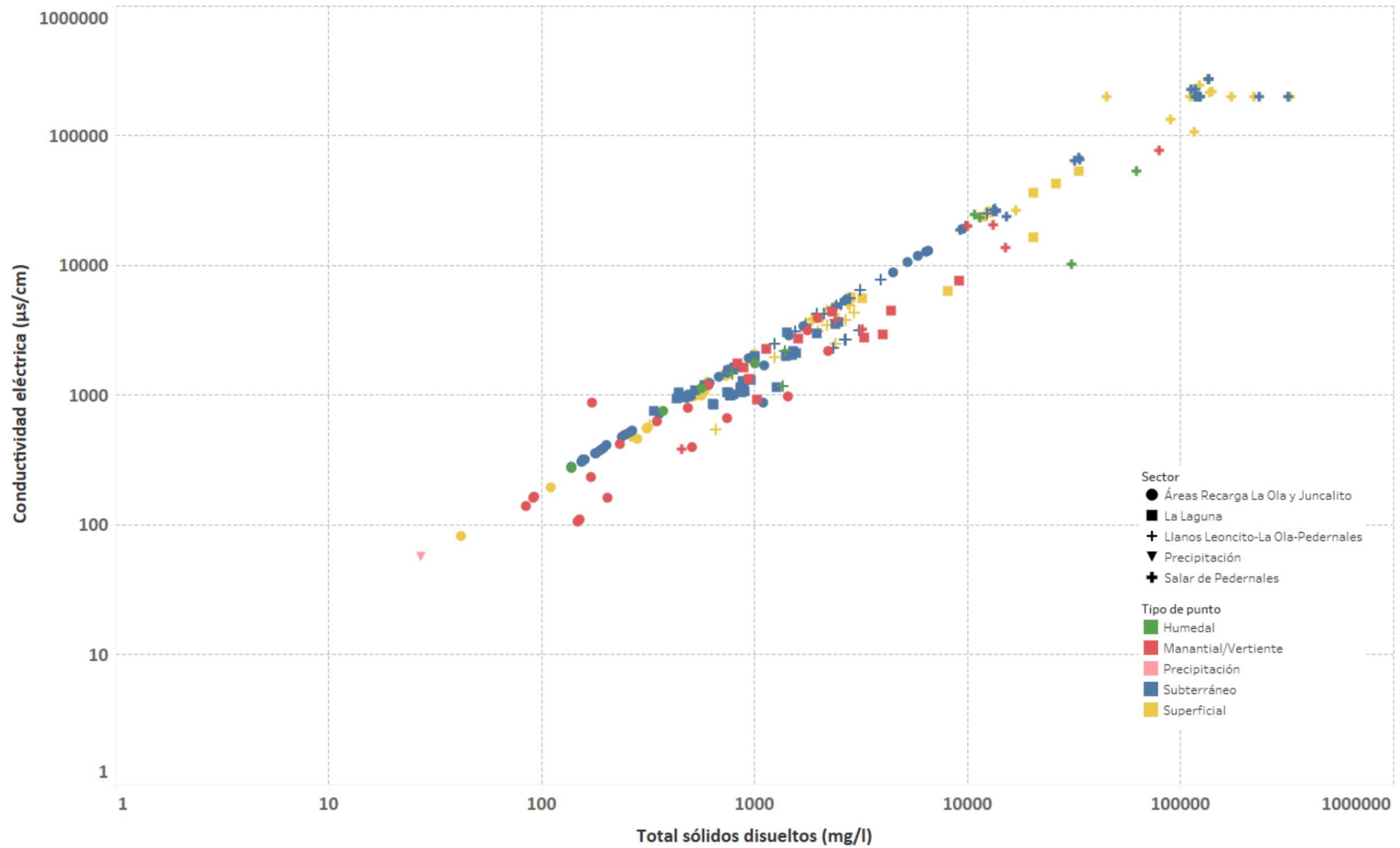


Figura 6-3: Relación entre la CE y TDS.

Fuente: elaboración propia.

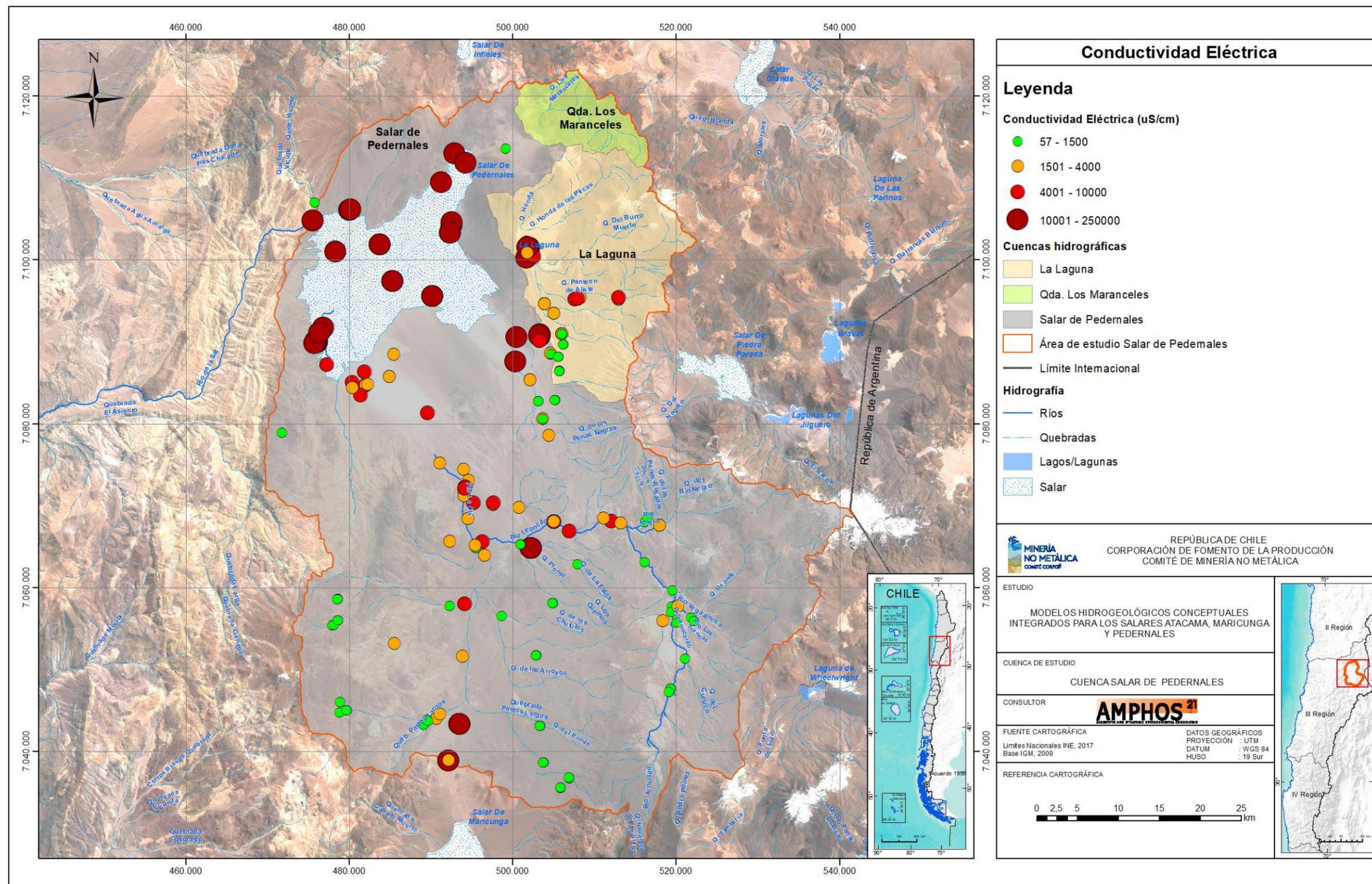


Figura 6-4: Distribución espacial de la conductividad hidráulica.

Fuente: elaboración propia.

Por otra parte, cabe destacar que las aguas procedentes de las Termas de Juncalito presentan una mineralización media en las zonas de recarga pudiendo tener un origen distinto al resto. Se observa, además, que los pozos CP-02 (Llano Leoncito), CP-06 y CP-13 (al sur de la cuenca) presentan conductividades muy elevadas en relación a su entorno:

- Una posible explicación para estas últimas dos muestras es que estén asociadas a una estructura y/o progresión que conecte, subterráneamente, con la cuenca Salar de Maricunga. Dicha estructura queda limitada inmediatamente al norte debido al afloramiento existente en la roca basal a pocos metros aguas arriba del pozo de observación CP-06.

En cuanto al pozo CP-02, este presenta conductividades que promedian los 25.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Con una profundidad de habilitación cercana a los 190 m, se plantea como una posible hipótesis una influencia geotermal profunda.

## 6.5 Componentes mayoritarios y facies

Las muestras consideradas en el actual estudio pueden ser clasificadas en función de las facies hidroquímicas a las que pertenecen, es decir, según los aniones y cationes dominantes en la solución. Las facies hidroquímicas se representan en un diagrama de Piper, los cuales se pueden utilizar para identificar zonas de determinada composición química, evoluciones y mezclas de aguas. En estos diagramas los puntos de agua se distribuyen según las concentraciones relativas de los cationes mayoritarios disueltos ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ , y  $\text{K}^+$ ) y aniones mayoritarios disueltos ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{NO}_3^-$ ) en meq/l. Para el presente estudio se ha incluido el nitrato debido a que en las salmueras se encuentra comúnmente en altas concentraciones, y se ha incluido el carbonato debido a que éste, en conjunto con el bicarbonato, forma parte de la alcalinidad en muestras con pH mayor a 8,3.

Cabe mencionar que los datos utilizados poseen un rango de fechas desde 1995 hasta el 2017, 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 6-5 se presenta el diagrama de Piper para todas las aguas del estudio, clasificadas según la tipología de punto al que pertenecen.

En la cuenca Salar de Pedernales las aguas presentan composiciones muy variables, lo cual indica que éstas poseen orígenes de composiciones diferentes asociadas, probablemente, a las características geológicas de la zona de recarga y/o que han sufrido procesos diferenciadores a lo largo de su línea de flujo.

Se observa que las aguas subterráneas, en su mayoría, son de tipo cloruradas-sulfatadas sódicas-cálcicas. Destacan 2 muestras, CP-08 y CP-10 correspondientes a pozos ubicados en el sector Áreas de Recarga La Ola y Juncalito, las cuales poseen como anión principal el bicarbonato.

Por su parte, la facies dominante tanto de las aguas superficiales y humedales en el área de estudio es clorurada sódica. Sin embargo, algunas muestras presentan una tendencia al catión calcio y/o al anión sulfato, tal como la muestra PEM1, correspondiente a una laguna ubicada en el sector Salar de Pedernales, y la muestra Vega Ped emplazada en el sector Áreas de Recarga La Ola y Juncalito.

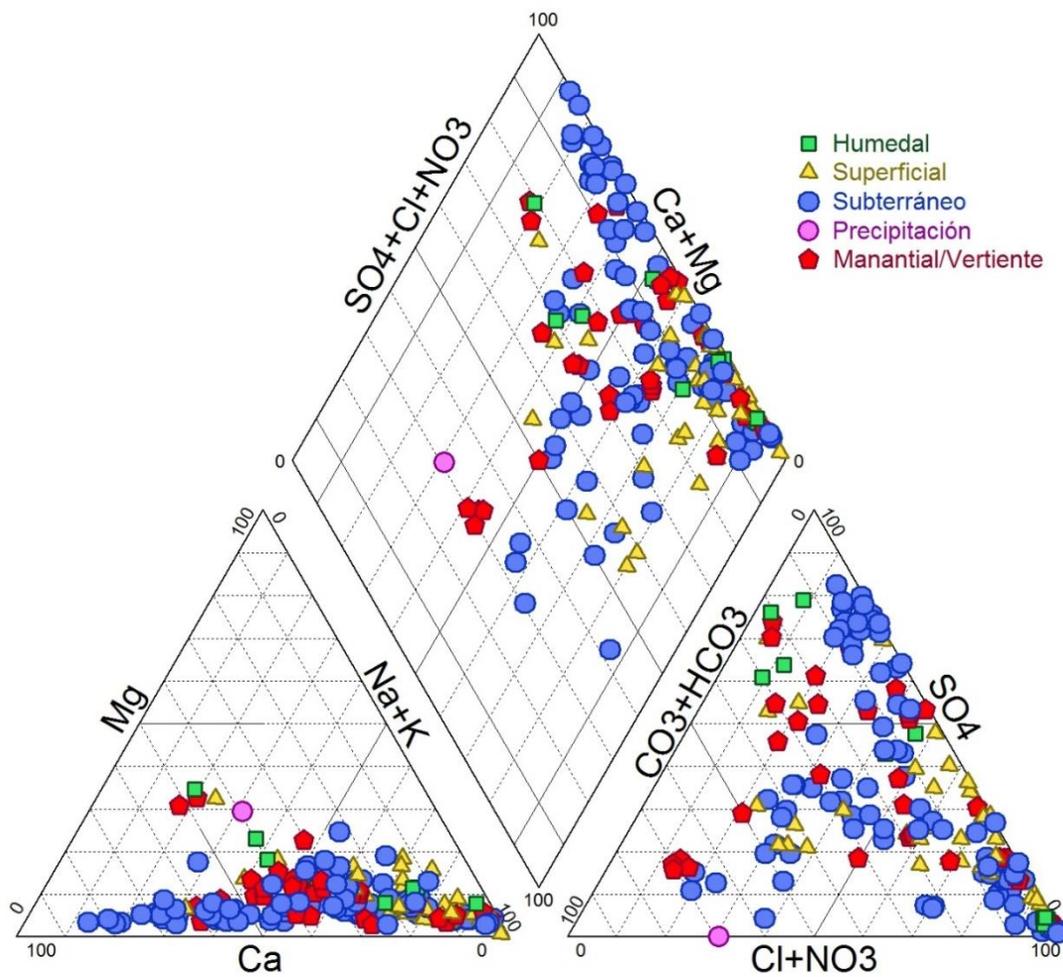


Figura 6-5: Diagrama Piper para todos los puntos según su tipología.

Fuente: elaboración propia.

En cuanto los manantiales/vertientes sus facies son de tipo cloruradas-sulfatadas sódicas-cálcicas, con tendencia al catión bicarbonato en algunos puntos; mientras que la muestra de precipitación (Nieve-1) es de tipo bicarbonatada cálcica.

Con el objetivo de identificar si las variaciones de composición 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.

### **6.5.1 Sector Áreas de Recarga La Ola y Juncalito**

En la Figura 6-6 se presenta el diagrama de Piper para las aguas de este sector, en el cual se observa que:

- Las aguas subterráneas son de tipo cloruradas-sulfatadas sódicas-cálcicas y, en comparación con las aguas subterráneas de las zonas intermedias y bajas de la cuenca, poseen una concentración relativa de calcio y de sulfatos menor. Los pozos CP-08 y CP-10 son los únicos que presentan aguas bicarbonatadas sódicas.
- Los humedales en la parte alta de la cuenca son sulfatados cálcicos con tendencia al sodio.
- Las facies de las aguas superficiales y de los manantiales/vertientes en este sector, son de tipo cloruradas-sulfatadas sódicas-cálcicas, pero con tendencia a bicarbonatadas cálcicas en ciertos manantiales ubicados al sur de la cuenca (Qda Río Negro).

El origen del bicarbonato en estas aguas se debe, probablemente, a un corto tiempo de residencia y poca interacción agua-roca, por lo que mantienen la composición original de las aguas de precipitación infiltradas, las cuales son de facies bicarbonatada cálcica.

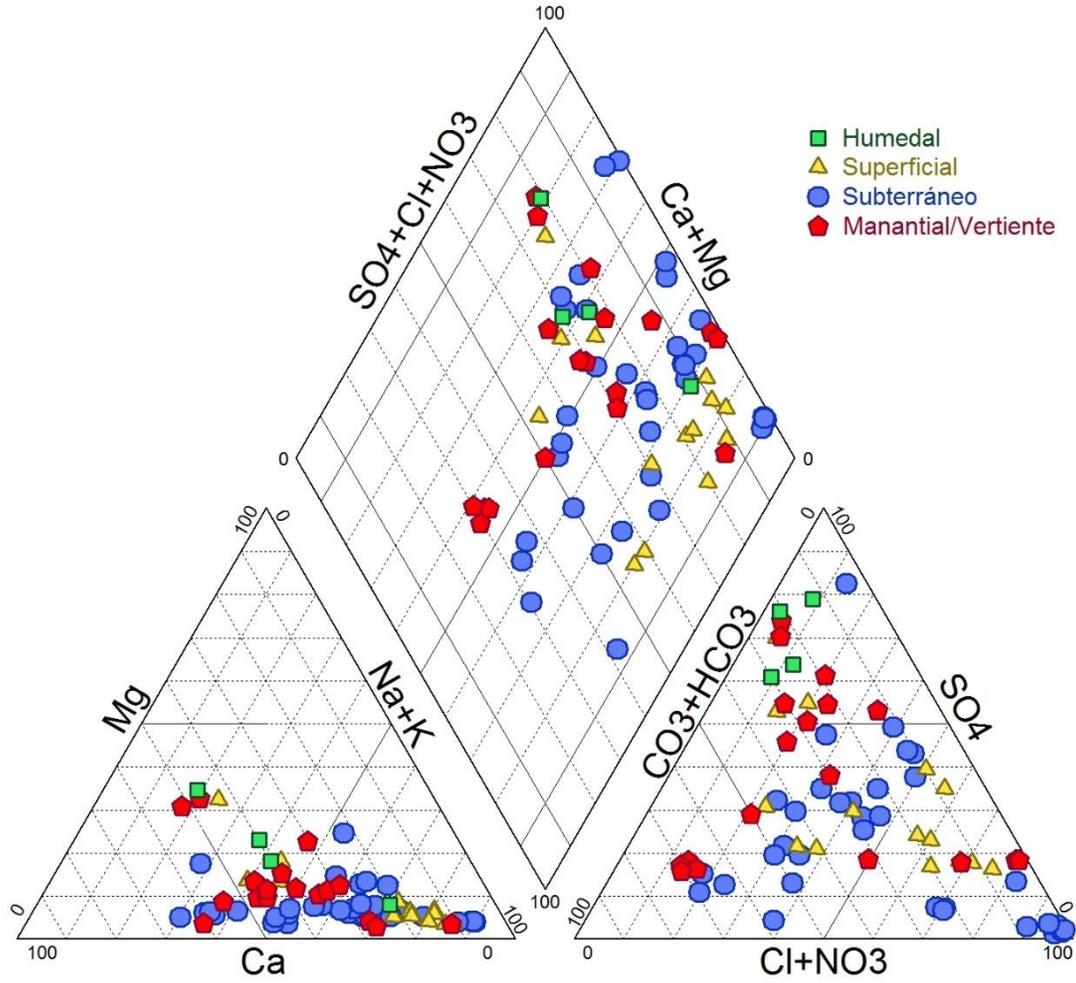


Figura 6-6: Diagrama Piper, Sector Áreas de Recarga La Ola y Juncalito.  
Fuente: elaboración propia.

### 6.5.3 Sector Llanos Leoncito-La Ola-Pedernales

En este sector, las aguas superficiales, subterráneas y de humedales presentan una composición de tipo clorurada sódica (Figura 6-7).

Destaca una muestra de agua superficial, correspondiente a un estero emplazado en la zona de Leoncito (HAC-30), la cual presenta una tendencia al bicarbonato. También destaca un punto clasificado como tipo humedal, correspondiente a una muestra de agua en la zona de afloramiento los ojos de La Ola (HAC-15), donde las aguas presentan una tendencia al anión sulfato.

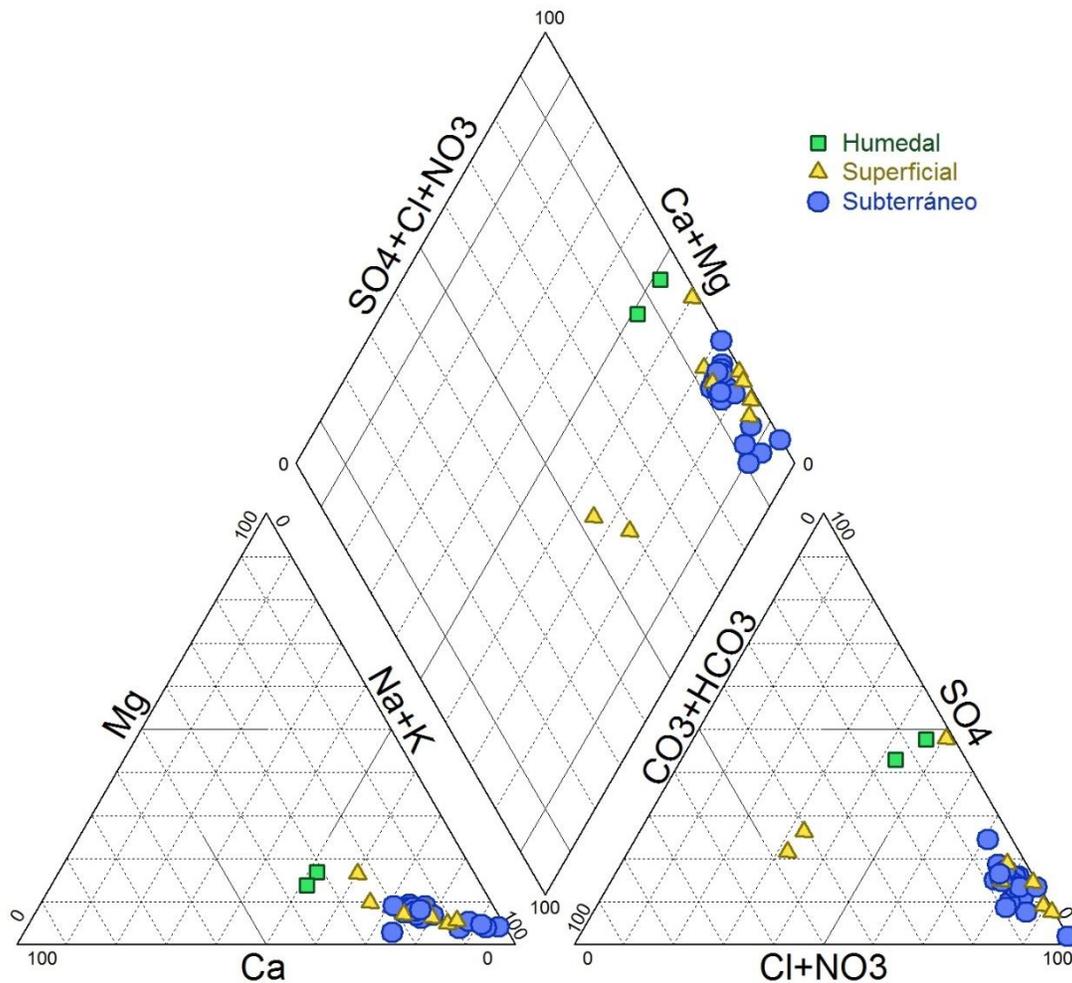


Figura 6-7: Diagrama Piper, Sector Llanos de Leoncito-La Ola-Pedernales.

Fuente: elaboración propia.

### 6.5.4 Sector La Laguna

En la Figura 6-8 se observa que las aguas subterráneas son, esencialmente, de facie sulfatada-clorurada cálcica-sódica. Estas poseen una concentración relativa menor de cloruro y sodio en comparación con las aguas subterráneas del resto de la cuenca.

Las únicas muestras con alto contenido de cloruro son las del pozo SPX-4 y SPX-5, ubicados en el sector de la Loma de los Gases Blancos. También, cabe notar que existe una sectorización en torno al Llano de la Vega Helada, donde las aguas sector norte son del tipo cloruradas sódicas, mientras que las del sur son de facies sulfatadas cálcicas.

Las aguas superficiales y manantiales/vertientes, son de tipo cloruradas sódicas; sin embargo, estos últimos presentan una tendencia hacia el anión sulfato.

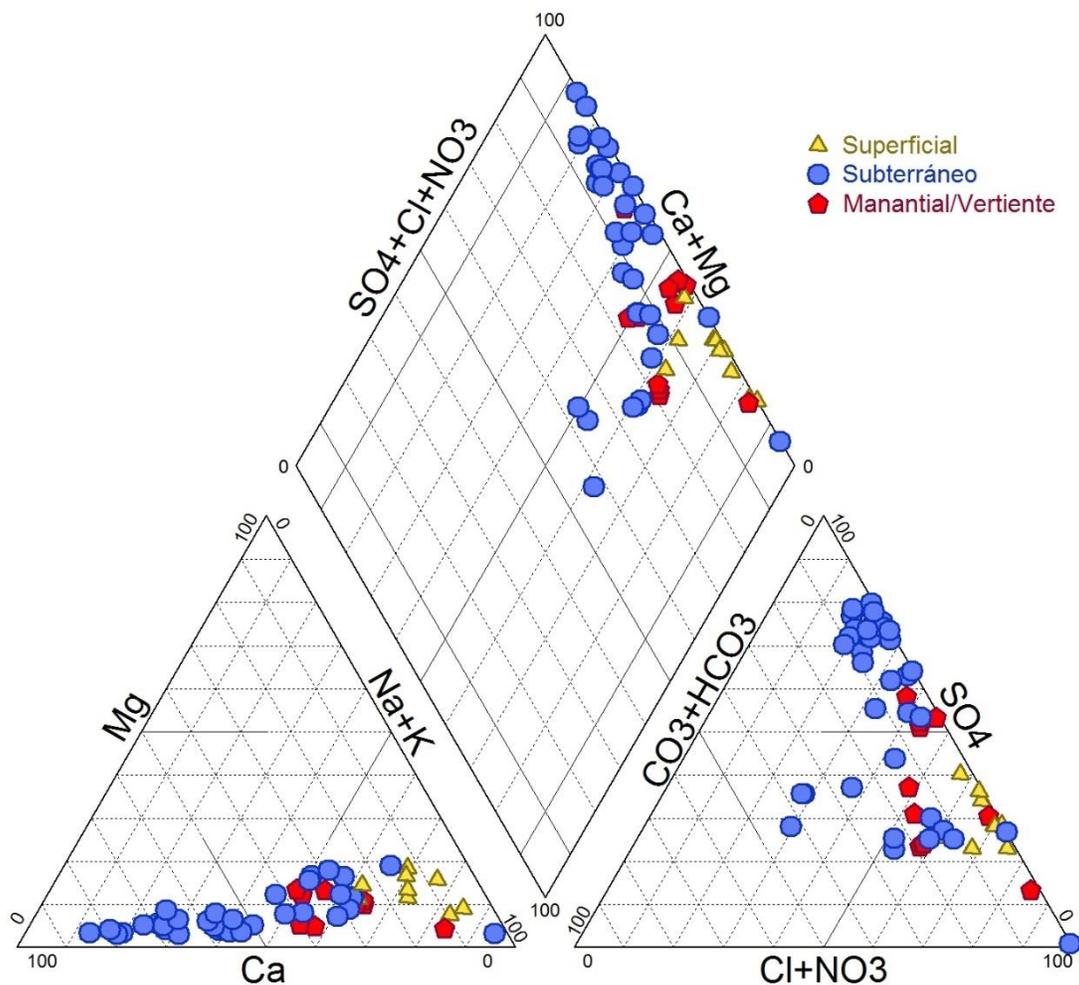


Figura 6-8: Diagrama Piper, Sector La Laguna.

Fuente: elaboración propia.

### 6.5.5 Sector Salar de Pedernales

En el sector Salar de Pedernales, tal como se ilustra en el diagrama de Piper de la Figura 6-9, tanto las aguas subterráneas, superficiales, manantiales/vertientes y humedales poseen, en general, una composición clorurada sódica.

Destacan 2 puntos que poseen una composición diferente a lo indicado. El primero de ellos corresponde a una laguna ubicada en el límite noreste del salar (PEM1), mientras que el segundo; corresponde a un manantial ubicado al noroeste del límite del salar (PED-18), fuera de la cuenca de estudio (ver Figura 6-4). Ambos poseen una composición sulfatada cálcica.

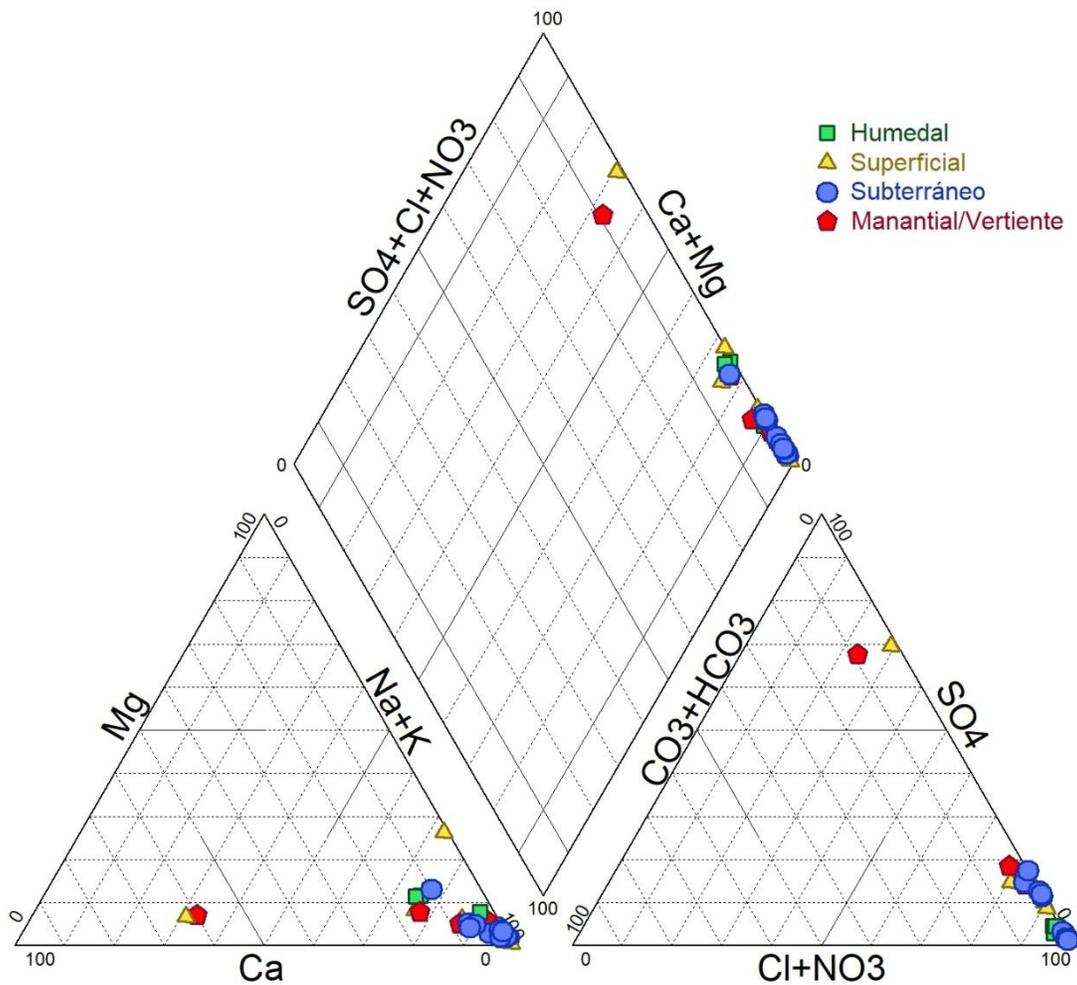


Figura 6-9: Diagrama Piper, Sector Salar de Pedernales.

Fuente: elaboración propia.

## 6.6 Parámetros representativos de salares

Los salares andinos del norte de Chile se caracterizan por presentar importantes concentraciones de boro, potasio, litio y magnesio en la salmuera. Estos elementos, característicos de cuencas evaporíticas, poseen una relación directa con la concentración de sólidos disueltos, la cual aumenta con la evaporación y los elevados tiempos de tránsito de las aguas.

En base a la información recopilada, se ha realizado la Tabla 6-4, en la cual se indican las concentraciones mínimas, máximas y medias registradas de boro, litio, magnesio y potasio, clasificadas en base al sector de emplazamiento de la muestra y el tipo de punto. Se observa que en la cuenca Salar de Pedernales las concentraciones de los mencionados parámetros son muy heterogéneos, dependiendo del sector y tipo de punto. Esta variación puede deberse a distintos procesos como como evaporación, dilución o distintas zonas de recarga.

Sector	Tipo de punto	N° de muestras	Boro disuelto (mg/l)			Litio disuelto (mg/l)			Potasio disuelto (mg/l)			Magnesio disuelto (mg/l)		
			Min	Máx	$\bar{X}$	Min	Máx	$\bar{X}$	Min	Máx	$\bar{X}$	Min	Máx	$\bar{X}$
Áreas Recarga La Ola y Juncalito	Subterráneo	11	0,41	7,9	2,04	<0,1	14	1,84	<2	130	20,97	1,44	73,6	25,21
	Superficial	15	0,10	6,0	2,94	<0,02	1,4	0,76	3,1	27,3	14,8	2	20	7,7
	Humedal	4	0,14	2,3	1,2	<0,1	0,3	0,2	3,5	44,0	20,9	3,2	48,0	29,9
	Manantial/Vertiente	16	0,09	15,9	2,49	0,002	4,2	0,70	1,9	58	13,13	1,07	55,9	14,36
La Laguna	Subterráneo	17	<0,5	20,3	4,56	0,07	2,21	0,59	0,003	58	14,41	4,29	79,8	18,57
	Superficial	11	29	358	136,95	3,4	44	20,36	24	874	338,59	59	1110	422,15
	Manantial/Vertiente	10	1,59	76,6	17,39	0,54	8,95	2,43	13	130	44,17	9,84	234	50,25
Salar de Pedernales	Subterráneo	6	21	330	144,35	16	320	126,46	109	4180	1393,17	92	2850	1064,83
	Superficial	12	3,37	897	241,44	1,23	520	165,43	58	6518	2651,83	47	3300	1480,08
	Humedal	4	15,6	166	66,65	23,3	148	68,45	175	1660	683,25	220	979	545,75
	Manantial/Vertiente	5	5,9	122	46,15	3,59	75,6	30,89	41,73	895	444,96	31,1	673	207,57
Llanos Leoncito-La Ola-Pedernales	Subterráneo	15	9,3	20,8	11,74	3,03	16,4	5,42	35,22	79,2	49,56	7,21	136	47,41
	Superficial	15	0,9	10,9	8,46	0,3	2,94	2,43	4,7	824	199,43	7	48,3	33,9
	Humedal	2	1	4,21	2,6	0,8	1,8	1,3	19,8	378	198,9	18,2	32	25,1
<b>Cuenca Salar de Pedernales</b>			<b>0,08</b>	<b>897</b>		<b>0,002</b>	<b>520</b>		<b>0,003</b>	<b>6518</b>		<b>1,07</b>	<b>3300</b>	

Tabla 6-4: Concentraciones Li, B, K y Mg.

Fuente: elaboración propia.

Con el objetivo de analizar los efectos que puedan estar afectando las concentraciones de los elementos más representativos de la zona del salar, a continuación, se caracteriza cada parámetro. Específicamente, se analizará la evolución temporal y las concentraciones medidas en todos los puntos, clasificados en base a su ubicación.

### 6.6.1 Evolución temporal

La evolución temporal se analizará a partir de los puntos que poseen al menos 4 registros, correspondientes a 12 puntos de agua subterránea y 1 punto de agua superficial, todos ellos ubicados en la cuenca hidrográfica Salar de Pedernales.

En las Figura 6-10, Figura 6-11, Figura 6-12 y Figura 6-13 se presentan los gráficos con la evolución temporal de las concentraciones de boro, litio, magnesio y potasio, respectivamente.

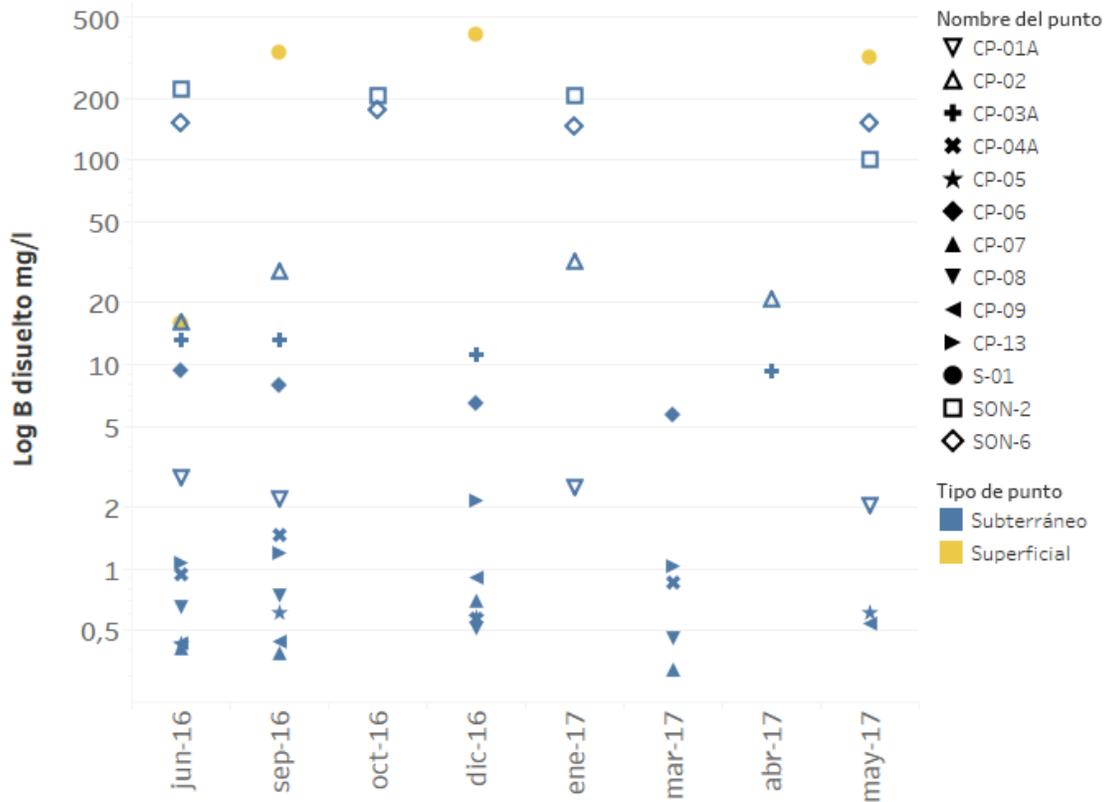


Figura 6-10: Evolución temporal de B.

Fuente: elaboración propia.

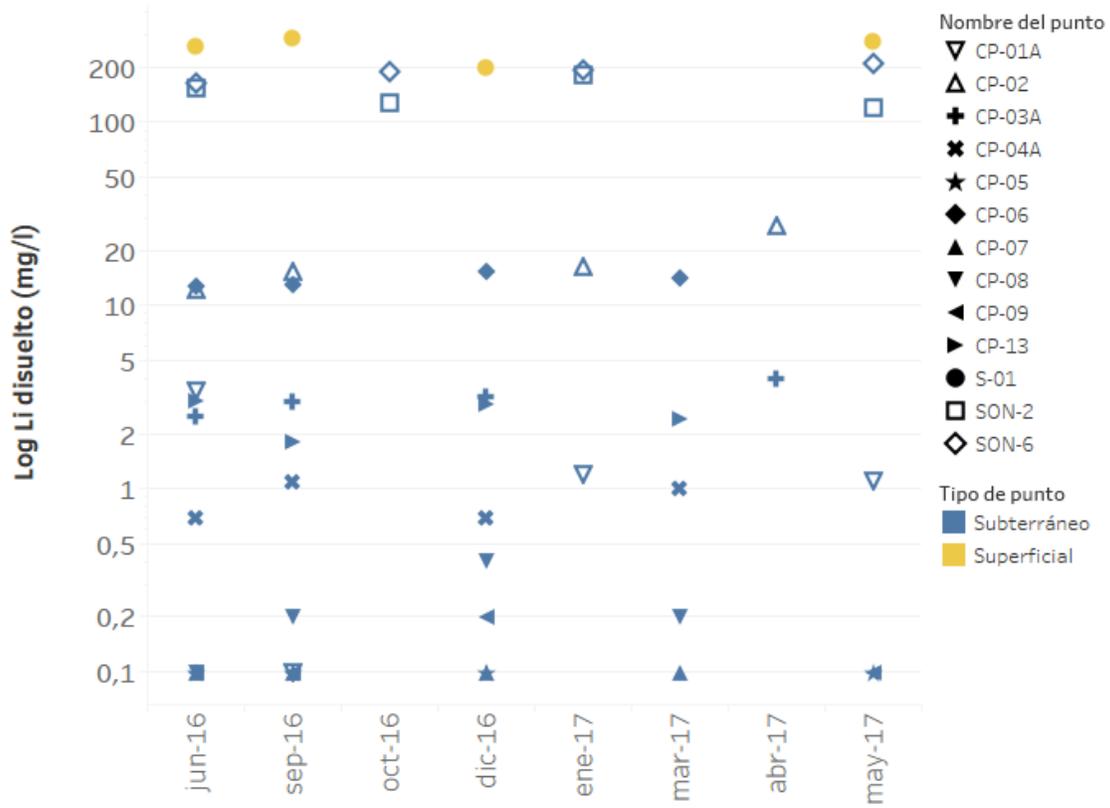


Figura 6-11: Evolución temporal de Li.

Fuente: elaboración propia.

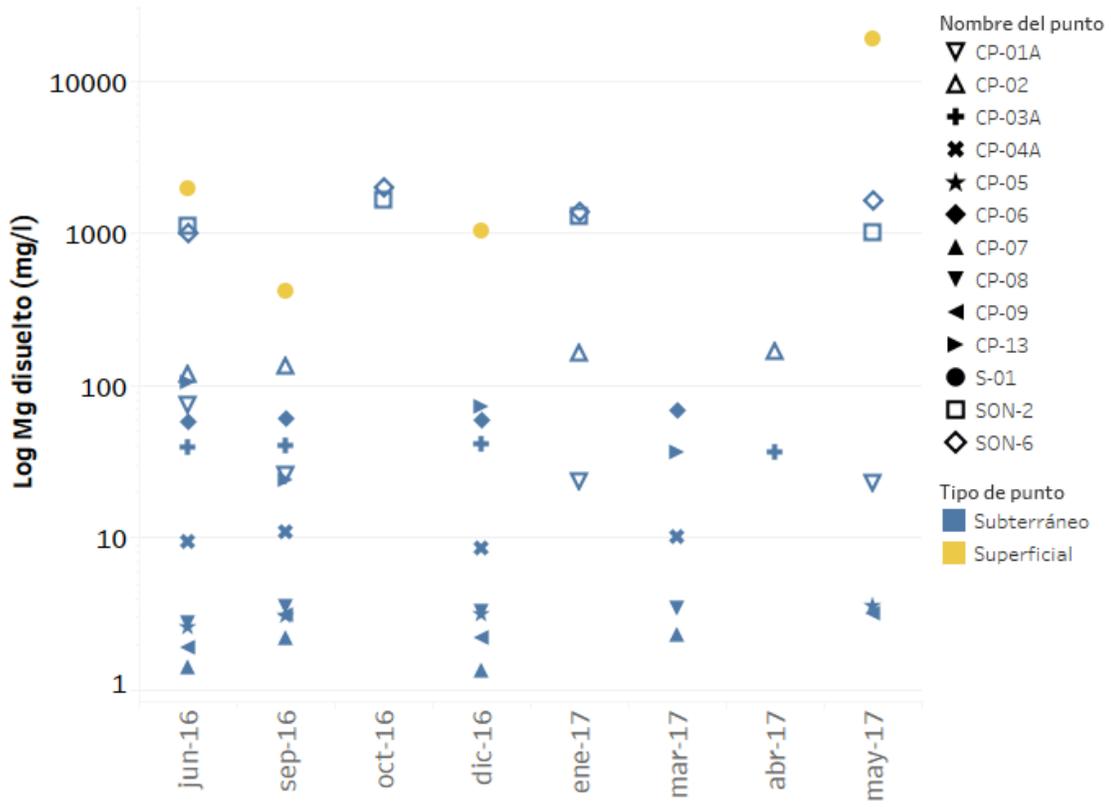


Figura 6-12: Evolución temporal de Mg.

Fuente: elaboración propia.

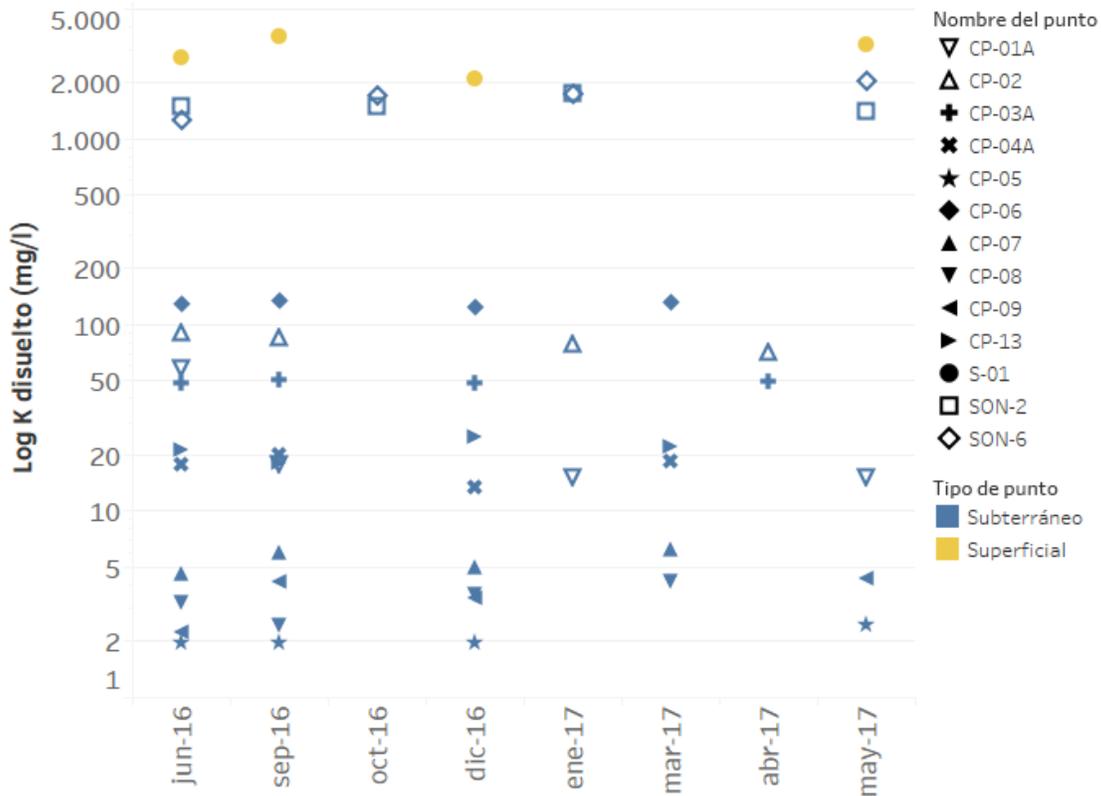


Figura 6-13: Evolución temporal de K.

Fuente: elaboración propia.

A partir de la información presentada, se observa que las aguas subterráneas no muestran variaciones significativas en sus concentraciones de los mencionados parámetros a lo largo del tiempo. Sin embargo, existen leves fluctuaciones estacionales debidas a los eventos climáticos, tales como precipitación en forma de nieve en los meses invernales y al deshielo producido durante los meses estivales.

En cuanto a las aguas superficiales, representadas por la muestra tomada en un “ojo del salar” (S-01), se observan fluctuaciones estacionales en su calidad de agua. Estas variaciones se deben, probablemente y al igual que en el caso de las aguas subterráneas, a variaciones estacionales asociadas a procesos de precipitación en forma de hielo y a los períodos de deshielo, además de procesos de evaporación desde lámina libre.

### 6.6.2 Distribución espacial

En la zona de estudio, debido a que se trata de una cuenca evaporítica, se observa una fuerte correlación entre la ubicación y la concentración de algunos elementos, tales como boro, litio, magnesio y potasio.

En la Figura 6-14 se presenta un gráfico con la concentración de los mencionados elementos en diferentes puntos de monitoreo, clasificados en base al sector en el que se encuentran y a su tipología. Se observa que las mayores concentraciones se encuentran en las aguas superficiales del Sector Salar de Pedernales seguido del Sector La Laguna, mientras que las menores concentraciones se distribuyen en los sectores más elevados de la cuenca (zonas de recarga).

A continuación, se describe la distribución de las concentraciones para cada uno de los parámetros.

- **Boro**

A partir del gráfico de la Figura 6-14 y del mapa de la Figura 6-15, se desprende que las mayores concentraciones de Boro se encuentran en el Sector Salar de Pedernales seguidos de La Laguna, mientras que las menores; en los sectores más elevados de la cuenca.

Cabe notar una fuerte diferencia entre las aguas subterráneas del Salar de Pedernales y las del resto de los sectores. Las primeras presentan rangos mayores de concentración de B ( $\bar{X}=144$  mg/l), mientras que las aguas subterráneas en el sector La Laguna presentan concentraciones menores ( $\bar{X}=4,6$  mg/l) similares a las observadas en los puntos ubicados en los sectores altos de la cuenca.

Por su parte, las aguas superficiales del Sector Salar de Pedernales y La Laguna, se encuentran más enriquecidas en B respecto a las subterráneas y manantiales/vertientes debido a los procesos reiterativos de evaporación y reconcentración mineral.

Las altas concentraciones en los puntos de la Quebrada Panteón de Aliste y parte norte del Llano de la Vega Helada, en la cuenca hidrográfica La Laguna, podrían relacionarse con la interacción de las aguas con la Ignimbrita de la Vega Helada (DGA, 2009). Adicionalmente, podrían deberse a una componente geotermal que aporte B al sistema y una consecuente mezcla.

- **Litio**

Al analizar la Figura 6-16 junto con el gráfico de la Figura 6-14, se observa que en el Sector Salar de Pedernales la concentración de Litio es significativamente mayor a la del resto de los sectores, independiente de la tipología del punto. Sin embargo, se puede distinguir que las aguas superficiales del salar son las que presentan mayores valores, asociados a procesos de evaporación y reconcentración mineral.

A su vez, las aguas subterráneas en el Sector Salar de Pedernales poseen concentraciones de litio considerablemente mayores ( $\bar{X}=126$  mg/l) en comparación con las aguas subterráneas de los otros sectores, donde el valor promedio no supera los 10 mg/l.

Por último, destacan 2 puntos de aguas subterráneas ubicados al sur de la cuenca, correspondientes a los puntos CP-06 y CP-02 con valores de Litio altos en relación a los demás puntos del entorno.

- **Magnesio y Potasio**

En base a la Figura 6-17, Figura 6-18 y al gráfico de la Figura 6-14 es posible identificar las mismas relaciones descritas para el Li y B. Las mayores concentraciones de Mg y K se ubican en el Sector Salar de Pedernales, seguido por La Laguna; mientras que las aguas superficiales de estos sectores son las que presentan los valores más elevados en comparación a los demás tipos de puntos, atribuidos a procesos de evaporación y reconcentración mineral.



Figura 6-14: Concentración de B, Li, Mg y K según tipología y sector geográfico.

Fuente: elaboración propia.

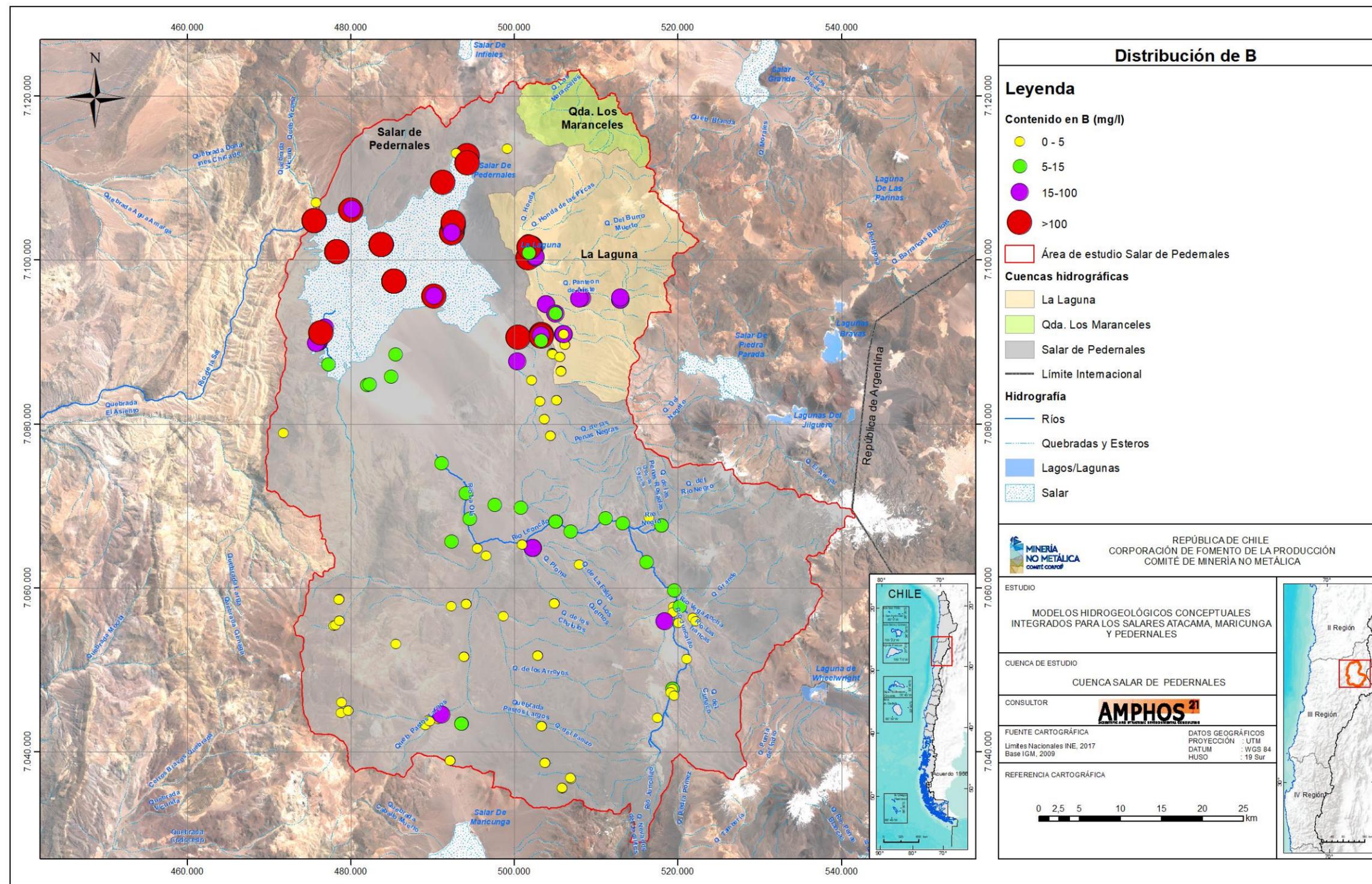


Figura 6-15: Distribución de B.

Fuente: elaboración propia.

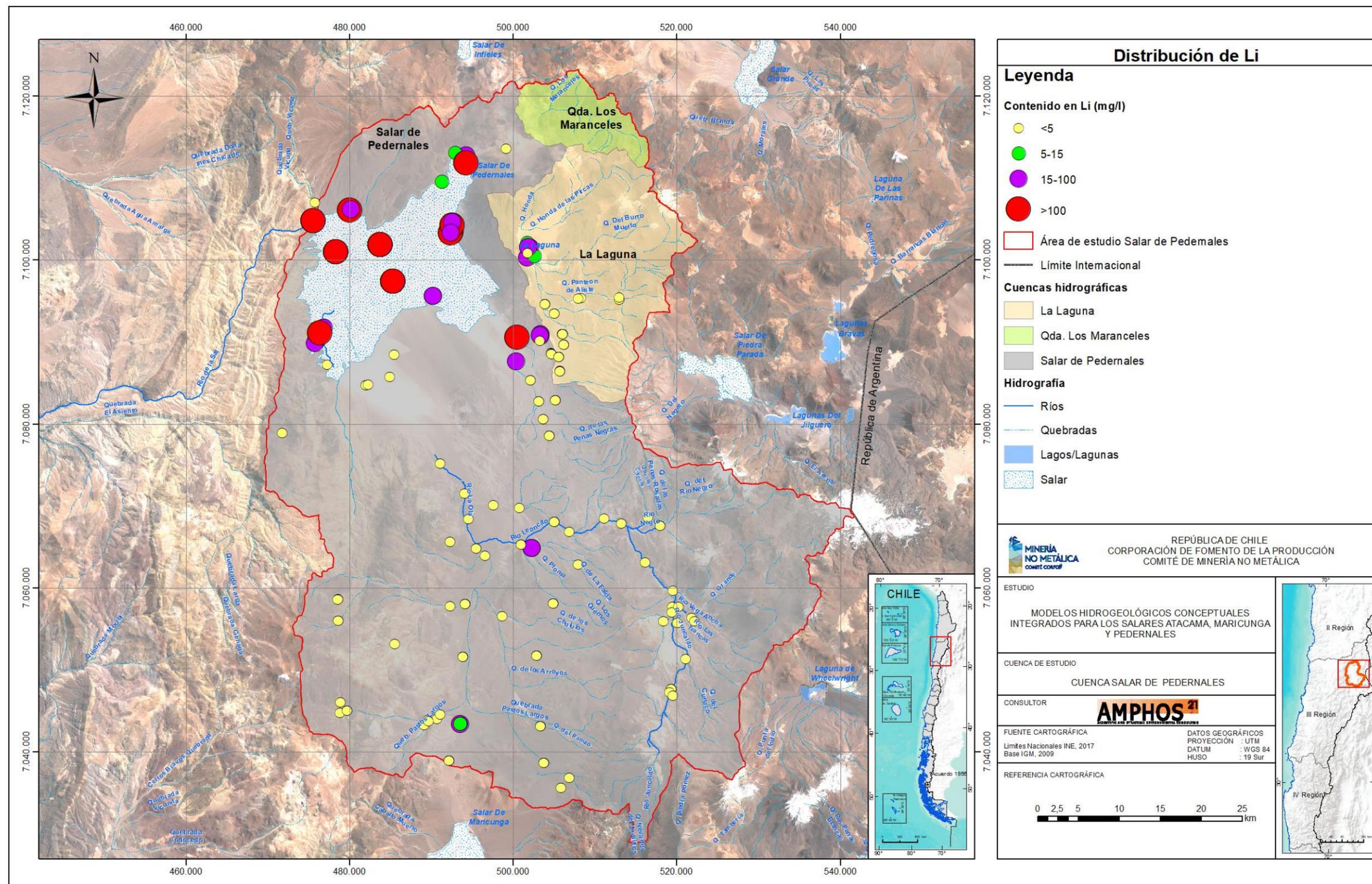


Figura 6-16: Distribución de Li.

Fuente: elaboración propia.

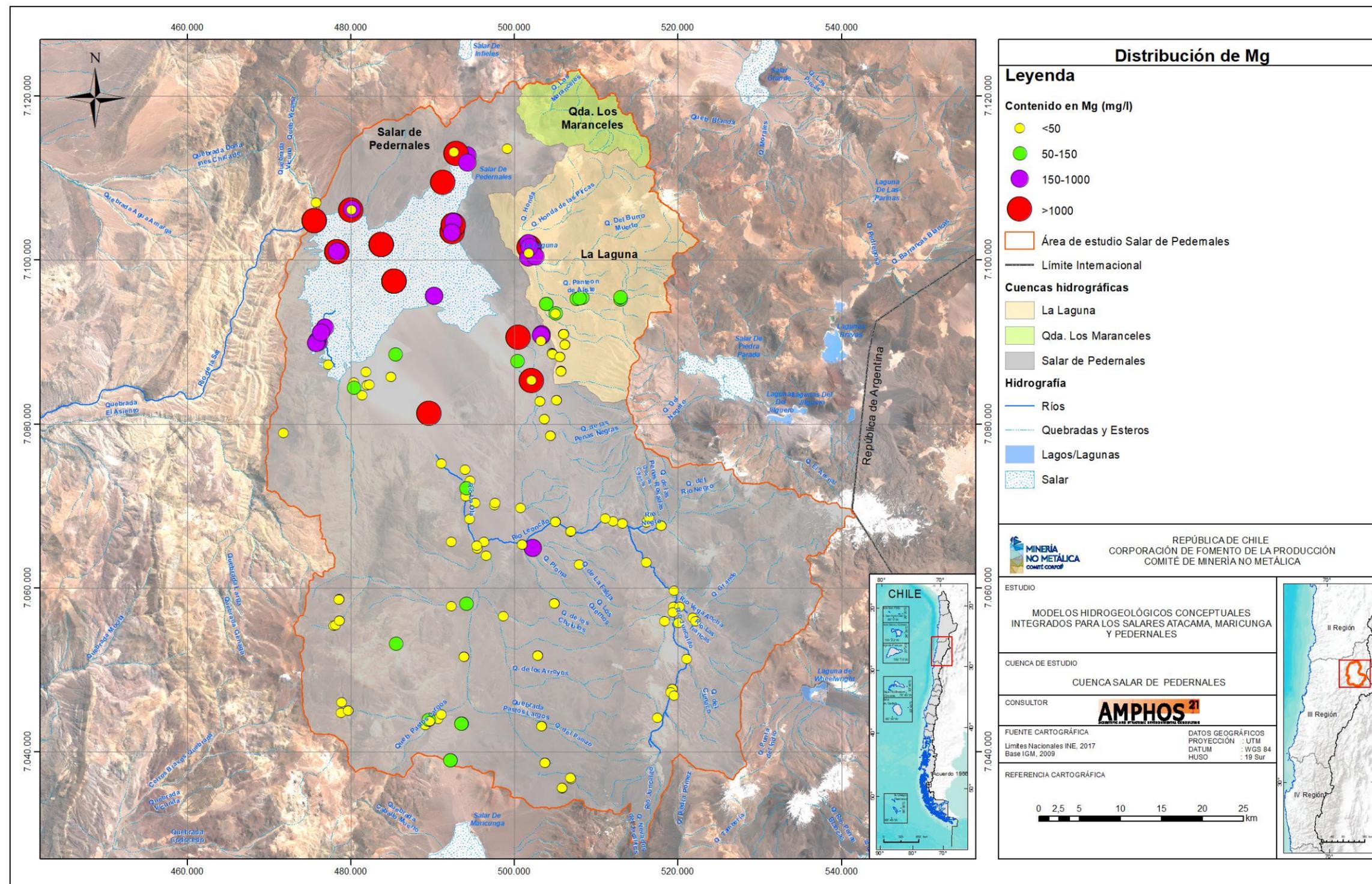


Figura 6-17: Distribución de Mg.

Fuente: elaboración propia.

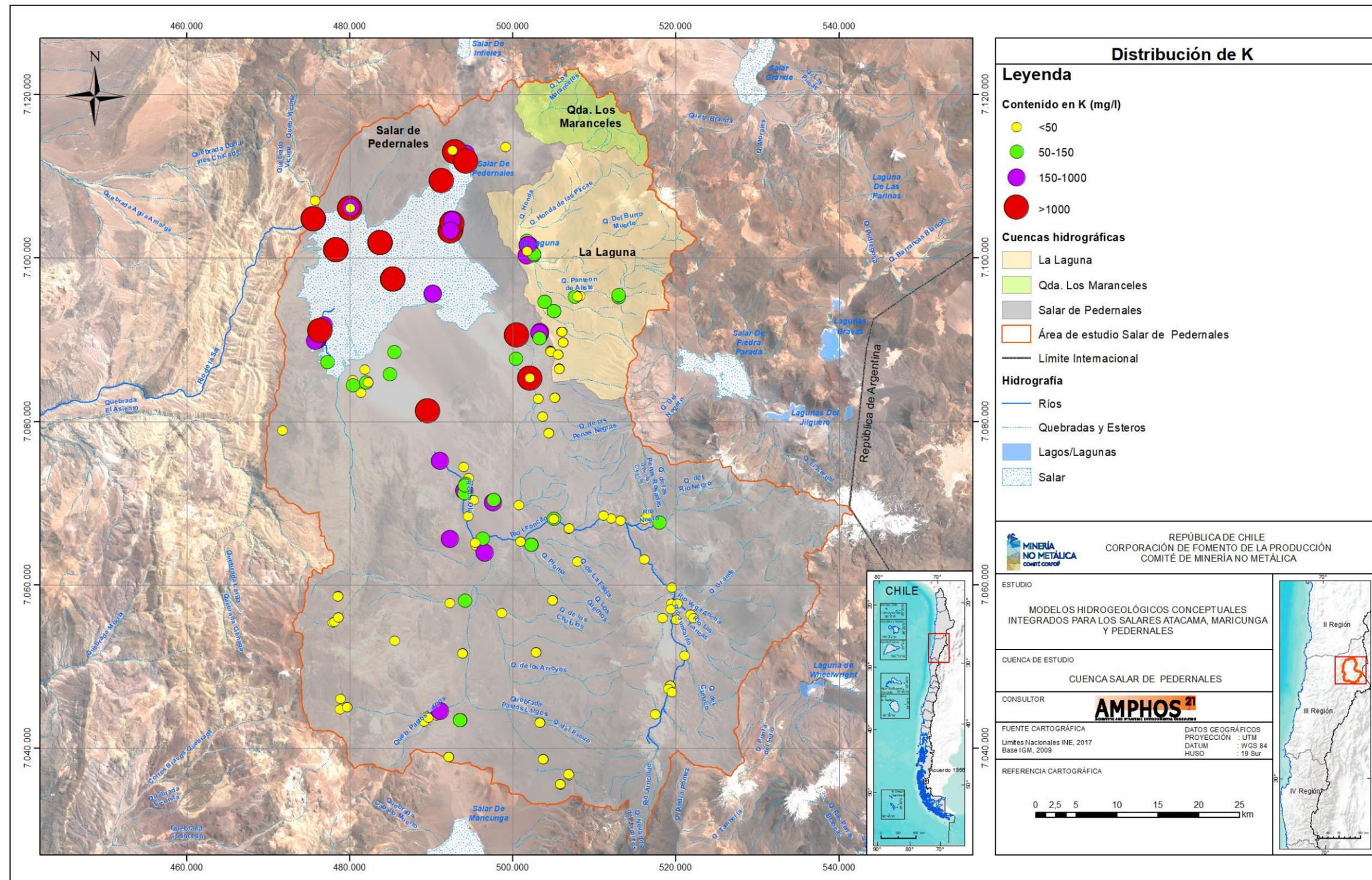


Figura 6-18: Distribución de K.

Fuente: elaboración propia.

## 6.7 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-terreno. 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, y la posible relación entre la dirección de flujo y la variación en la concentración de ciertos elementos.

### 6.7.1 Na/Cl

La relación  $r_{Na/rCl}$  se utiliza para identificar interacción de las aguas con el terreno. Si las aguas presentan una relación cercana a 1, implica que el principal aporte de sodio y de cloruro proviene de la disolución de sales como halita (NaCl). En la Figura 6-19 se presenta la relación  $r_{Na/rCl}$  para las aguas de estudio, en la cual se observa lo siguiente:

- En la parte alta de la cuenca, específicamente en el sector denominado Áreas de Recarga La Ola y Juncalito, las concentraciones de Na y de Cl son las más bajas en comparación con las aguas presentes en los otros sectores. Además, existe un exceso de Na por sobre el Cl, lo cual indicaría que el aporte de Na en estas aguas no proviene únicamente de la disolución de halita si no que, también de silicatos como la plagioclasa (presencia de rocas volcánicas).

Destacan 2 muestras de aguas subterráneas de este sector (CP-13 y CP-06), las cuales muestran mayores concentraciones de Na y Cl en relación con las otras muestras del entorno y una relación similar a 1 lo cual se debe, probablemente, a mezcla con aguas de diferente origen.

- En el sector de los Llanos Leoncito-La Ola-Pedernales y en el sector La Laguna, las aguas presentan una relación  $r_{Na/rCl}$  muy cercana a 1 por lo que el principal origen de estos elementos se atribuye a la disolución de sales tipo halita. Cabe destacar que las aguas en ambos sectores presentan concentraciones intermedias de Na y de Cl, en comparación con las zonas más altas y más bajas de la cuenca (sector Áreas de Recarga La Ola y Juncalito y sector Salar de Pedernales, respectivamente), a excepción de la muestra CP-02 y SPX-4, las cuales presentan concentraciones mayores, similares al sector del Salar.
- Por último, en el sector del Salar de Pedernales, las aguas presentan las mayores concentraciones de Na y de Cl y la relación  $r_{Na/rCl}$  es muy cercana a 1. Por lo tanto, en esta zona existe una interacción de las aguas con las sales del terreno, principalmente sales tipo halita.

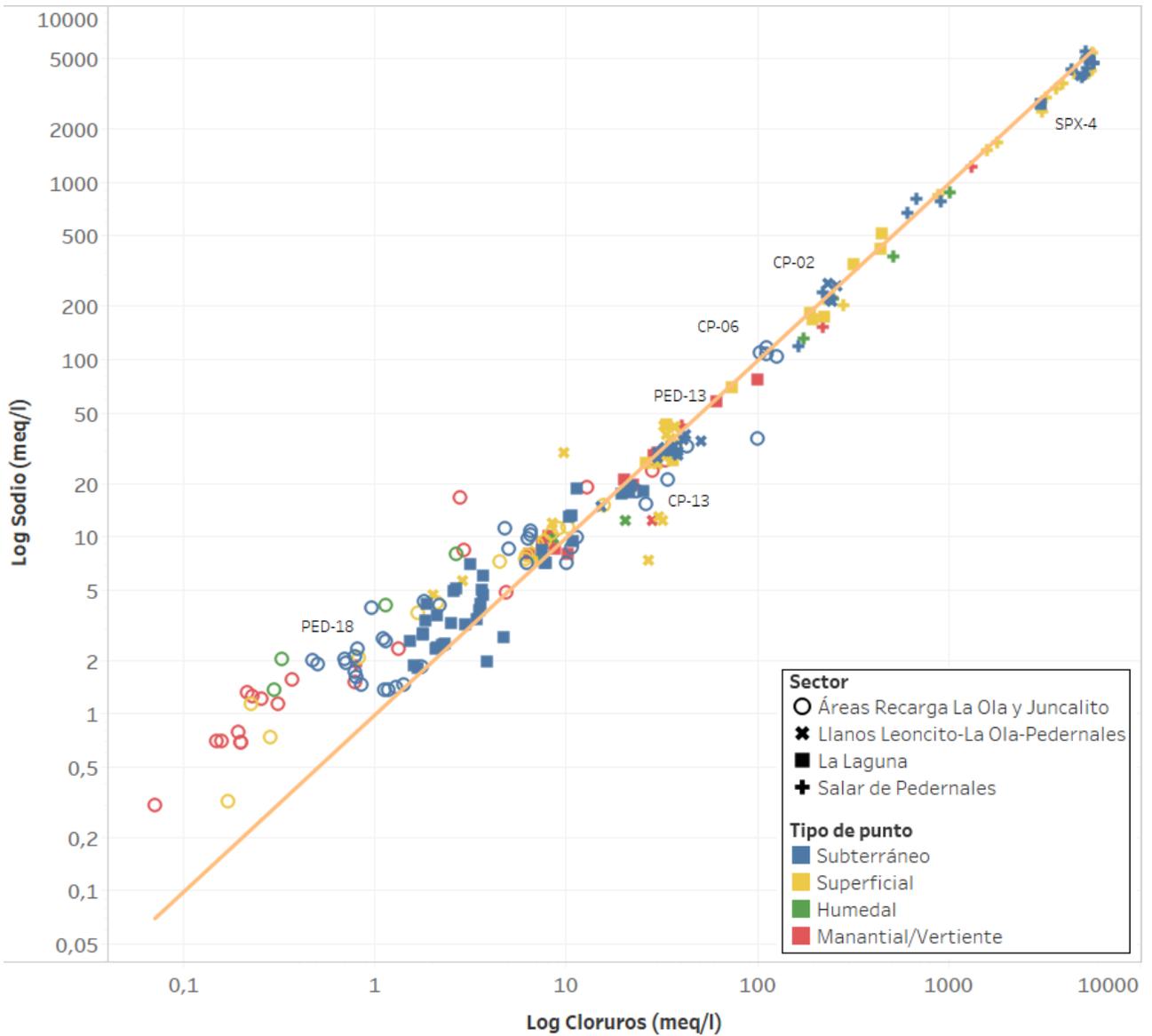


Figura 6-19: Relación Na/Cl de las aguas de la cuenca salar de Pedernales.

Fuente: elaboración propia.

Las aguas de los manantiales y vertientes, ubicados en el sector Salar de Pedernales, presentan algunas anomalías. Específicamente se observan algunas muestras que presentan concentraciones similares a la de las partes altas de la cuenca y un exceso de Na sobre Cl (PED-18), mientras que otras presentan concentraciones intermedias similares a las del sector Llanos Leoncito-La Ola-Pedernales y sector La Laguna, con una relación cercana a 1 (PEM3 y PED-13).

### 6.7.2 Ca/SO<sub>4</sub>

La relación iónica  $rCa/rSO_4$  se utiliza para determinar si los aportes de calcio y sulfatos en las aguas provienen de la disolución de sales como yeso y/o anhidrita.

Es importante mencionar que, en la zona de salares, 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 6-20 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.

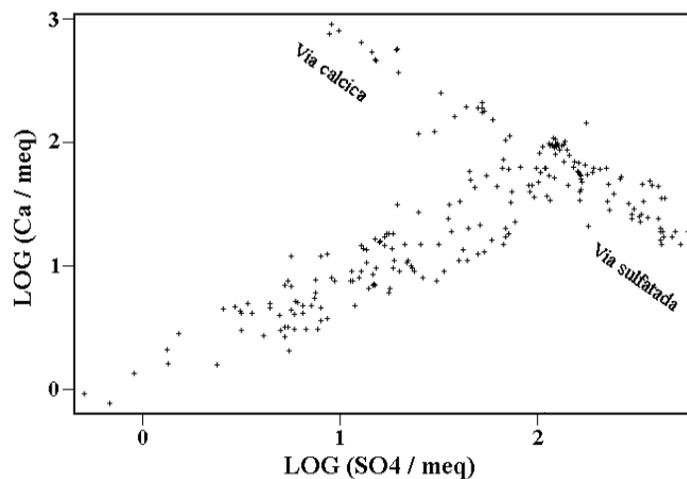


Figura 6-20: Ejemplo de relación  $rCa/rSO_4$  con vías evolutivas (sulfatada y cálcica).

Fuente: Risacher et al. (1999).

En el gráfico de la Figura 6-21 se presenta la relación para las aguas de estudio donde se observa que:

- En aquellas emplazadas en la parte alta de la cuenca (sector Áreas de Recarga La Ola y Juncalito), las aguas no presentan una relación cercana a 1 y, por lo tanto, los aportes de sulfato y calcio no se deben a la disolución de yeso y/o anhidrita.

En este sector destacan 3 puntos de aguas subterráneas; CP-01A, CP-06 y CP-13. En ellas, el exceso de Ca es considerablemente mayor al contenido de SO<sub>4</sub> y, por lo tanto, hay un aporte de Ca que no proviene de la disolución de sulfatos de calcio si no que podría provenir de la disolución de otros minerales como calcita (CaCO<sub>3</sub>) o de mezcla de aguas.

- En el sector Llanos Leoncito-La Ola-Pedernales, las aguas poseen concentraciones de Ca y  $\text{SO}_4$  menores a 10 meq/l, y poseen una relación  $r_{\text{Ca}}/r_{\text{SO}_4}$  cercana a 1, por lo que, el principal aporte de Ca y  $\text{SO}_4$  proviene de la disolución de yeso y se produce de forma moderada.

En esta zona destaca el punto de agua subterránea CP-02, el cual posee mayores concentraciones y un exceso de  $\text{SO}_4$  por sobre el Ca, lo que podría indicar un aporte de aguas con otro origen.

- En el sector de La Laguna, se identifican dos grupos de aguas.

El primero de ellos se conforma de aguas, principalmente, subterráneas, de manantiales y de vertientes, las que presentan concentraciones medias de Ca y  $\text{SO}_4$  (<20 meq/l) y una relación iónica cercana a 1.

Por su parte, el segundo grupo está conformado por aguas superficiales de la laguna ubicada en la parte baja. En ellas, la concentración de Ca y  $\text{SO}_4$  es superior ( $[\text{Ca}] > 30$  meq/l y  $[\text{SO}_4] > 50$  meq/l) y se observa un exceso de sulfato en comparación con el calcio. En estas aguas, probablemente, se esté produciendo la precipitación de yeso y, por lo tanto, las concentraciones de calcio y sulfato comienzan a tener un comportamiento inversamente proporcional (tal como se comentó anteriormente) siguiendo una vía sulfatada (Ver Figura 6-20 y Figura 6-21).

- En las aguas subterráneas y de algunas lagunas del sector del salar de Pedernales, se infiere que, por las altas concentraciones de Ca y  $\text{SO}_4$ , se produce una sobresaturación de yeso donde las aguas siguen una tendencia sulfatada (al igual que el caso anterior de La Laguna).

En la mayoría de los puntos de humedales y manantiales/vertientes del sector Salar de Pedernales, se observa una tendencia diferente. En ellos las concentraciones son moderadas, similares a las zonas intermedias de la cuenca, y los aportes de Ca y  $\text{SO}_4$  no provienen de la disolución de yeso.

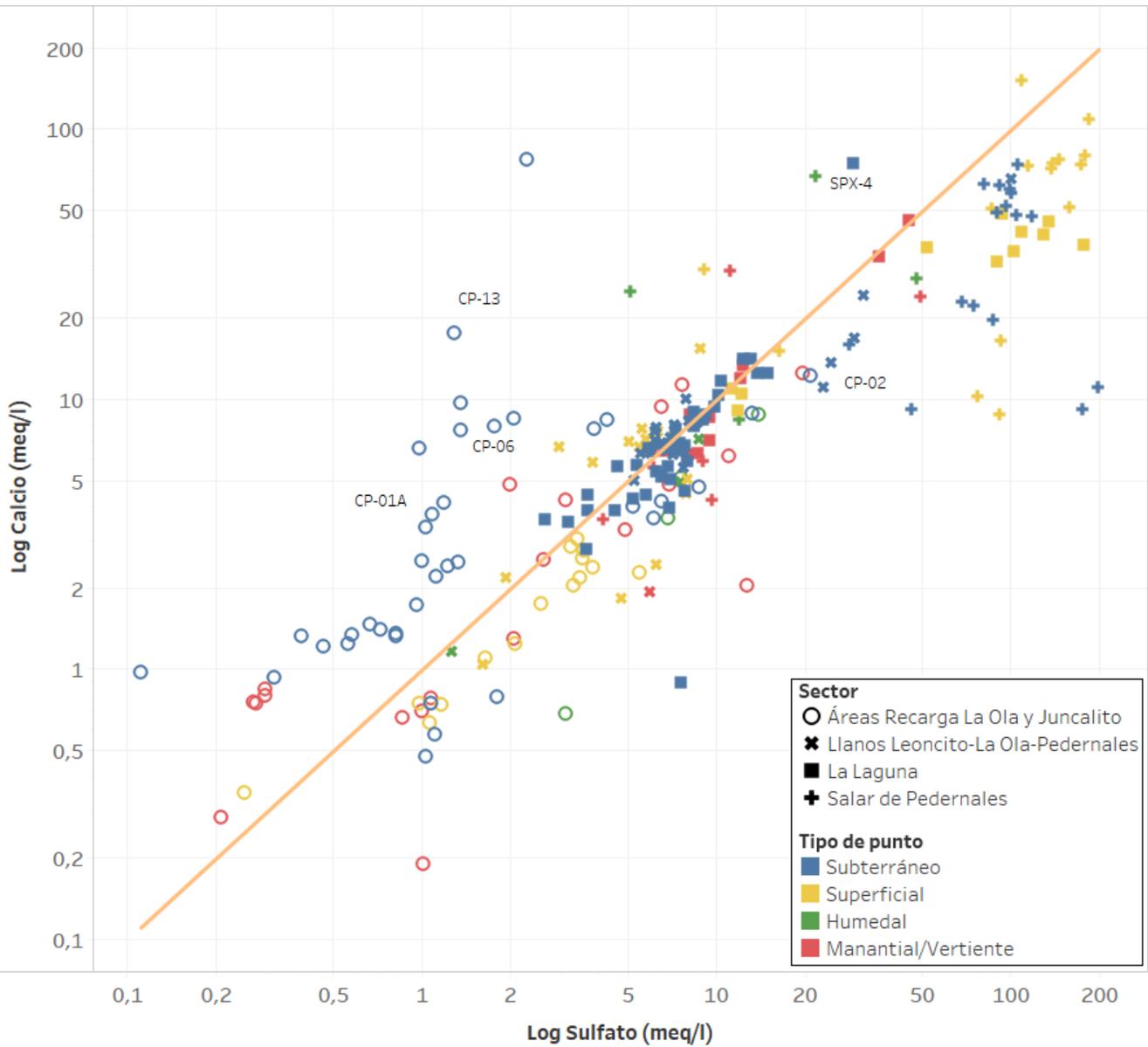


Figura 6-21: Relación Ca/SO<sub>4</sub> de las aguas de la cuenca salar de Pedernales.

Fuente: elaboración propia.

### 6.7.3 Ca/HCO<sub>3</sub>

La relación  $rCa/r HCO_3$  cercana a 1 indica que los aportes de Ca y HCO<sub>3</sub> en las aguas provienen de la disolución de carbonatos de calcio como calcita. En la Figura 6-22 se presenta esta relación para las aguas de la cuenca Salar de Pedernales.

En el área de estudio, en general, las concentraciones de bicarbonato son bajas (<10 meq/l) y presentan un exceso de calcio, por lo que el aporte de este elemento no se debe a la disolución de carbonatos de calcio.

Se observa que algunos de los puntos ubicados en la parte alta de la cuenca presentan un exceso de bicarbonato cuya proveniencia, probablemente, sea a partir de las aguas bicarbonatadas de precipitación.

Adicionalmente, se distinguen dos zonas en la que las aguas presentan una relación  $rCa/r HCO_3$  cercana a 1: la parte alta de la cuenca y aguas abajo de la zona de recarga de la Quebrada Panteón de Aliste en el sector La Laguna (SPX-8 y SPB-13).

En el recorrido de las aguas ubicadas en la parte alta de la cuenca, probablemente, se ha producido la interacción de las aguas con las litologías sedimentarias carbonatadas de la Cordillera de Domeyko, lo cual explicaría que el aporte de Ca y HCO<sub>3</sub> provenga de la disolución de calcita.

En los puntos ubicados aguas abajo de la quebrada Aliste, la relación cercana a 1 se debe, probablemente, a la mezcla con las aguas de recarga provenientes de la zona de Aliste.

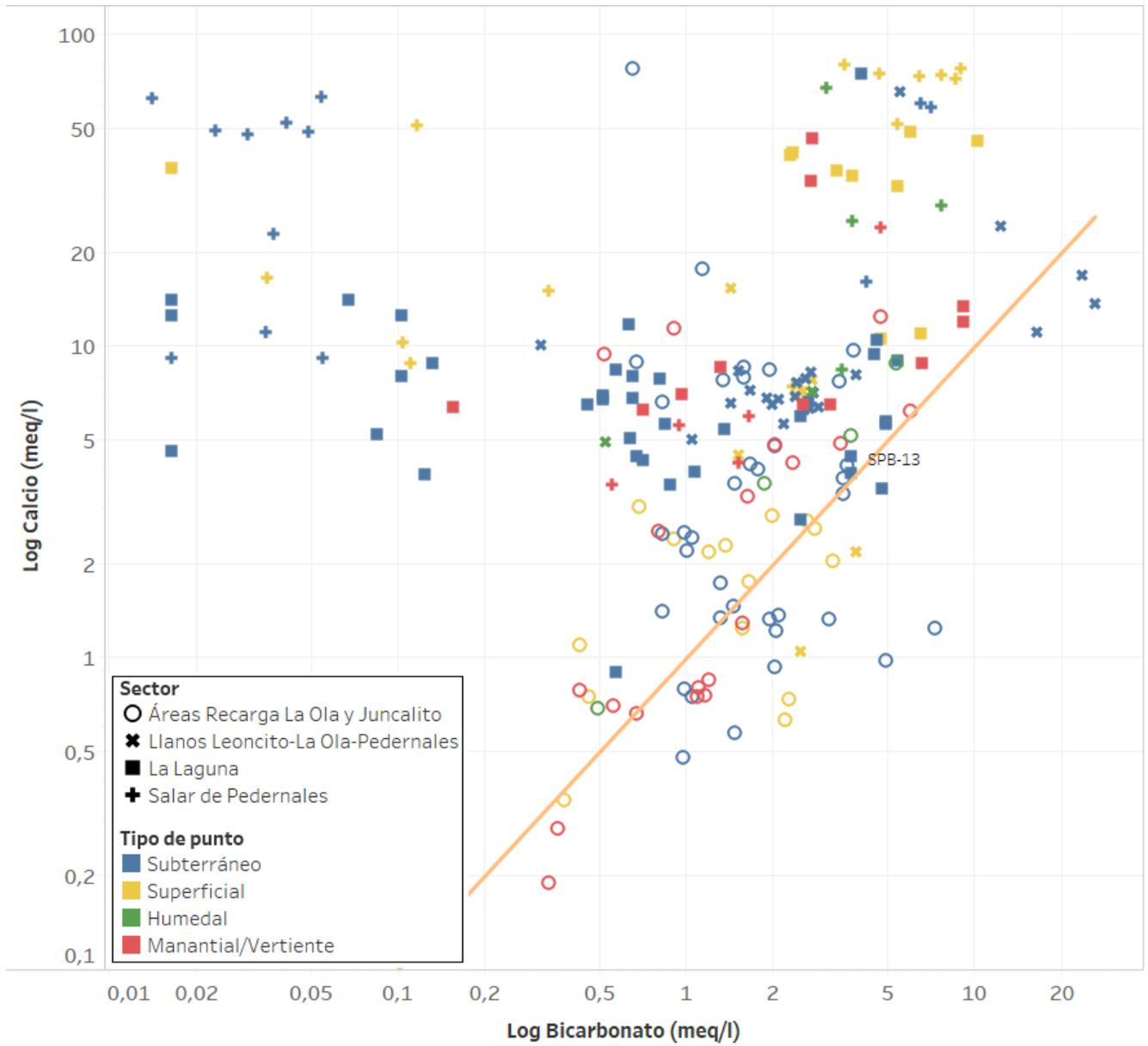


Figura 6-22: Relación Ca/HCO<sub>3</sub> de las aguas de la cuenca salar de Pedernales.

Fuente: elaboración propia.

## 6.9 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 ( $\delta^2\text{H}$  o  $\delta\text{D}$ ) y  $\delta^{18}\text{O}$ . Para el respectivo análisis, se han utilizado 111 analíticas desprendidas de los antecedentes recopilados de las cuales 57 pertenecen al estudio de Codelco (2017), 16 a DGA (2016), 10 a DGA (2009), 5 a Sernageomin (2005) y 23 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 manera, 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.

### 6.9.1 Evolución temporal $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$

Para caracterizar la evolución temporal de los isótopos del agua, se han analizado las muestras que tuviesen, al menos, 3 mediciones de  $\delta^{18}\text{O}$  y de  $\delta^2\text{H}$ , sumando un total de 14 muestras de las cuales 13 se han clasificado como puntos subterráneos y 1 como un punto superficial correspondiente a los ojos del salar (S-01).

En la Figura 6-23 y en la Figura 6-24 se ilustran los gráficos con la evolución temporal del  $\delta^{18}\text{O}$  y del  $\delta^2\text{H}$ , respectivamente. En ellas se observa que no se han registrado variaciones significativas en las mediciones de los mencionados parámetros.

Destaca el punto de agua superficial (S-01) el cual posee los valores de  $^{18}\text{O}$  y  $^2\text{H}$  más elevados, y por ende las aguas están más enriquecidas en isótopos pesados. Esto se debe, muy probablemente, a los procesos de evaporación a los que está expuesta el agua por estar a la intemperie.

Por último, debido a la inexistencia de variaciones significativas en las distintas campañas de monitoreo, para las relaciones que se describirán a continuación, se tomará el último análisis realizado en cada una de estas muestras.

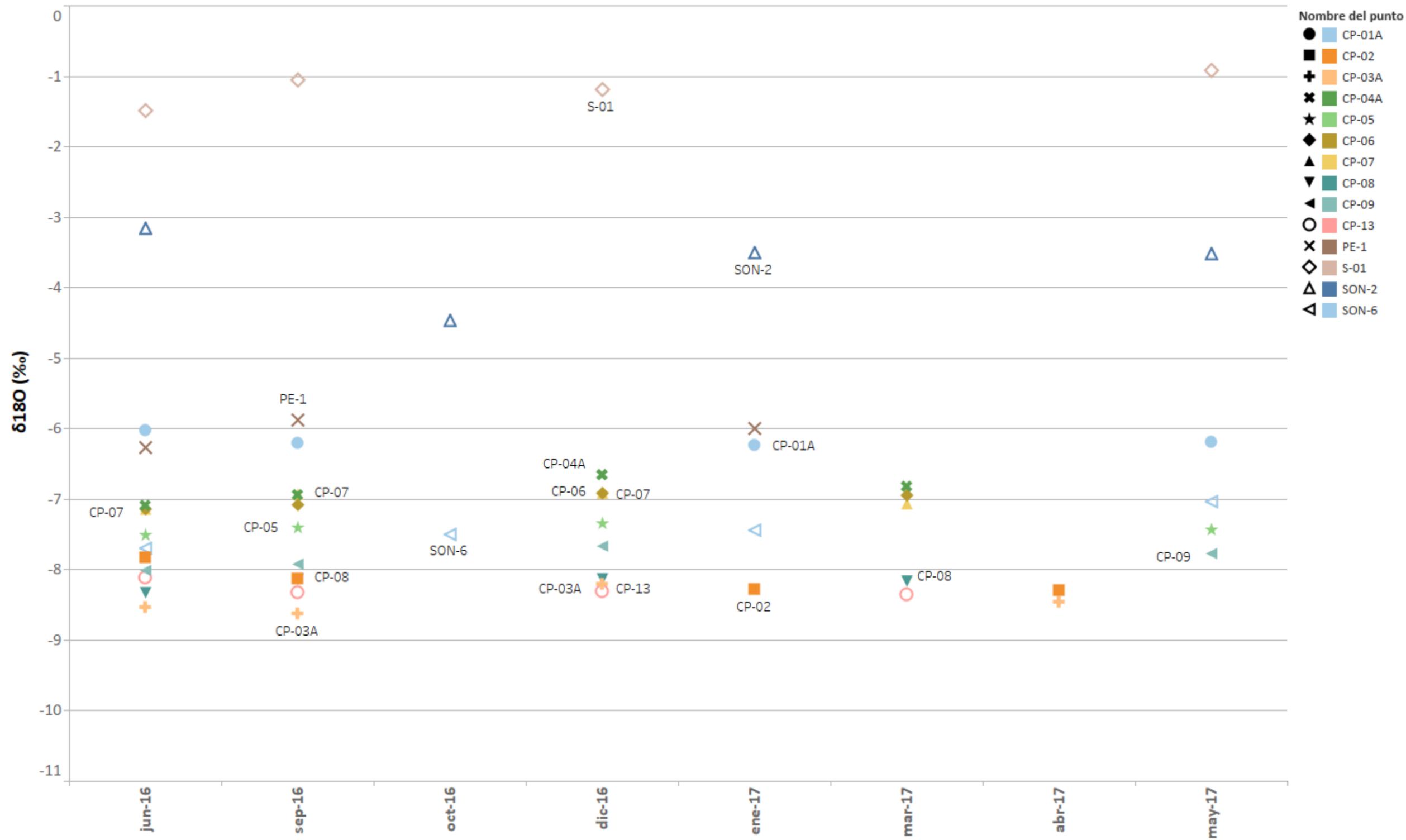


Figura 6-23: Evolución temporal de δ<sup>18</sup>O en las aguas estudiadas.

Fuente: elaboración propia.

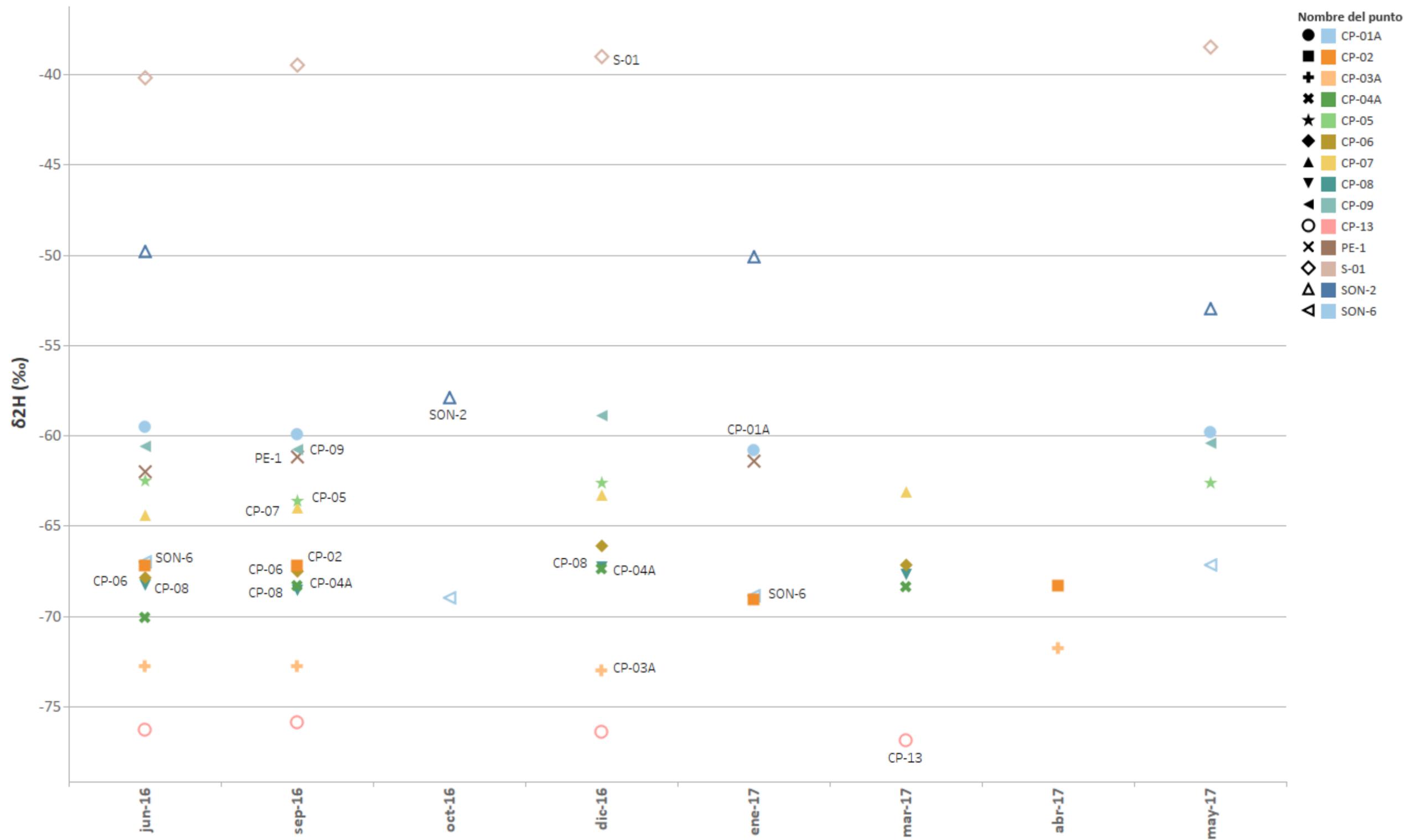


Figura 6-24: Evolución temporal de δ²H en las aguas estudiadas.

Fuente: elaboración propia.

### 6.9.2 Relación $\delta^2\text{H} / \delta^{18}\text{O}$

Para el análisis de la relación de los isótopos de  $\delta^2\text{H}$  y  $\delta^{18}\text{O}$ , 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:

$$\begin{aligned} \text{MWL:} & \quad \delta D = 8 \cdot \delta^{18}O + 10 \\ \text{LMWL:} & \quad \delta D = 7,8 \cdot \delta^{18}O + 9,7 \\ \text{MWL s/D:} & \quad \delta D = 8 \cdot \delta^{18}O \end{aligned}$$

Por lo tanto, las muestras tomadas en la cuenca Salar de Pedernales 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  $\delta^2\text{H}$  versus  $\delta^{18}\text{O}$  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  $\delta^2\text{H}$  y  $\delta^{18}\text{O}$ . Dado que presentan pendientes entre 4 y 5, es posible sugerir que han sido afectadas por procesos asociados a evaporación desde una superficie libre o 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.

A partir del gráfico se desprende que todas las aguas del sector Áreas de Recarga La Ola y Juncalito, se encuentran agrupadas y presentan una distribución cercana a la línea meteórica sin exceso de deuterio (MWL s/D) con valores isotópicos enriquecidos en isótopos livianos, indicando una composición del agua típica de precipitaciones en zonas elevadas con baja afectación de procesos que produzcan fraccionamiento. Existe una sola excepción de un manantial/vertiente (PED-10), ubicado en la zona de captaciones Pastos Largos, la cual es netamente más enriquecida en  $\delta^2\text{H}$  y  $\delta^{18}\text{O}$ . En el estudio de origen (Risacher et al., 1999), se argumenta que podría reflejar la evaporación del agua al fluir muy lentamente. Sin embargo, no se condice con los valores isotópicos de la muestra Vega Ped, clasificada como humedal, donde se esperaría un comportamiento inverso debido al estancamiento del agua en los humedales y la consecuente evaporación de ésta.

Los sectores Llanos Leoncito-La Ola-Pedernales presentan valores isotópicos similares a los del Área de Recarga La Ola y Juncalito, indicando un ligero enriquecimiento en  $\delta^2\text{H}$  y  $\delta^{18}\text{O}$  respecto al primer sector, lo cual concuerda con un enriquecimiento menor debido al recorrido del agua desde los sectores altos de la cuenca hacia las partes más bajas de éstas.

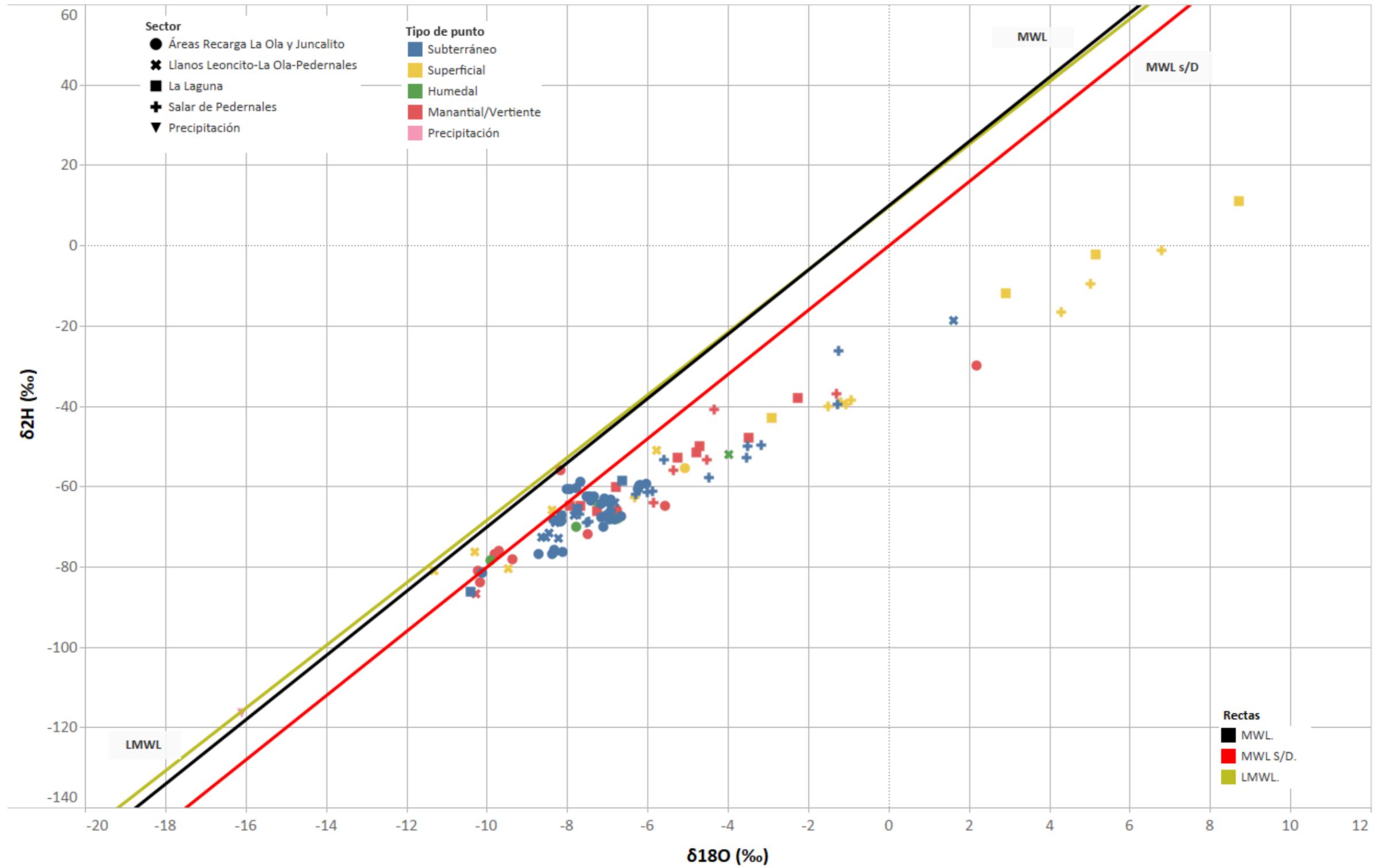


Figura 6-25: Composición isotópica  $\delta^2H$  v/s  $\delta^{18}O$  de las aguas analizadas.

Fuente: elaboración propia.

En el sector Salar de Pedernales es posible encontrar las aguas más enriquecidas en isótopos pesados respecto a los sectores descritos anteriormente, mostrando un claro efecto de la evaporación desde una superficie libre. Cabe notar que las muestras superficiales presentan los valores más enriquecidos respecto a los subterráneos y manantiales y coinciden con muestras tomadas en las lagunas situadas en los bordes del salar.

Por su parte, las muestras del sector La Laguna presentan un claro comportamiento en donde las aguas subterráneas poseen un empobrecimiento en isótopos pesados, indicando una recarga directa mediante precipitaciones con poca evaporación. A su vez, las aguas de manantiales/vertientes denotan haber sufrido mayor evaporación que las subterráneas. Este proceso se incrementa en las aguas superficiales, mostrando muestras enriquecidas en isótopos pesados.

Finalmente, cabe destacar el caso de la única muestra de precipitación (Nieve-1), dispuesta justo sobre la línea meteórica local (LWML), propuesta por Aravena et al. (1997), la cual muestra valores isotópicos empobrecidos en isótopos pesados. Clark y Fritz (1997) y Risacher et al. (1999) sugieren que la sublimación de la nieve en zonas áridas genera un enriquecimiento isotópico en las aguas remanentes, lo cual no es observado en esta muestra en particular. Una posible explicación es que la nieve no haya sufrido suficiente sublimación en el período de la toma de muestra (septiembre, 2016), siendo esta fecha muy cercana a posibles eventos de precipitaciones ocurridas en el invierno de ese año.

### 6.9.3 Relación Altitud / $\delta^{18}\text{O}$

En las aguas de lluvia existe un efecto asociado a la altitud, en el cual los contenidos de  $^{18}\text{O}$  y D disminuyen al aumentar la altura y se convierten 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/  $\delta^{18}\text{O}$  debiesen generar una recta denominada recta altitudinal (ver línea negra continua en Figura 6-26).

Una vez determinada la recta altitudinal, se grafican las demás muestras de agua 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).

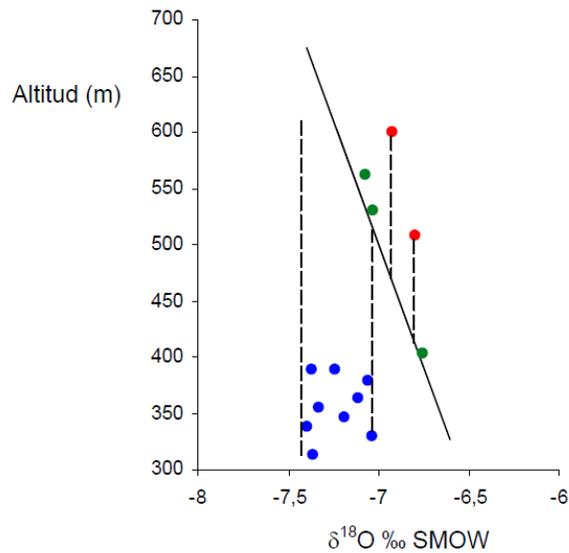


Figura 6-26: Ejemplo de una relación entre diferentes muestras de aguas y la recta altitudinal local. Fuente: FCIHS (2009).

Fuente: elaboración propia.

En la Figura 6-27 se ha graficado la cota topográfica de cada muestra y su contenido en  $\delta^{18}\text{O}$ , clasificadas en función del tipo de agua y su ubicación en la cuenca.

Debido a que solo se posee información de un solo punto de agua de precipitación, no se ha podido establecer la recta altitudinal local para la zona de estudio. No obstante, es conocido que ésta es una recta con pendiente negativa y, por lo tanto, las aguas de precipitación ubicadas en una cota topográfica mayor a los 3.870 m s.n.m. (altura topográfica de muestra Nieve-1) debiesen tener un valor de  $\delta^{18}\text{O}$  menor a -16 ‰.

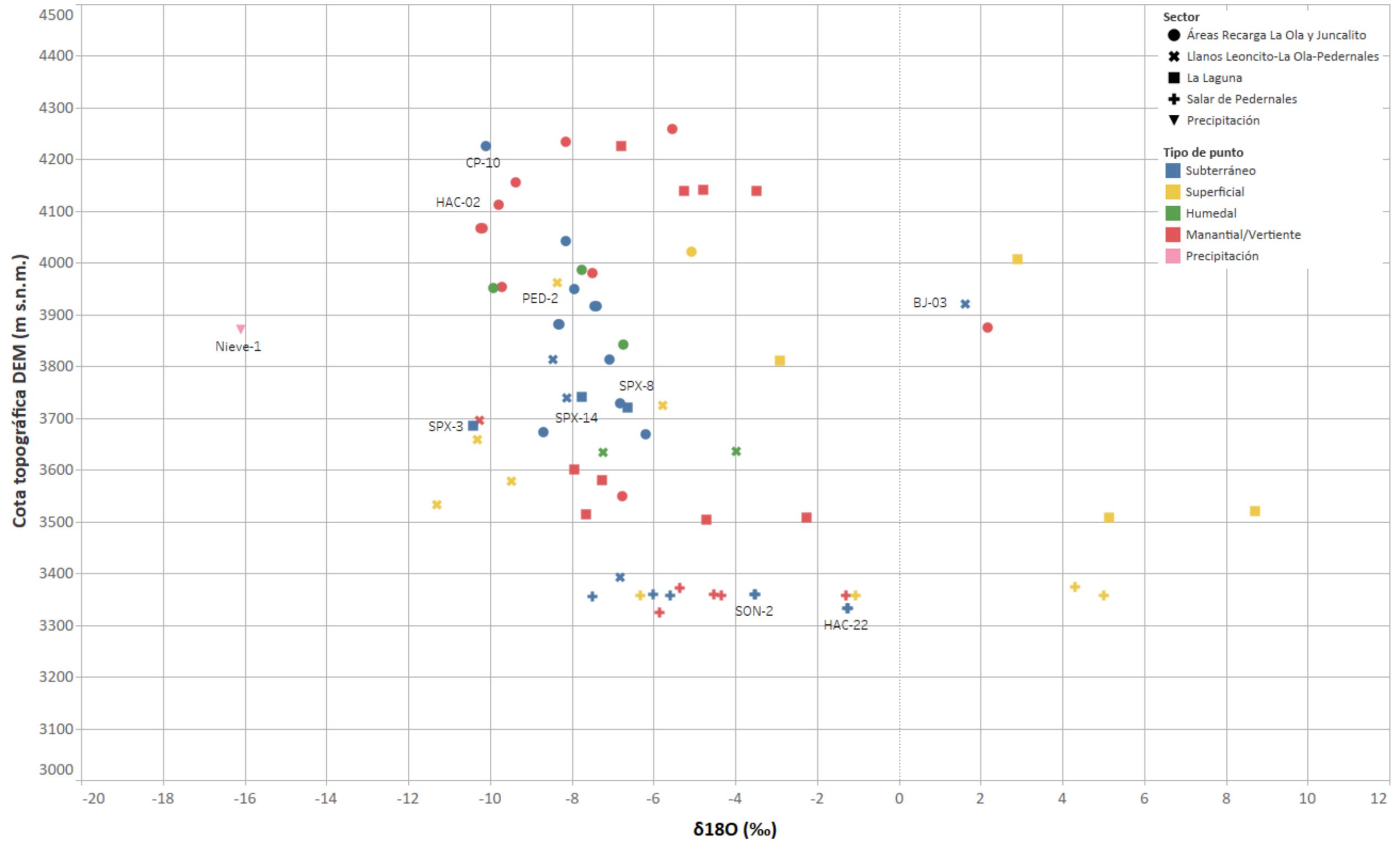


Figura 6-27: Relación de la cota topográfica de muestreo v/s  $\delta^{18}O$  de las aguas analizadas.

Fuente: elaboración propia.

Sin embargo, las muestras emplazadas a alturas mayores a los 3.870 m s.n.m. poseen concentraciones de  $\delta^{18}\text{O}$  por sobre  $-11\%$ , por lo que se trataría de aguas que están por sobre la recta altitudinal. En consecuencia, se trata de aguas isotópicamente más enriquecidas en isótopos pesados en comparación con las aguas de recarga por precipitación lo cual se debe, probablemente, a procesos de evaporación, a enriquecimiento por interacción agua-roca o a mezcla de aguas.

Debido a que no se puede trazar la recta altitudinal, ésta se definirá en función de los gradientes topográficos del  $\delta^{18}\text{O}$  típicos de la bibliografía, los cuales varían de  $-0,15$  a  $-0,5\%$  cada 100 m (FCIHS, 2009). Así, se podrá comparar con aquellas cotas topográficas menores a la de la muestra de precipitación con la que se cuenta (Nieve-1),

En base a cualquiera estos valores de gradiente, todas las muestras del área de estudio se encontrarían por sobre la recta altitudinal, por lo que las aguas presentan un mayor enriquecimiento en isótopos pesados en comparación con las aguas de recarga de precipitación a la misma cota topográfica y, por lo tanto, las aguas han sufrido, probablemente, procesos de evaporación, de enriquecimiento por interacción agua-roca o de mezcla con aguas enriquecidas en isótopos pesados.

Por otro lado, se observa que, en general, las aguas subterráneas independientemente de la altura a la que se encuentren, poseen valores de  $\delta^{18}\text{O}$  dentro del mismo rango ( $-9$  a  $-6\%$ ), a excepción de los siguientes puntos:

- CP-10, sector Área de Recarga La Ola y Juncalito: las aguas en este punto se encuentran más empobrecidas en isótopos pesados que el resto de las aguas subterráneas en el mismo sector. Esto se debe, probablemente, a que el pozo se encuentra en la parte más alta, en el límite sureste de la cuenca, por lo que el agua ha permanecido menos tiempo en el acuífero, ha sufrido menos procesos de interacción agua-roca y posee una composición más similar a las aguas de recarga por precipitación.
- BJ-03, sector Llanos Leoncito-La Ola-Pedernales: en este punto las aguas se encuentran enriquecidas en isótopos pesados, en comparación con las demás aguas del sector. Se observa que las aguas superficiales emplazadas en el río Negro (PED-02) y los manantiales ubicados aguas arriba (HAC-02) se encuentran menos enriquecidas en isótopos pesados. Además, la temperatura del agua en el punto BJ-03 es de ( $13,5^{\circ}\text{C}$ ), por lo que se descarta que el enriquecimiento se deba por aporte de aguas superficiales o flujos hidrotermales. Es probable que el enriquecimiento se deba a que las aguas en el piezómetro estaban estancadas o a un error en la toma de la muestra.
- SPX-3, sector La Laguna: la composición de las aguas en este punto es menos enriquecida en isótopos pesados en comparación con las aguas subterráneas de los puntos SPX-8 y SPX-14 y de los manantiales ubicados en el mismo sector, pero emplazados al norte, donde las aguas poseen una composición diferente asociada a la recarga proveniente de la Quebrada de Aliste.

A modo de ejemplo, la temperatura de las aguas en el sector norte fluctúa entre los 18 y 27°C, mientras que en el sector sur fluctúa entre los 11 y 20°C.

- HAC-22, SON-2, PLP, sector Salar de Pedernales: en estos puntos las aguas poseen una composición enriquecida en isótopos pesados, en comparación con las otras aguas de la zona de estudio. Dicho enriquecimiento se debe, muy probablemente, por la interacción agua-terreno, específicamente por disolución de sales que poseen oxígeno en su red cristalina, como el yeso, enriqueciendo progresivamente las aguas en  $^{18}\text{O}$ .

#### 6.9.4 Relación $\text{B}^{3+}/\text{Cl}^-$ / $\delta^{18}\text{O}$

En la Figura 6-28 se muestra el gráfico con la relación de boro disuelto ( $\text{B}^{3+}$ ) normalizado por cloruro ( $\text{Cl}^-$ ) v/s el  $\delta^{18}\text{O}$ . Debido a que el boro y el cloruro son elementos conservativos, el normalizar el boro por el cloruro (eje "y" del gráfico) permite eliminar las fluctuaciones asociadas a procesos que involucre 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  $\text{B}^{3+}/\text{Cl}^-$ . De modo contrario, si existen procesos de disolución/precipitación o mezcla con otras aguas, estos podrían aumentar o disminuir la concentración de  $\text{B}^{3+}$  con respecto a  $\text{Cl}^-$ , dependiendo del contenido de estos elementos en las sales.

Dicho esto, en la Figura 6-28 podemos determinar que:

- En el sector Área de Recarga La Ola y Juncalito, en general, las aguas poseen una relación  $\text{B}^{3+}/\text{Cl}^-$  que fluctúa entre 0,008 y 0,06. Sin embargo, se observa que las aguas subterráneas de los puntos CP-13, CP-06, CP-01A y CP-04A, todos ellos ubicados al norte del salar de Maricunga y siguiendo una línea de flujo, poseen una relación  $\text{B}^{3+}/\text{Cl}^-$  que fluctúa entre 0,001 y 0,005. Por lo tanto, la diferencia en la concentración de estos puntos con el resto se debe, probablemente, a procesos asociados a la interacción agua roca o a que en dicho sector existe un aporte de aguas de diferente composición.

Cabe destacar que en este sector las aguas poseen una composición isotópica similar, a excepción del punto PED-10, correspondiente a un manantial, donde las aguas se encuentran más concentradas en isótopos pesados y poseen una temperatura cercana a los 22°C, lo que indicaría un posible aporte hidrotermal.

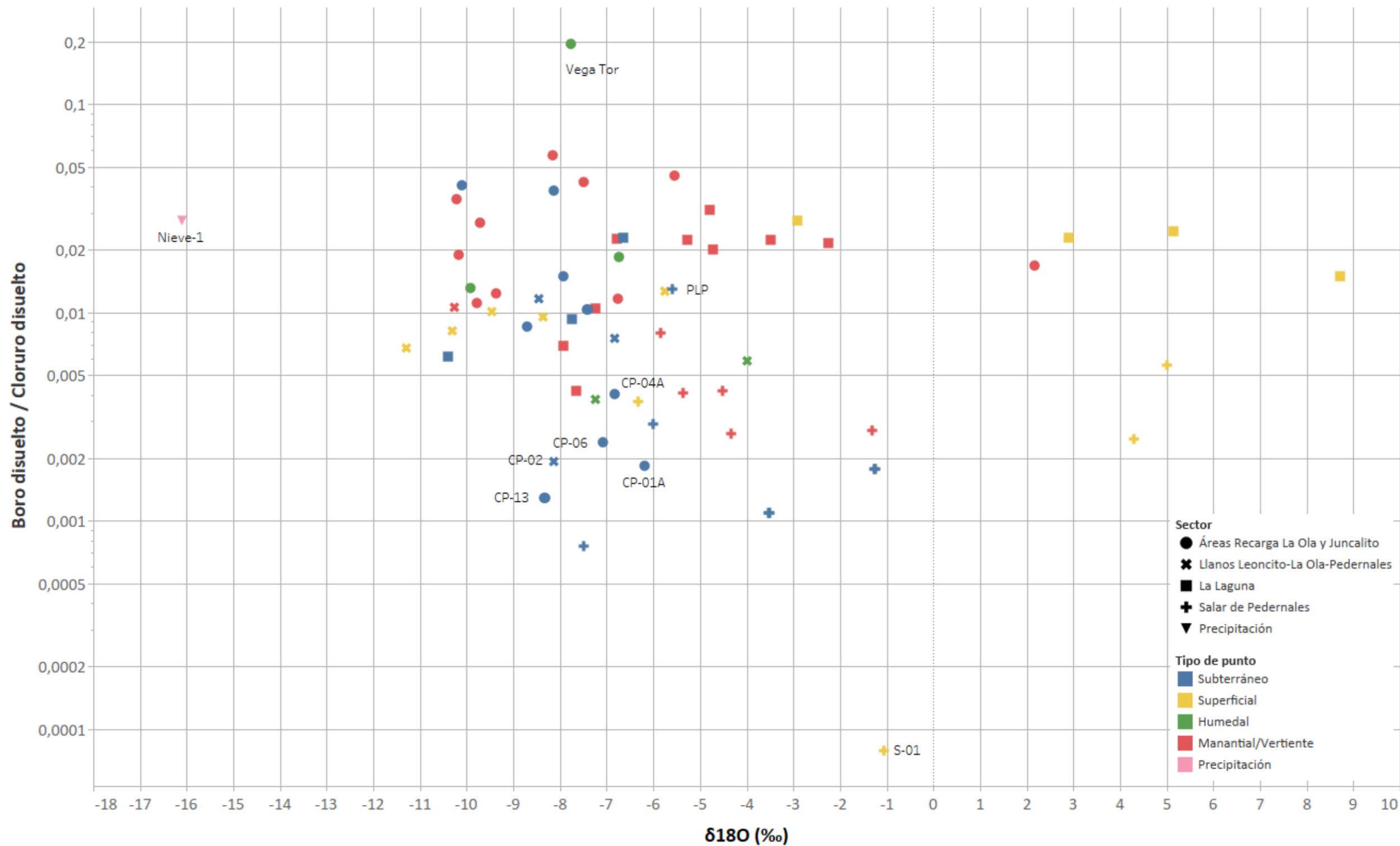


Figura 6-28: Relación B<sup>3+</sup>/Cl<sup>-</sup> / δ<sup>18</sup>O en las aguas de estudio.

Fuente: elaboración propia.

- En el sector de los Llanos Leoncito-La Ola-Pedernales las aguas poseen una relación de  $B^{3+}/Cl^-$  y una composición isotópica similar, por lo que las aguas tienen un origen similar.

Excepción de ello es un punto de agua subterránea, denominado CP-02, el cual posee una relación  $B^{3+}/Cl^-$  inferior y un valor de conductividad eléctrica superior ( $>20.000 \mu S/cm$ ) al de las aguas cercanas ( $\sim 4.000 \mu S/cm$ ), Además, la temperatura de las aguas en este punto fluctúa considerablemente, con un valor mínimo medido de  $9,8 \text{ }^\circ C$  y un valor máximo de  $19,8^\circ C$ , por lo que en este punto existiría un aporte de aguas de diferente origen, posiblemente hidrotermal.

- En el sector La Laguna se observa que hacia el norte las aguas poseen una relación de  $B^{3+}/Cl^-$  mayor y son más enriquecidas en isótopos pesados en comparación con las aguas del sur del sector (SPX-3). Dicha variación se debe, probablemente, a los aportes subterráneos provenientes de la Quebrada de Aliste.
- Por último, en el sector del Salar de Pedernales las aguas presentan diferencias en la relación  $B^{3+}/Cl^-$  asociada, principalmente, a las diferentes concentraciones de boro disuelto en las aguas, la cual varía en los diferentes puntos del salar. Además, se observa que las aguas superficiales poseen una mayor concentración de isótopos pesados en comparación con las aguas subterráneas y de manantiales, lo cual se debe principalmente a procesos de evaporación.

El punto que muestra una mayor diferencia en dicha relación es el punto S-01 correspondiente a los ojos del salar, en el cual la concentración de boro disuelto es de  $16 \text{ mg/l}$ , valor bajo en comparación con los otros puntos tales como el SON-6 con valor de boro disuelto de  $153 \text{ mg/l}$ , el punto SON-2 con un valor de  $221 \text{ mg/l}$  y el punto PED.F054 con un valor de  $282 \text{ mg/l}$ . Además, este punto presenta una concentración de isótopos pesados similar a la del punto de agua subterránea HAC-22 y PED-16 y menos enriquecida que las aguas superficiales de las lagunas ubicadas en el sector noreste del salar. Por lo tanto, en este punto, muy probablemente, existen procesos de disolución/precipitación y evaporación.

## 6.10 Modelo hidrogeoquímico

En la cuenca del Salar de Pedernales es posible diferenciar el tipo de aguas en base a su ubicación geográfica, composición química e isotópica. En base a estas observaciones es posible determinar direcciones de flujo, las que se detallan a continuación.

Las aguas del sector Áreas de Recarga La Ola y Juncalito provienen de las zonas más elevadas que delimitan la cuenca y poseen, en general, las menores concentraciones. Estas aguas diluidas presentan composiciones que varían entre cloruradas sódicas, sulfatadas cálcicas y bicarbonatadas sódicas. Esta variabilidad composicional de las aguas de recarga se atribuye a la diversidad geológica de la cuenca y posible mezcla de aguas.

Los principales aportes diluidos provienen desde el sur y sur-oeste de la cuenca. Complementariamente, los aportes sur-orientales derivados del curso superior del río Juncalito son distintos, destacando por sus elevadas conductividades y altos contenidos de boro, que coinciden con afloramientos de aguas termales.

Los datos isotópicos indican que las aguas de los sectores de recarga se encuentran empobrecidas en  $\delta D$  y  $\delta^{18}O$  sugiriendo una composición del agua similar al de precipitaciones en zonas elevadas con baja afectación de procesos que produzcan fraccionamiento isotópico.

Posteriormente, las aguas procedentes de los sectores de recarga transitan por los Llanos de La Ola, Leoncito y Pedernales adquiriendo mayores concentraciones y, por tanto, mayores conductividades. En general, corresponden a aguas cloruradas sódicas, donde se han mezclado con aguas de aportes del Río Juncalito (aportes sur-orientales) y de la zona sur y sur-oeste de la cuenca.

Los valores isotópicos de este Sector son similares a los del Área de Recarga La Ola y Juncalito, indicando un ligero enriquecimiento en  $\delta D$  y  $\delta^{18}O$  respecto al primero, lo cual concuerda con un enriquecimiento menor debido al recorrido del agua desde los sectores altos de la cuenca hacia las partes más bajas de éstas y una consecuente evaporación de ésta a lo largo de su trayectoria.

Las direcciones de flujo tanto superficiales como subterráneas convergen hacia las zonas más bajas de la cuenca, en el Sector Salar de Pedernales. Las aguas de este sector aumentan significativamente su concentración de sales debido a procesos reiterativos de precipitación-disolución y evaporación al disminuir la profundidad del nivel freático.

Se observa que el flujo del agua, independiente de su composición inicial, tiende a evolucionar químicamente al tipo clorurado sódico. El sodio y el cloruro son altamente solubles, por lo que pueden alcanzar concentraciones elevadas antes de llegar a su nivel de saturación y precipitar. Además, en los dominios de los salares, pueden disolver costras de halita que contribuirán a aumentar su concentración (DGA, 2009).

En el sector Salar de Pedernales es posible encontrar las aguas más enriquecidas en isótopos pesados ( $\delta D$  y  $\delta^{18}O$ ) respecto a los sectores descritos anteriormente, mostrando un claro efecto de la evaporación desde una superficie libre. Cabe notar que las muestras superficiales presentan los valores más enriquecidos respecto a los subterráneos y manantiales y coinciden con muestras tomadas en las lagunas situadas en los bordes del salar.

En cuanto al sector La Laguna, es posible advertir que las zonas altas de recarga, ubicadas al oriente, (Quebrada Panteón de Aliste) se encuentran influenciadas por manantiales termales (clorurados-sulfatados sódicos), dando origen a aguas con mayores conductividades que en los otros sectores elevados de la cuenca. La composición sulfatada cálcica con tendencia a clorurada-sulfatada sódica en el Llano de la Vega Helada, además de la alta concentración de boro, se asociaría con la influencia de la litología de la Secuencia Sierra de Aliste que posee niveles evaporíticos (DGA, 2009).

En la parte más austral del Sector La Laguna, es posible diferenciar comportamientos distintos al norte y sur del Llano de la Vega Helada. Las aguas del norte (cloruradas sódicas) parecen tener una dirección de movimiento distinta que las del sur (sulfatadas cálcicas), recargando a la laguna ubicada en la zona más baja de esta subcuenca, concentrándose y evaporándose repetitivamente, dando origen a las aguas concentradas de la misma laguna.

Por su parte, en el sector sur del Llano de la Vega Helada, es posible diferenciar una recarga más diluida desde las zonas altas hasta llegar a la Loma de los Gases Blancos. Al nor-oeste de la Loma de los Gases Blancos, las muestras incrementan sus conductividades por sobre los 10.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , lo que podría explicarse por reconcentración en pequeñas lagunas y manantiales y una influencia de la cuña del salar hasta el pozo SPX-5.

En cuanto a los valores isotópicos del Sector La Laguna, estos presentan un claro comportamiento en donde las aguas subterráneas indican un empobrecimiento en isótopos pesados, sugiriendo una recarga directa mediante precipitaciones con poca evaporación; mientras que las aguas de manantiales/vertientes denotan haber sufrido mayor evaporación que las subterráneas. Este proceso de enriquecimiento en isótopos pesados se incrementa en las aguas superficiales, sobre todo en las muestras de la laguna.

A modo resumen, cabe señalar que los análisis isotópicos de las aguas muestran una distribución distinta a la recta MWL, alejándose de ésta a medida que se enriquecen en concentraciones de  $\delta\text{D}$  y  $\delta^{18}\text{O}$ . En el caso de las aguas superficiales es claro que su tendencia responde a una recta de evaporación. Sin embargo, en el caso de las aguas subterráneas y manantiales/vertientes, se atribuye mayormente: (1) a la infiltración de aguas evaporadas desde una lámina libre, (2) evaporación desde el terreno donde el nivel del agua es somero; (3) recarga de aguas-nieve que han sufrido procesos de sublimación (DGA, 2009; Risacher et al., 1999).

Finalmente, es posible identificar que las direcciones de flujo de las aguas superficiales y subterráneas poseen una trayectoria predominante de sur a norte, desde las partes altas a las bajas, convergiendo en el mismo Salar de Pedernales para luego ser afectadas procesos de evaporación y disolución-precipitación reiterativa en el tiempo, generando reconcentración mineral. La evolución química e isotópica es concluyente al respecto, mostrando los valores más elevados de conductividad eléctrica, enriquecimiento de isótopos pesados y las mayores concentraciones de B, Li, K y Mg en el mismo salar, avalando estos procesos.

## 7. Sitios de protección ambiental y sectores de explotación

### 7.1 Sitios de protección ambiental

Según el artículo 65 del Código de Aguas, se considera que serán áreas de restricción aquellos sectores hidrogeológicos de aprovechamiento común en los que exista riesgo de grave disminución en el nivel de un determinado acuífero, con el consiguiente perjuicio de derechos de terceros establecidos en él. La DGA revisó en 2013 el Informe Técnico S.D.T. N° 276 (P\_REF.20), Informe Técnico DARH N° 52 (P\_REF.072) e Informe Técnico DARH N° 131 (P\_REF.051) con el objetivo de considerar si la extracción previsible en la cuenca de Pedernales ocasionaría alguno de los siguientes efectos:

- Los descensos generalizados provoquen el agotamiento de algunas zonas del acuífero.
- La recarga del acuífero sea superada, produciendo descensos sostenidos de sus niveles, al grado que provoque reducciones superiores al cinco por ciento del volumen almacenado en un plazo de cincuenta años.
- Se produzca afección a los caudales de los recursos de aguas superficiales y vertientes en más de un diez por ciento del caudal medio de estiaje al año con un ochenta y cinco por ciento de probabilidad de excedencia, afectando derechos de aprovechamiento existentes.
- Peligro existente de contaminación del acuífero por desplazamiento de aguas contaminadas o de la interfase agua dulce-salada.
- Peligro existente de afección al medio ambiente en los sectores protegidos.

Una vez analizados los informes, la DGA declaró áreas de restricción para nuevas explotaciones los sectores hidrogeológicos de Salar de Pedernales Norte y Salar de Pedernales Sur (Figura 7-1), además se exigió a las comunidades de aguas o usuarios individuales la instalación de un sistema de medición periódica de la situación de las aguas subterráneas y de los caudales explotados. Además, se estableció que sólo es prudente otorgar un volumen total anual de 13.150.512 m<sup>3</sup> anuales en el sector acuífero Salar de Pedernales Norte mientras que en el sector acuífero Salar de Pedernales Sur no es prudencial otorgar provisionalmente derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas.

Por otro lado, el Ministerio de Medio Ambiente del gobierno de Chile declaró también parte del sector de la cuenca de Pedernales como Sitio Prioritario (Figura 7-1). Esta clasificación hace referencia a los sitios definidos por la Estrategia Nacional de Biodiversidad, la cual pretende suplir los vacíos existentes y crear un marco orientador. A la vez, este marco está insertado en un plan nacional con acciones específicas que actúen sobre el patrimonio nacional natural con el objetivo de conservar la biodiversidad del país promoviendo su gestión sustentable. A continuación se enumeran las líneas estratégicas:

- Asegurar la conservación y restauración de los ecosistemas para reducir el ritmo actual de pérdida de diversidad biológica.
- Asegurar la preservación de especies y el patrimonio genético.
- Fortalecer la coordinación interinstitucional e intersectorial para la gestión integral de la biodiversidad.
- Establecer los mecanismos formales y no formales requeridos para asegurar una óptima gestión de la biodiversidad.
- Fortalecer la educación ambiental, la conciencia pública y el acceso a la información en ámbito de la biodiversidad.
- Fortalecer y coordinar la investigación que permita mejorar el conocimiento sobre conservación y uso sustentable de la biodiversidad.
- Consolidar los mecanismos para el financiamiento requerido para la conservación de la biodiversidad.

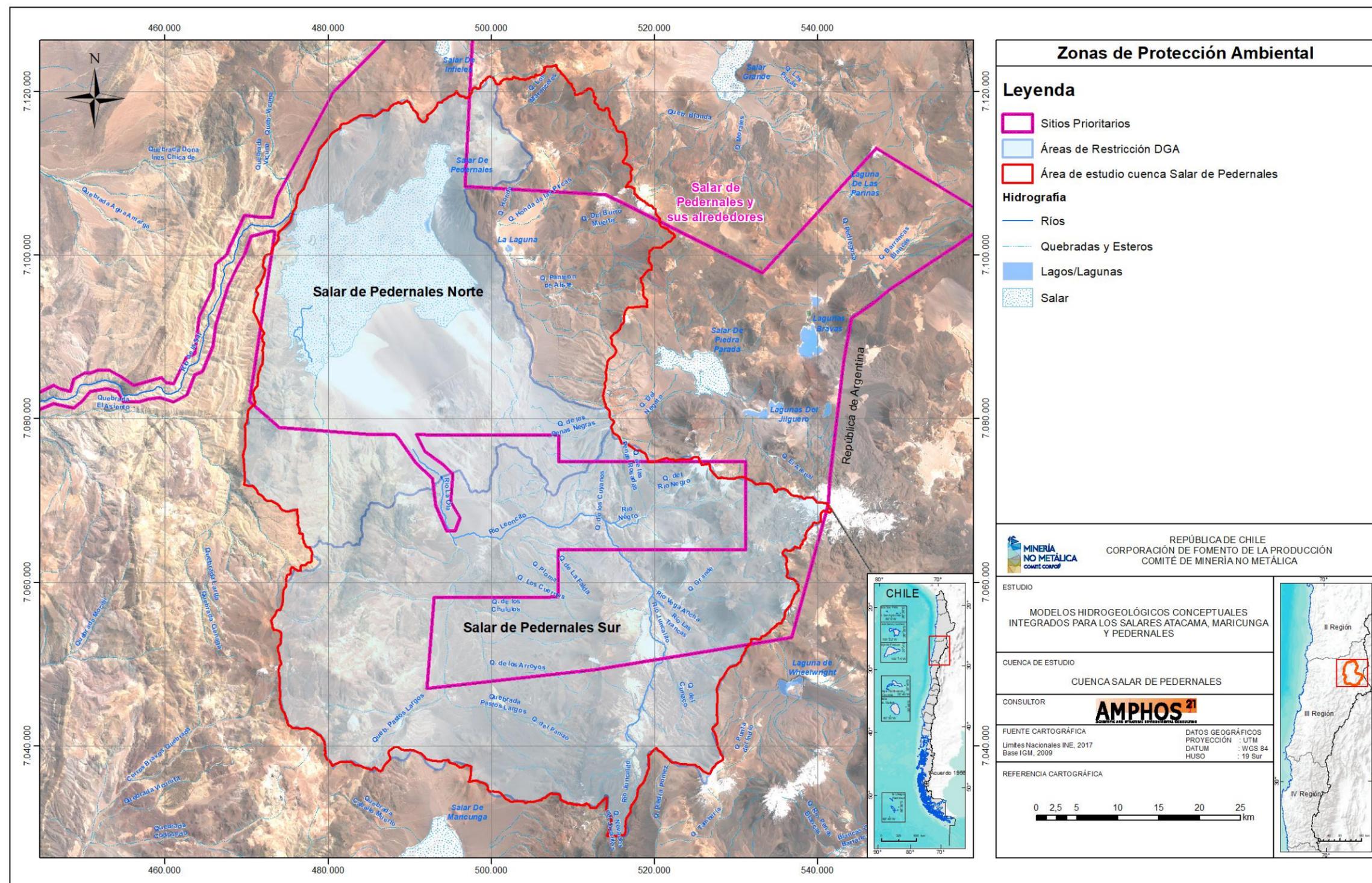


Figura 7-1. Sitios de protección ambiental de la zona de estudio.

Fuente: elaboración propia.

## 7.2 Sectores de explotación y derechos de aguas

En la cuenca Salar de Pedernales las extracciones de agua subterránea están reguladas y limitadas por la Dirección General de Agua, tal y como se dijo en el apartado anterior. Entonces, cada captación tiene un caudal máximo asignado que va en función de la disponibilidad del recurso. A continuación se muestra la información de la que se dispone en referencia a las extracciones de las distintas entidades entre las que se encuentran CODELCO, Cerro Casle y Minería Anglo American Chile (Figura 7-2).

Nombre	X_UTM	Y_UTM	DATUM	Nombre Usuario	Origen datos	Tipo de Derechos	Naturaleza del agua	Caudal anual promedio (l/s)
PB-5	482368	7084379	WGS84	Corporación Nacional de Cobre, Codelco Chile, División Salvador	DGA	Consuntivo	Subterránea	85
PB-6	481946	7084712	WGS84	Corporación Nacional de Cobre, Codelco Chile, División Salvador	DGA	Consuntivo	Subterránea	85
PB-7	482251	7085150	WGS84	Corporación Nacional de Cobre, Codelco Chile, División Salvador	DGA	Consuntivo	Subterránea	80
PB-1	494921	7068711	WGS84	Corporación Nacional de Cobre, Codelco Chile, División Salvador	DGA	Consuntivo	Subterránea	50
PO-2	495444	7068119	WGS84	Corporación Nacional de Cobre, Codelco Chile, División Salvador	DGA	Consuntivo	Subterránea	30
PB-8	481611	7084337	WGS84	Corporación Nacional de Cobre, Codelco Chile, División Salvador	DGA	Consuntivo	Subterránea	120
PB-9	480292	7084339	WGS84	Corporación Nacional de Cobre, Codelco Chile, División Salvador	DGA	Consuntivo	Subterránea	30
PB-12	480891	7085689	WGS84	Corporación Nacional de Cobre, Codelco Chile, División Salvador	DGA	Consuntivo	Subterránea	105
PB-10	480320	7085031	WGS84	Corporación Nacional de Cobre, Codelco Chile, División Salvador	DGA	Consuntivo	Subterránea	64
SPB-7	505531	7088179	WGS84	Compañía minera Casale	DGA	Consuntivo	Subterránea	36
SPB-8	505954	7090958	WGS84	Compañía minera Casale	DGA	Consuntivo	Subterránea	110
SPB-10	503815	7094647	WGS84	Compañía minera Casale	DGA	Consuntivo	Subterránea	30
SPB-13	506114	7089629	WGS84	Compañía minera Casale	DGA	Consuntivo	Subterránea	121
SPB-14	505634	7086483	WGS84	Compañía minera Casale	DGA	Consuntivo	Subterránea	120
SPB-16	505094	7082938	WGS84	Compañía minera Casale	DGA	Consuntivo	Subterránea	88
SPB-1	504368	7078552	WGS84	Compañía minera Casale	DGA	Consuntivo	Subterránea	5
P1	479321	7087069	WGS84	Minería Anglo American Chile Limitada	DGA	Consuntivo	Subterránea	50
P2	482731	7089164	WGS84	Minería Anglo American Chile Limitada	DGA	Consuntivo	Subterránea	50
Tranque de La Ola	493718	7073024	WGS84	Corporación Nacional de Cobre, Codelco Chile, División Salvador	DGA	No Consuntivo	Superficial	800

Figura 7-2. Derechos de agua otorgados por la DGA y caudales de extracción.

Fuente: elaboración propia.

## 8. Determinación de flujos de entrada y salida

A continuación, se presenta una estimación de los principales flujos de entrada y salida al sistema acuífero de la cuenca en estudio. Las entradas al sistema subterráneo se componen de la recarga efectiva y los caudales de escorrentía generados en la cuenca. Este último término se incluye como una salida de la componente superficial y una entrada para 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 infiltran 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 del DGA-DIHA PUC (2009) presentada para la estimación de la recarga, que considera la litología superficial de las cuencas hidrográficas, la influencia de los cauces en la geomorfología y los montos de precipitación media anual. A partir de las características de las unidades litológicas presentes en las cuencas hidrográficas analizadas se definieron los coeficientes de infiltración y escorrentía.

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 las percolaciones 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 Amphos 21 (2016), en donde se calculó el parámetro 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 definieron a partir de un cruce entre la calificación de la conductividad hidráulica mostrada en la caracterización hidrogeológica 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, Tabla 8-3 y Tabla 8-4 se presentan la litología, los coeficientes adoptados en cada unidad y el porcentaje del área en las cuencas hidrográficas Salar de Pedernales, La Laguna y Quebrada Maranceles. 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 8-2, Tabla 8-3 y Tabla 8-4.

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 8-5. En total la percolación en el área de estudio es igual a 792 l/s.

<b>Acuífero C<sub>ID</sub></b>	<b>%</b>	<b>Permeabilidad</b>	<b>No acuífero C<sub>IL</sub></b>	<b>%</b>	<b>Permeabilidad</b>
<b>Litología</b>			<b>Litología</b>		
Salar moderno	20	0,08	Aluvial coluvial moderno	10	0,24
Salar antiguo	20	0,06	Aluvial coluvial antiguo	15	0,20
Aluvial coluvial moderno	10	0,24	Sedimentario fino y calizas (marino)	5	0,10
Aluvial coluvial antiguo	50	0,20	Volcánico sano	20	0,03
			Volcánico fracturado	20	0,15
			Ignimbrita no soldada	10	0,16
			Ignimbrita soldada	10	0,08
			Intrusivos	10	0,02
Promedio	100	0,15	Promedio	100	0,12

Tabla 8-2. Parámetros para la estimación de C<sub>ID</sub> y C<sub>IL</sub> en la cuenca hidrográfica Salar de Pedernales.

Fuente: elaboración propia.

<b>Acuífero C<sub>ID</sub></b>	<b>%</b>	<b>Permeabilidad</b>	<b>No acuífero C<sub>IL</sub></b>	<b>%</b>	<b>Permeabilidad</b>
<b>Litología</b>			<b>Litología</b>		
Salar	3	0,08	Aluvial coluvial moderno	5	0,24
Aluvial coluvial moderno	7	0,24	Aluvial coluvial antiguo	15	0,20
Aluvial coluvial antiguo	40	0,23	Gravas miocenas	5	0,20
Gravas miocenas	50	0,23	Avalancha volcánica	20	0,10
			Volcánico paleozoico	10	0,03
			Volcánico fracturado	30	0,17
			Ignimbrita soldada	15	0,08
Promedio	100	0,23	Promedio	100	0,14

Tabla 8-3. Parámetros para la estimación de C<sub>ID</sub> y C<sub>IL</sub> en la cuenca hidrográfica la Laguna.

Fuente: elaboración propia.

<b>Acuífero C<sub>ID</sub></b>	<b>%</b>	<b>Permeabilidad</b>	<b>No acuífero C<sub>IL</sub></b>	<b>%</b>	<b>Permeabilidad</b>
<b>Litología</b>			<b>Litología</b>		
Aluvial coluvial moderno	95	0,24	Aluvial coluvial moderno	10	0,24
Aluvial coluvial antiguo	5	0,20	Aluvial coluvial antiguo	15	0,20
			Volcánico fracturado	75	0,15
Promedio	100	0,24	Promedio	100	0,17

Tabla 8-4. Parámetros para la estimación de C<sub>ID</sub> y C<sub>IL</sub> en la cuenca hidrográfica Quebrada los Maranceles.

Fuente: elaboración propia.

Cuenca hidrográfica	Área Acuífera (Km <sup>2</sup> )	Área No Acuífera (Km <sup>2</sup> )	Pp media anual (mm/año)	C <sub>ID</sub> zona acuífera	C <sub>IL</sub> zona no acuífera	C <sub>EL</sub> zona no acuífera	P. profunda directa (l/s)	P. profunda lateral (l/s)	P. profunda total (l/s)
Salar de Pedernales	1.049	2.543	110	0,15	0,12	0,11	556	118	674
La Laguna	65	392	149	0,23	0,14	0,12	69	31	100
Qda. Maranceles	6	101	144	0,24	0,17	0,14	7	11	17
								Total	792

Tabla 8-5. Estimación de la percolación.

Fuente: elaboración propia.

## 8.2 Escorrentía superficial

La escorrentía superficial en las cuencas hidrográficas en estudio 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<sup>3</sup>/T), C<sub>E</sub> es un coeficiente de escorrentía, A (L<sup>2</sup>) 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:

$$F = \frac{M}{L} \text{ si } M < L$$

$$F = \frac{L}{M} \text{ si } L < M$$

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<sup>2</sup>) el área aportante de la cuenca hidrográfica.

La cuenca hidrográfica Salar de Pedernales fue dividida en tres partes, según la división de subcuencas definidas por la DGA, que corresponden al río la Ola, río Juncalito y el propio Salar. Para definir la precipitación media anual sobre estas subcuencas se utilizó la relación de precipitación contra altura mostrada en la Figura 3-5.

Se ha estimado la escorrentía superficial para las cuencas hidrográficas Salar de Pedernales, la Laguna y Quebrada Maranceles según la metodología antes descrita. Los caudales de escorrentía se muestran en la Tabla 8-6, 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 1.007 l/s. Se observa una disminución de la escorrentía superficial de la cuenca hidrográfica Salar de Pedernales al compararla con estudios anteriores. Esta disminución se explica debido a que se consideró una precipitación media anual de 110 mm, la que resulta menor a la considerada en estudios anteriores (133 mm).

Cuenca hidrográfica		Área (km <sup>2</sup> )	Pp media anual (mm/año)	C <sub>E</sub>	Caudal de Escorrentía			
					DGA 2012 (l/s)	Aquaterra 2013 (l/s)	Amphos 21 2016 (l/s)	Amphos 21 2017 (l/s)
Salar de Pedernales	Salar	1.512	80	0,02	282	1.270	1.126	81
	Río la Ola	1.163	110	0,12				477
	Río Juncalito	918	160	0,05				211
La Laguna		457	149	0,09	57	221	221	200
Maranceles		107	144	0,08	8	38	66	38
							Total	1.007

Tabla 8-6. 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 funcionamiento e interacción 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:

$$\text{Precipitación (Pp)} - \text{Percolación (Per)} - \text{Evaporación (Ev)} - \text{Escorrentía (Q)} = \\ \text{Variación del agua en el suelo } (\Delta V)$$

Donde:

**Precipitación (Pr):** Es el agua que precipita sobre la cuenca hidrográfica. Debido a las bajas temperaturas en la zona, la precipitación puede ocurrir en forma líquida o sólida (nieve). Cuando esta ocurre en forma de sólida, se acumulará en la superficie hasta que se derrita o sublima. Cuando ocurre la fusión de nieve, el agua tiene la posibilidad de infiltrar o escurrir.

**Percolación (Per):** Consiste en el agua que pasa por el suelo y la zona no saturada, llegando al nivel freático en la zona saturada. 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 hidrográfica. Dentro del balance hidrometeorológico de las precipitaciones que caen sobre la cuenca hidrográfica aportante al salar se considera como una salida.

En la Figura 8-1 se presentan los resultados de los principales componentes del balance hidrometeorológico obtenidos en las cuencas hidrográficas.

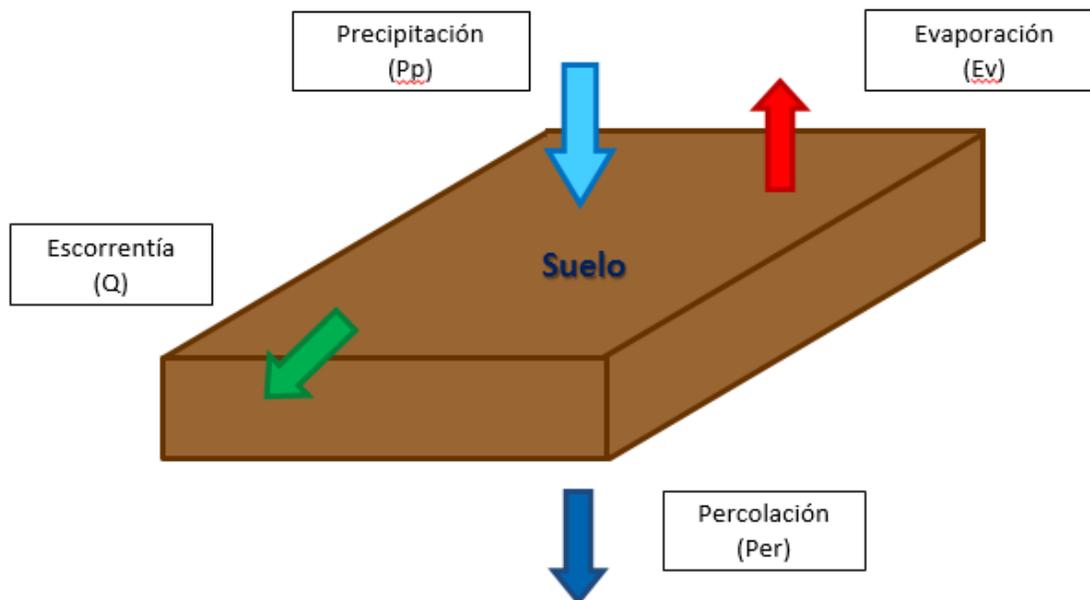


Figura 8-1. Sistema hidrometeorológico simplificado de la precipitación al caer al suelo.

Fuente: elaboración propia.

Cuenca hidrográfica	Área Total (Km <sup>2</sup> )	Precipitación media anual (Pp) (l/s)	Percolación (Per) (l/s)	Caudal de Escorrentía (Q) (l/s)	Evaporación (Ev) (%)
Salar de Pedernales	3.592	12.533	674	769	88,5
La Laguna	457	2.159	100	200	86,1
Maranceles	107	489	17	38	88,7

Tabla 8-7. Resultados del balance hidrometeorológico.

Fuente: elaboración propia.

## 8.4 Evaporación en el salar de Pedernales y la Laguna

En la cuenca hidrográfica Salar de Pedernales y en la Laguna se ha efectuado una estimación de la evaporación desde las superficies de agua libre (lagunas y cauces superficiales) y desde las napas freáticas someras del salar. Para realizar el cálculo se estimaron las curvas de isoprofundidad en el salar y se definieron las curvas de evaporación contra profundidad para los distintos sectores que conforman el salar.

### 8.4.1 Curvas de isoprofundidad

Se estimaron las curvas de isoprofundidad en el Salar de Pedernales a partir de la información de los niveles de los pozos y punteras ubicados en el sector del salar. Como se muestra en la Figura 8-2 a, se han recopilado 44 mediciones de la profundidad del nivel piezómetro en el salar de Pedernales. Pese al buen número de mediciones disponibles, hay zonas que presentan pocos o ningún punto que permita caracterizarlas. Sin embargo, es posible aplicar técnicas de análisis de imágenes satelitales que permiten detectar sectores con presencia de aguas superficiales y aguas subterráneas someras. Considerando lo anterior, se optó por complementar la información piezométrica dentro del salar realizando 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 13-10-2016. 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 al índice de humedad o TCWI por sus siglas en inglés (*Tassled Cap Wetness Index*) (Crist *et al.* 1986; Jian *et al.* 2012) que se muestra en la Figura 8-2 b. Este índice contrasta la suma del espectro visible y el infrarrojo cercano con las bandas de onda más largas del infrarrojo (medio y lejano). El índice TCWI entrega una medida de la tensión de la humedad de suelo. Como muestra la Figura 8-2 b, existiría una zona en el sector oeste del salar con alta humedad en el suelo (índice de humedad mayor a cero). Este sector no tiene mediciones de piezometría cercanas, por lo que no había sido caracterizado como un sitio con presencia de humedad y evaporación relevante.



Considerando lo anterior, se generaron 4 pozos virtuales con profundidades someras entre 0,1 a 0,5 m b.n.t. a fin de representar la zona de baja isoprofundidad en el sector mencionado. Los pozos virtuales generados se muestran en la Figura 8-2 b.

También se calculó el índice de brillo o TCBI por sus siglas en inglés (*Tassled Cap Brightness Index*) (ver Figura 8-2 c). Este índice se compone por la suma ponderada de las bandas del espectro visibles y del espectro infrarrojo. Debido a esto, el índice de brillo responde a los cambios en la reflectancia total y en los procesos físicos que pueden afectar la reflectancia (Crist y Cicone, 1984). Este índice puede detectar cambios en las características de los suelos, como la distribución en el tamaño de partículas (Crist y Cicone, 1984). El índice de brillo también permite detectar eflorescencias y costras salinas bien desarrolladas, ya que están siempre asociadas a una alta reflectancia en el espectro visible y el infrarrojo cercano (Everitt et al. 1988). Adicionalmente, el índice es adecuado para detectar la presencia de aguas superficiales, ya que el agua absorbe fuertemente la radiación del espectro infrarrojo y del espectro visible, mostrando los sectores con aguas superficiales con bajos índices de brillo.

Se debe hacer notar que el índice de humedad detecta de forma deficiente las zonas con agua superficial (lagos, ríos y ojos de agua). Sin embargo, el índice de brillo sí detecta las zonas de agua superficial con claridad, ya que presentan un bajo brillo, pero no es bueno para detectar las zonas con humedad del suelo. Lo anterior se explica ya que ambos índices están contruidos a fin de ser ortogonales entre sí, y por tanto la información contenida en uno, no es presentada por el otro.

#### 8.4.2 Clasificación de tipos de suelo

Se realizó una cartografía de tipos de suelo en el Salar de Pedernales, elaborada en base al análisis de imágenes satelitales espectrales (índice de brillo e índice de humedad), cuyo objetivo es dar una idea referencial de la tipología de suelos en el salar. Se distinguió la siguiente tipología de suelo cuyas características son las que se mencionan a continuación.

- A. Suelo tipo I: Salino Reciente (índice de brillo mayor o igual a 1,05).
  - Zonas de recarga-descarga.
  - Zonas de transición de agua dulce y agua salada.
  - Nivel freático somero.
  - Suelos en constante formación por precipitación química de sales.
  - Alta reflectividad.
  
- B. Suelo tipo II: Transicional entre I y III (índice de brillo entre 0,8 y 1,05).
  - Presenta características intermedias entre los suelos I y III.

C. Suelo tipo II: Núcleo Salino (índice de brillo entre 0,5 y 0,8).

- Menor reflectividad.
- Baja permeabilidad.
- Presencia de una costra salina.
- Nivel de agua más profundo.

D. Suelo tipo IV: Agua superficial compuesta de lagunas o cauces (índice de brillo menor a 0,5).

#### 8.4.3 Curvas de evaporación contra profundidad

En este estudio se han utilizado las curvas de evaporación contra profundidad presentadas por Amphos 21 (2017). Estas curvas se construyeron a partir de datos del lisímetro instalado en la estación Centro del Salar y los datos recolectados por Johnson (2009) y Johnson et al. (2010). Los datos utilizados para generar las curvas de evaporación contra profundidad de la napa en el Salar de Pedernales se muestran en la Figura 8-3

Para el cálculo de la evaporación directa en la cuenca Salar de Pedernales se han utilizado tres escenarios de evaporación, basados en los tres primeros tipos de suelos mencionados anteriormente. Estos escenarios han quedado definidos por sus respectivas curvas de tasa de evaporación, en función de la profundidad del nivel freático, las cuales se extienden hasta una profundidad máxima de 2,5 m. Para el cuarto tipo de suelo (Aguas superficiales) no es necesario definir una curva de profundidad contra evaporación, se asume que este sector evapora de forma constante a una tasa igual a la evaporación potencial del sector (6,14 mm/d)

En la Figura 8-4, Figura 8-5 y Figura 8-6 se presentan los escenarios utilizados para el cálculo de la evaporación desde la napa somera.

#### 8.4.4 Cálculo de evaporación

El procedimiento de cálculo ha sido el siguiente:

- a) Estimar el área asociada a cada tipo de suelo (s) en la i-esima banda de isoprofundidad  $A_i^s [km^2]$ .
- b) Calcular la tasa de evaporación asociada a dicha profundidad (i) y tipo de suelo (s) según la curva de evaporación correspondiente,  $Ev_i^s [\frac{mm}{día}]$ .
- c) Calcular el flujo de evaporación de cada zona,  $F_i^s = A_i^s \cdot Ev_i^s$
- d) Estimar el flujo neto del total de las N bandas de isoprofundidad en los S tipos de suelo definidos:

$$F_{neto} = \sum_{i=1}^N \sum_{s=1}^S F_i^s$$

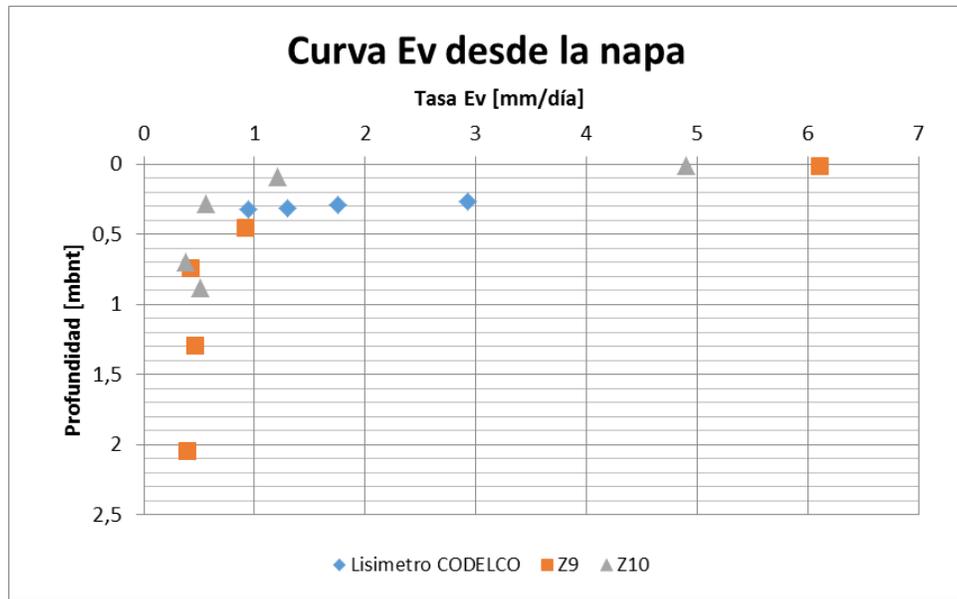


Figura 8-3. Comparación de datos de lisímetro CODELCO con evaporación en puntos Z9 y Z10 de los estudios de Johnson (2009 y 2010).

Fuente: elaboración propia.

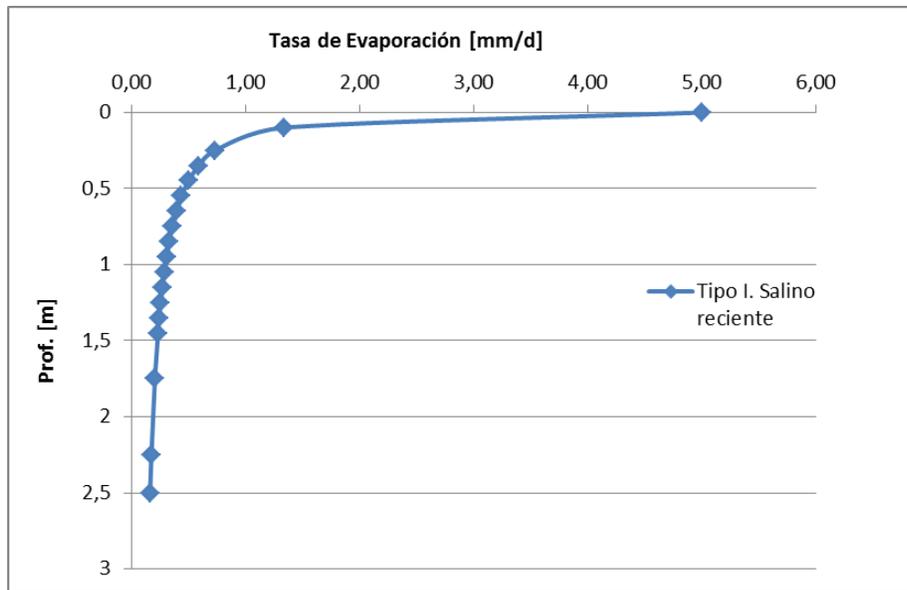


Figura 8-4: Curvas de evaporación v/s profundidad del Tipo de Suelo I (Salino reciente).

Fuente: Elaboración a partir de Johnson (2009) y Johnson *et al.* (2010).

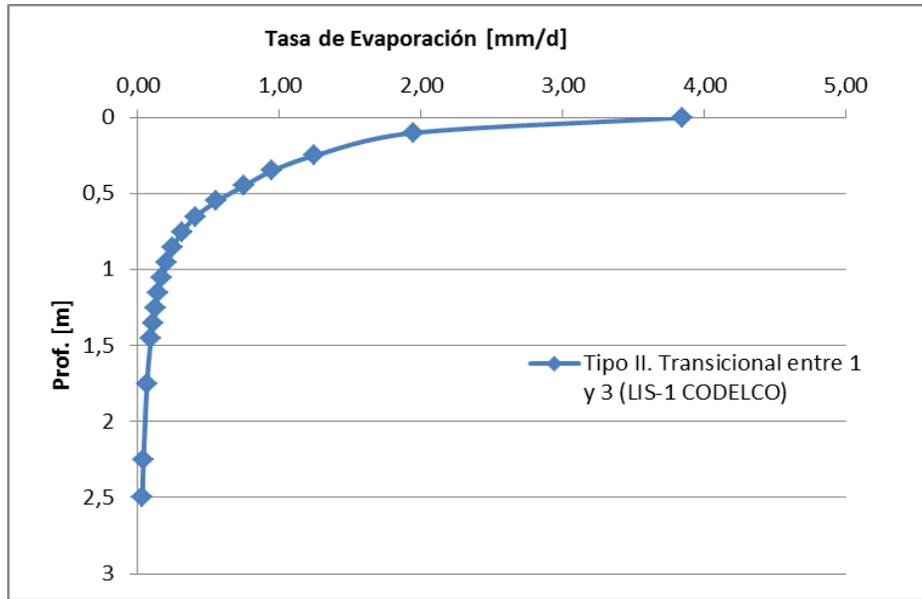


Figura 8-5: Curvas de evaporación v/s profundidad del Tipo de Suelo II.  
Fuente: Elaboración a partir de Johnson (2009) y Johnson et al. (2010).

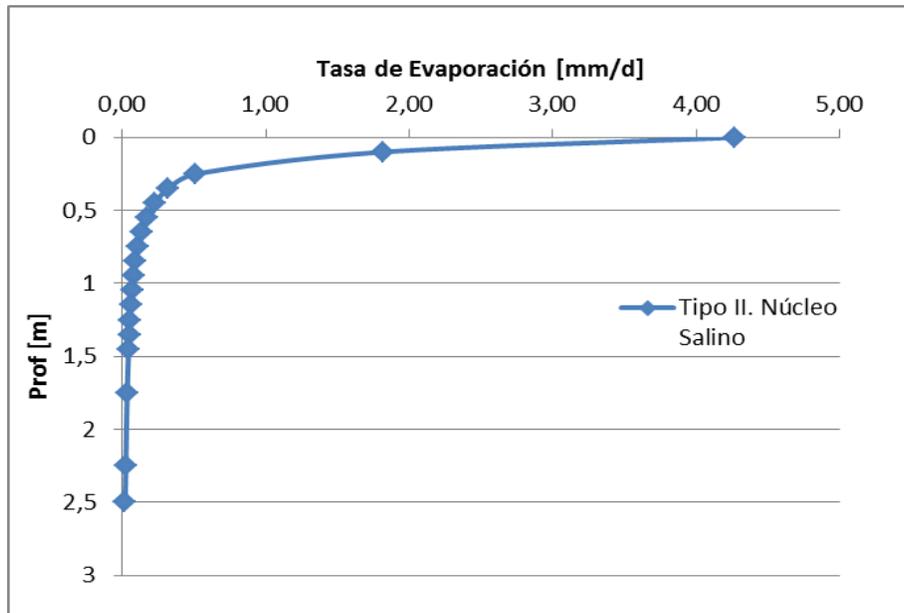


Figura 8-6: Curvas de evaporación v/s profundidad del Tipo de Suelo III (Núcleo Salino).  
Fuente: Elaboración a partir de Grilli y Vidal (1986) y Mardones (1986).

La Tabla 8-8 presenta los valores obtenidos para la estimación de la evaporación desde el salar de Pedernales en los 3 primeros tipos de suelos. En total la evaporación calculada asciende a 612 l/s. A esta evaporación se le agrega un caudal de 93 l/s calculado para el agua superficial del salar (suelo tipo IV). Por otro lado la evaporación en la laguna se estima igual a 57 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 directa del área de estudio se encuentra entre 700 y 800 l/s.

Rango de profundidad (m b.n.t.)	Profundidad	Tasa de evaporación Suelo 1 (mm/d)	Tasa de evaporación Suelo 2 (mm/d)	Tasa de evaporación Suelo 3 (mm/d)	Caudal (l/s)
0-0,2	0,1	2,63	1,95	1,82	141
0,2-0,3	0,25	0,72	1,25	0,51	63
0,3-0,4	0,35	0,49	0,95	0,32	66
0,4-0,5	0,45	0,37	0,75	0,23	59
0,5-0,6	0,55	0,30	0,56	0,17	57
0,6-0,7	0,65	0,26	0,41	0,14	33
0,7-0,8	0,75	0,23	0,32	0,11	26
0,8-0,9	0,85	0,20	0,25	0,09	24
0,9-1	0,95	0,19	0,20	0,08	21
1-1,1	1,05	0,17	0,17	0,07	18
1,1-1,2	1,15	0,16	0,14	0,06	18
1,2-1,3	1,25	0,15	0,12	0,06	22
1,3-1,4	1,35	0,14	0,11	0,05	22
1,4-1,5	1,45	0,13	0,09	0,05	18
1,5-2	1,75	0,11	0,07	0,03	10
2-2,5	2,25	0,09	0,04	0,02	15
Suelos a 1 a 3					612
Agua superficial					93
La Laguna					57
Total					762

Tabla 8-8. Evaporación estimada para el salar de Pedernales.

Fuente: elaboración propia.

## 8.5 Evapotranspiración en humedales

Se identificaron las zonas de humedales (vegas y bofedales) que se ubican en el área de estudio. Para realizar esta identificación se calculó el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI por sus siglas en inglés). Este índice multiespectral fue desarrollado por Tucker (1979) y combina las mediciones de reflectancia espectral de las bandas rojas e infrarrojo cercano (NIR). 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; Petus *et al.* 2013). 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 abundante 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:

- $ET_c$ : Evapotranspiración del cultivo (mm/d).
- $K_c$ : Coeficiente de cultivo (adimensional).
- $ET_0$ : 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). Las áreas con vegetación abundante y vigorosa fueron asignadas con 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 asignó con 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 91 l/s.

Clase	Área Total (Km <sup>2</sup> )	Coef. De cultivo	Tasa de Evaporación (mm/d)	Evaporación calculada (l/s)
Vegetación abundante y vigorosa	0,65	1,00	6,14	46
Vegetación dispersa o poco vigorosa	2,54	0,50	3,07	45
			Total	91

Tabla 8-9. Evapotranspiración estimada en el área de estudio.

Fuente: elaboración propia.

## 8.6 Extracciones antrópicas

Para estimar las extracciones antrópicas en el área de estudio se tomaron en consideración los derechos de aguas concedidos en la zona, las resoluciones ambientales que aplican al ejercicio de estos derechos y el estado de implementación de los proyectos mineros asociados.

La empresa CODELCO es el actor principal del consumo antrópico en la cuenca Salar de Pedernales, ya que tiene la mayor proporción de derechos y realiza las mayores extracciones. Según se indica en la DIA Proyecto continuidad Operacional Salvador, la extracción desde la cuenca del salar de Pedernales tiene un promedio histórico de 860 l/s, en función de la capacidad de porteo instalada en la tubería que trasvasa el caudal hacia la faena Minera Salvador. Este consumo fue informado en el marco del proceso de evaluación del proyecto “Modificación Proyecto San Antonio”, calificado favorablemente mediante la RCA N° 32/2013 otorgada por la Comisión de Evaluación del Servicio de Evaluación Ambiental Región de Atacama, el 30 de enero de 2013.

Respecto de los derechos asociados a la Minera Anglo American y según consta en la resolución DGA N° 243 (expediente ND-0301-832), la compañía minera podrá extraer como máximo 50 l/s en cada pozo, sin embargo, la explotación simultánea de ambos pozos no deberá exceder los 50 l/s del derecho constituido. De esta forma se adoptó un consumo de 50 l/s asociados a este derecho.

Se cuenta con afloros realizados a los caudales pasantes por la obra que une el salar de Pedernales con la parte alta de la cuenca del río Salado, llamada dren Agua Helada (Amphos 21, 2017). Los afloros entregan un rango de 39 a 70 l/s, con un valor promedio de 54 l/s.

Finalmente, los derechos de agua asociados a la Compañía Minera Casale no están siendo explotados, ya que este proyecto no se encuentra en fase de explotación.

La Tabla 8-10 muestra un resumen de los propietarios de los derechos de agua en el área de estudio, los derechos de agua totales asociados y la explotación actual considerada para realizar el balance hídrico en el presente estudio.

Propietario	Derechos consuntivos (l/s)	Derechos no consuntivos (l/s)	Explotación actual (l/s)
CODELCO	649	800	860
Cerro Casale	510	0	0
Anglo American	100	0	50
Dren agua Helada	-	-	54
		Total	964

Tabla 8-10. Derechos y extracciones antrópicas actuales.

Fuente: elaboración propia.

## 9. Balance hídrico

Para analizar el balance hídrico de largo plazo en el acuífero de la cuenca salar de Pedernales (incluyendo a las cuencas hidrográficas de la Laguna y Maranceles), 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, 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 **792 l/s**.
- Escorrentía: Constituye una entrada al sistema subterráneo no contabilizada en la percolación. Este término considera la porción del caudal superficial que se infiltra, aportando de esta forma al acuífero. 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 **1.007 l/s**.

### Salidas del sistema:

- Evaporación directa: Se ha efectuado una estimación de la evaporación en la lámina libre, en el nivel freático somero del Salar de Pedernales y en las lagunas ubicadas en la cuenca hidrográfica de la Laguna (ver capítulo 8.4), obteniéndose un rango para esta variable de **762 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 toma un valor igual a **91 l/s**.
- Extracciones antrópicas: Se determinaron las extracciones antrópicas realizadas en el área de estudio, considerando las extracciones realizadas por compañías mineras, así como las salidas que escurren por el dren que conecta el salar con el río Salado, según se calculó en el capítulo 8.6. En total las extracciones antrópicas son iguales a **964 l/s**.

El balance hídrico para la cuenca Salar de Pedernales se presenta en la Tabla 9-1. Como se puede observar, tanto la evaporación directa desde el salar como las extracciones antrópicas son componentes importantes dentro del balance de esta cuenca. La diferencia entre entradas y salidas calculada es menor a un 2% aproximadamente de la recarga media de largo plazo. Considerando lo anterior, el balance muestra que el área de estudio se encuentra prácticamente en equilibrio.

Entradas (l/s)			Salidas (l/s)		
Percolación	792	760-820	Evaporación en el salar y la Laguna	762	700- 800
Escorrentía	1.007	940-1040	Evaporación en humedales	91	80-100
			Extracciones antrópicas	964	950-970
<b>Total</b>	<b>1.799</b>	<b>1700-1860</b>	<b>Total</b>	<b>1817</b>	<b>1730-1870</b>

Tabla 9-1. Balance hídrico en el acuífero del área de estudio.

Fuente: elaboración propia.

La Tabla 9-2 presenta las estimaciones históricas de recarga aportante al salar de Pedernales. En general, las estimaciones muestran que la evaporación del salar es menor a la recarga, debido a que en la cuenca existe un bombeo antrópico importante. Por otro lado, las estimaciones de la precipitación reflejan la incertidumbre de no tener estaciones pluviométricas con largos registros en la zona y varía de 15.000 l/s a 18.500 l/s aproximadamente. La recarga también presenta una alta dispersión, asociada a la dificultada en estimar la precipitación y los bombeos antrópicos. Pese a lo anterior, el presente estudio es consistente con el estudio DGA-DIHA PUC (2009).

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)	17.043	-	-	-
DGA-DIHA PUC (2009)	16.922	1.901	11	608-964
DGA-Aquaterra (2013)	18.444	2.992	16	2.992
DGA- Amphos 21 (2016)	17.797	2.507	14	1.460-2.090
Amphos 21	15.177	1.708	11	700-800

Tabla 9-2. Estimaciones de recarga al salar en régimen natural.

(\*) el valor incluye la evaporación del salar de Pedernales y el sistema lacustre de la Laguna



Figura 9-1. Vista esquemática 3D del balance hídrico cuenca Salar de Pedernales.

Fuente: elaboración propia.

## 10. Potencial de litio en el Salar de Pedernales

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 el Salar de Atacama 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 máspreciado 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)).

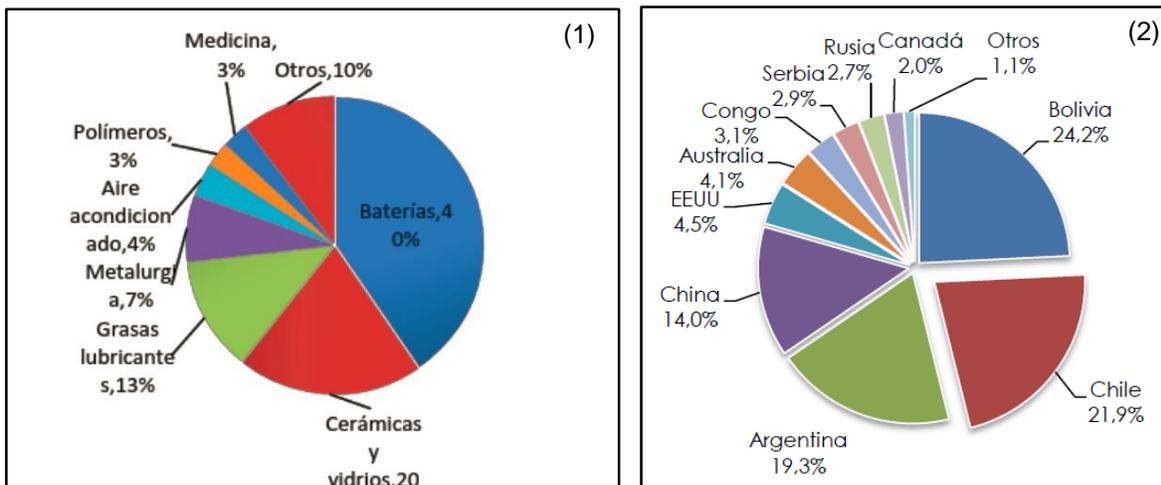


Figura 10-1. (1) Usos de compuestos de litio por aplicación en 2014. (2) Distribución de los recursos de litio por país.

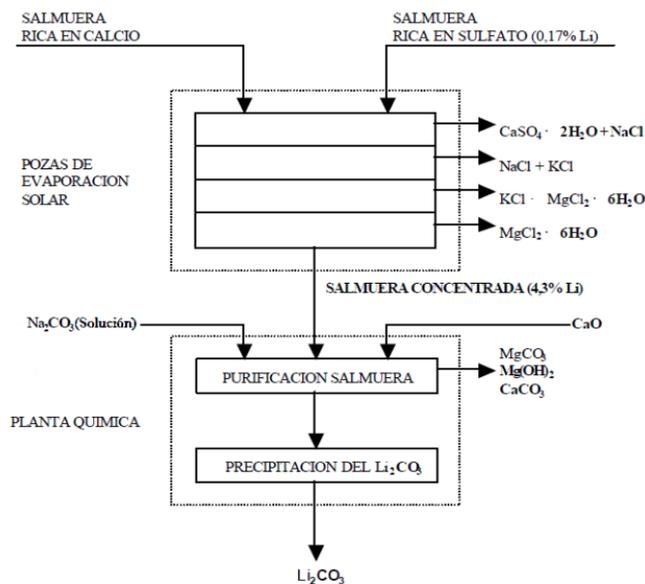
Fuente: (1) SignumBOX Inteligencia de Mercados, 2013. (2) CODELCO-Chile.

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 (Figura 10-2). 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  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  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 de 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

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, estos 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  $-MgCO_3$  (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.

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.

## 10.4 Antecedentes de la estimación del potencial de litio

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 Pedernales. En la cuenca Salar de Pedernales, se dispone de dos antecedentes, ambos de la Dirección General de Aguas (DGA).

En diciembre de 2013, el SERNAGEOMIN realizó un informe sobre “*Mercado Internacional del Litio*” en el cual se presentó la concentración de Litio en diferentes salares a nivel mundial (Tabla 10-1).

Salar	País	Li (ppm)	K (ppm)	Mg/Li	Evaporación (mm/a)	Superficie (km <sup>2</sup> )	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	554	4.204	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 10-1. 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 este estudio se indica que Puig et al. (2012) realizó un estudio con el objetivo de cuantificar el potencial de litio de la salmuera a partir de la estratigrafía conocida y los acuíferos definidos en el área con mayor potencial para este elemento. Se tomó un área de 60 km<sup>2</sup> y como resultado se determinó el **potencial de litio en 20.000 toneladas**. Además, se indicó también una concentración de Li en la salmuera del salar de Pedernales, las que fluctúan entre valores de **130 mg/l a máximo 423 mg/l de Li** (Tabla 10-2).

SALARES ZONA SUR								
salar	Li (mg/L)		K (mg/L)		Li/K		Li/Mg	
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
<b>Aguas Calientes Sur Sur</b>	0,1	8,5	3	1.050	0,03	0,04	0,01	0,09
<b>Pajonales</b>	4,5	57,5	285	2.825	0,02	0,03	0,01	0,03
<b>Gorbea</b>	5	500	25	5.000	0,06	0,2	0,01	0,01
<b>Agua Amarga</b>	13,7	60,5	185	2.035	0,03	0,08	0,01	0,05
<b>La Isla</b>	13	1.150	42	108.000	0,01	0,31	0,14	0,22
<b>Aguilar</b>	350	375	2.600	2.600	0,14	0,14	0,05	0,06
<b>Parinas</b>	7	400	41	6.000	0,07	0,19	0,1	0,11
<b>Grande</b>	4	123	176	2.770	0,0004	0,02	-	-
<b>Pedernales</b>	130	423	-	-	0,07	0,08	-	-
<b>Maricunga</b>	1	1.050	-	-	0,14	0,18	-	-

Tabla 10-2. Concentraciones de Li y K en los salares del norte de Chile, sector zona S.

Fuente: modificado de SERNAGEOMIN, 2013.

## 10.5 Estimación del potencial de litio en el Salar de Pedernales

La estimación preliminar del potencial de litio se ha realizado teniendo en cuenta el modelo conceptual hidrogeológico de la cuenca (funcionamiento, geometría de los acuíferos e identificación de la salmuera), las porosidades efectivas y coeficientes de almacenamiento recopilados de los antecedentes, además de las concentraciones de litio obtenidas a partir de la hidroquímica compilada y revisada a lo largo del presente informe.

Para el cálculo de la potencialidad del litio es necesario conocer los volúmenes de salmuera que existen en el Salar. En primer lugar, a partir de los sondeos y la geofísica disponible, se ha obtenido el volumen saturado en salmuera. Seguidamente, para el cálculo del volumen de salmuera almacenado, se ha dividido el volumen saturado en dos partes en función de sus características litológicas y de almacenamiento (porosidad efectiva/coeficiente de almacenamiento).

En el caso de la porosidad efectiva se ha tenido en consideración que las cuencas de Maricunga y Pedernales tienen un origen estructural y evolución geológica común, tal y como se describe en los capítulos de geología del presente informe. Ambas conforman parte del extremo oriental de la franja metalífera de Maricunga y se encuentran flanqueadas hacia el oeste por la Cordillera de Domeyko, dominio estructural de escala regional que establece el límite natural de estas cuencas endorreicas. Por ello, se ha considerado que tanto la tectónica que originó las cuencas como la hidrología de las mismas, son comunes en ambas. En consecuencia, para el cálculo de porosidades efectivas en la cuenca Salar de Pedernales, se han considerado y extrapolado las porosidades estimadas en el Salar de Maricunga (cuya fuente corresponde al estudio de Li3ENERGY en 2012).

A continuación, se exponen los dos volúmenes definidos de Salmuera en el Salar de Pedernales (Figura 10-3):

- **Volumen I, mezcla de halita y sedimentos finos.** Este volumen está formado por sedimentos evaporíticos, en su mayoría halita, intercalados con materiales limosos. Dicha litología se ha podido observar en los sondajes SPD-1 y PE-1 e indican potencias alrededor de los 150 m. Los pozos SON-1, SON-2 y SON-3 muestran, también, estas características litológicas; sin embargo, al tratarse de sondajes de máximo 60 m de profundidad su información no es tan completa. El área que ocupa en planta el Volumen I es de 309,9 Km<sup>2</sup> y se le ha asignado un espesor saturado entre 70 y 150 m (promedio de 110 m apoyado en sondajes y el Perfil de geofísica L1E, P\_REF.056).
- **Volumen II, depósito volcanoclástico profundo.** Este volumen subyace en gran medida al Volumen I y está formado por series volcanoclásticas que se han observado a profundidades de 200 m en los sondajes de los pozos SPD-1 y Los Llanos. El área proyectada que representa el Volumen II es de, aproximadamente, 402,3 Km<sup>2</sup> y se ha estimado que dispone un espesor medio de 50 m.

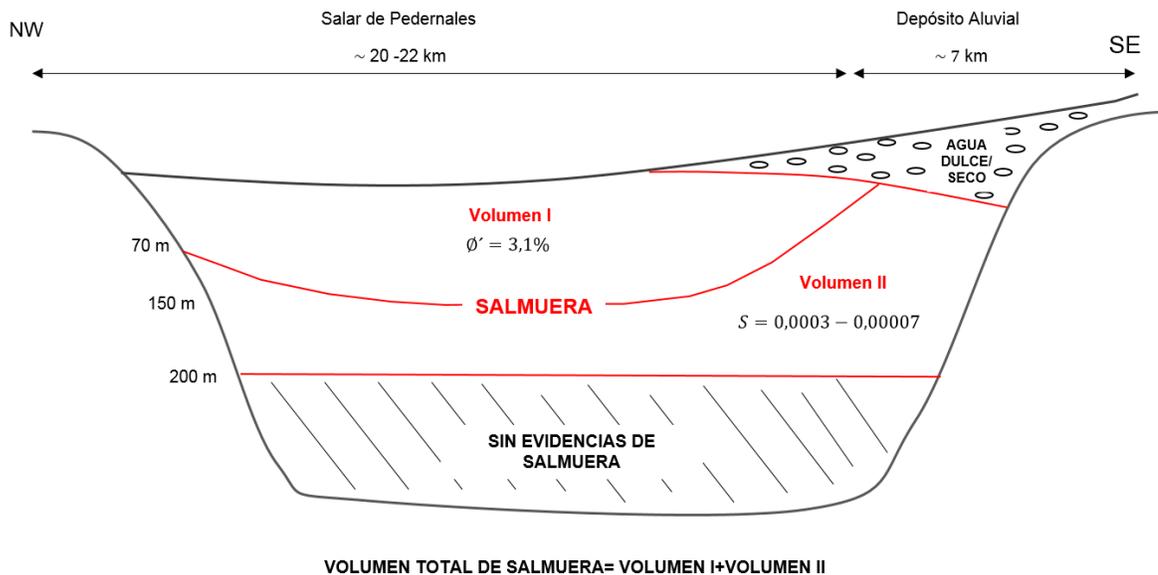


Figura 10-3. Esquema en profundidad de los volúmenes definidos.

Fuente: elaboración propia.

Definidos los volúmenes saturados, se multiplican por la porosidad efectiva/coeficiente de almacenamiento para conocer los volúmenes de salmuera almacenados en cada uno de ellos. La porosidad efectiva asignada al Volumen I es de 3,1 % (Li3ENERGY, 2012). En cuanto al Volumen II, se dispone de datos de coeficiente de almacenamiento en sondajes cercanos al salar en los cuales se ha identificado, también, esta secuencia de materiales volcanoclásticos. Algunos ejemplos son los

sondajes SPB-1, SPB-10, SPB-13 y, concretamente, el SPB-7, el cual muestra un coeficiente de almacenamiento de 0,00007 a 0,0001. Con estos datos se procede al cálculo del volumen de salmuera saturado (para los cálculos se utilizó el promedio, 0,00085).

- **Volumen I de salmuera con porosidad efectiva 3,1%:** 1,06 Km<sup>3</sup>.
- **Volumen II de salmuera con S promedio 0,000085:** 0,0017 Km<sup>3</sup>.

Posteriormente, para calcular la potencialidad del litio, se ha utilizado la concentración del litio recopilada en la zona de estudio. Se ha observado que las concentraciones menores de litio se encuentran en la zona sur del Salar de Pedernales (Volumen II, 51 mg/l promedio de 6 datos disponibles), mientras que los mayores contenidos se localizan en la zona central (núcleo) del Salar (Volumen I, 161 mg/l promedio obtenido a partir de 20 valores).

Tras obtener los volúmenes de salmuera almacenada y las respectivas concentraciones de litio para los dos volúmenes caracterizados, se ha realizado el cálculo del potencial obteniendo el siguiente resultado como sumatorio del tonelaje en los dos volúmenes: **170.225 Tn de litio**. El resumen de las estimaciones se recoge en la Tabla 10-3.

POTENCIAL DE LITIO	VOLUMEN I con 161 mg/l de litio	Volumen acuífero (Km3)	Volumen almacenado Salmuera (km <sup>3</sup> )	Tonelaje (mg)	Tonelaje (Tn)
	Volumen I (110 m con 3,1 % de porosidad efectiva)	34,1	1,06	1,70E+14	170.138
	VOLUMEN II con 51 mg/l de litio	Volumen acuífero (Km3)	Volumen almacenado Salmuera (km <sup>3</sup> )	Tonelaje (mg)	Tonelaje (Tn)
	Volumen II (50 m con S promedio = 0,000085)	20,1	0,0017	8,72E+10	87,2
				TONELAJE TOTAL (Tn)	<b>170.225</b>

Tabla 10-4. Cálculos para el potencial de Litio.

Fuente: elaboración propia.

Cabe destacar, que se estima que haya mayor potencialidad de litio en la zona de estudio, pero que por la falta de información geológica e hidroquímica ha sido necesario interpretar determinados aspectos de este cálculo. Las incertidumbres existentes tienen que ver, principalmente, con el espesor exacto de la salmuera, la porosidad efectiva de los volúmenes definidos y la concentración de litio adoptada en cada uno de ellos.

Asimismo, si se requiere disponer de una caracterización más detallada y precisa de las potencias de las secuencias litológicas, es necesario disponer de más sondajes profundos en el área de estudio. Además, dado que la concentración de litio es variable tanto en planta como en profundidad, es

prioritario obtener más análisis químicos –además de los recopilados en la bibliografía- con los que caracterizar las zonaciones. Por tanto, cuantos más datos se obtengan de las variables mencionadas, más realista y detallado será el cálculo de la potencialidad de litio en el Salar de Pedernales.

## 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 la zona de estudio las cuencas hidrográficas de Salar de Pedernales, Quebrada Los Maranceles y La Laguna son endorreicas, lo que significa que hidrográficamente las precipitaciones escurren por la superficie y se evaporan o infiltran en sus mismos dominios. Pese a lo anterior, las aguas subterráneas de las cuencas mencionadas presentan una conexión entre ellas, conformando una gran cuenca hidrogeológica denominada Salar de Pedernales.

Apoyado en el estudio de caracterización y modelación conceptual en la cuenca hidrogeológica Salar de Pedernales (constituida por las cuencas hidrográficas Salar de Pedernales, La Laguna y Maranceles) se proponen los siguientes Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común (SHAC, Figura 11-1):

- **SHAC 1 (La Laguna):**

Este sector está formado por la subcuenca hidrográfica de La Laguna. El funcionamiento hidrogeológico de esta subcuenca da lugar a una partición en dos subsectores entre las aguas de recarga:

- **SHAC 1a (La Laguna Norte):** parte de las aguas de recarga alimentan a la Laguna situada en la zona septentrional del sector 1.
- **SHAC 1b (La Laguna Sur):** zona llana que se encuentra conectada hidrogeológicamente con el SHAC 2.

En el SHAC 1 no se evidencian explotaciones de agua activas, sin embargo, existen derechos de agua constituidos pero no están aprobados ambientalmente.

Para gestionar esta cuenca, sería razonable levantar una línea base ambiental e hidrogeológica para ver el estado de las lagunas, manantiales y niveles actuales. En el caso que se produzca la aprobación ambiental de los derechos de agua de Casale se debería de vigilar las zonas de La Laguna y los manantiales de Gases Blancos, además de controlar que no se vea reducida la recarga lateral que se produce desde la Cuenca de Laguna (SHAC 1b) hacia el salar de Pedernales.

- **SHAC 2 (Salar de Pedernales-Maranceles):**

El sector 2 está formado por la subcuenca hidrográfica Salar de Pedernales (zona donde se encuentra el Salar que es el área de descarga final de todos los SHAC considerados) y la cuenca hidrográfica Quebrada Maranceles. Todas las precipitaciones sólidas y líquidas en este sector escurren y recargan lateral y directamente en el Salar de Pedernales.

El usuario principal con derechos de agua de explotación concedidos (que se están explotando actualmente) en este sector es Codelco y presenta una red de control de los niveles y de calidad en los puntos de agua.

Es importante que para gestionar este SHAC 2 se vigile y se controle las lagunas y los puntos en el entorno del salar.

- **SHAC 3 (Juncalito-La Ola):**

Este sector está formado por las subcuencas hidrográficas de Juncalito y La Ola. Las precipitaciones en esta zona escurren desde las zonas más elevadas situadas al sureste para infiltrarse y recargar el sistema acuífero (el flujo subterráneo presenta una dirección principal de sur a norte). El agua superficial y subterránea continúa hacia al norte, atraviesa el estrechamiento de La Ola y descarga al SHAC 2.

En la zona S y N del sector, Anglo American presentan 2 pozos de explotación (que actualmente están siendo utilizados) y Codelco obtiene agua del tranque La Ola respectivamente.

Como consecuencia, es necesario monitorear los niveles de los ojos de La Ola, los humedales de Leoncito y los SVAT

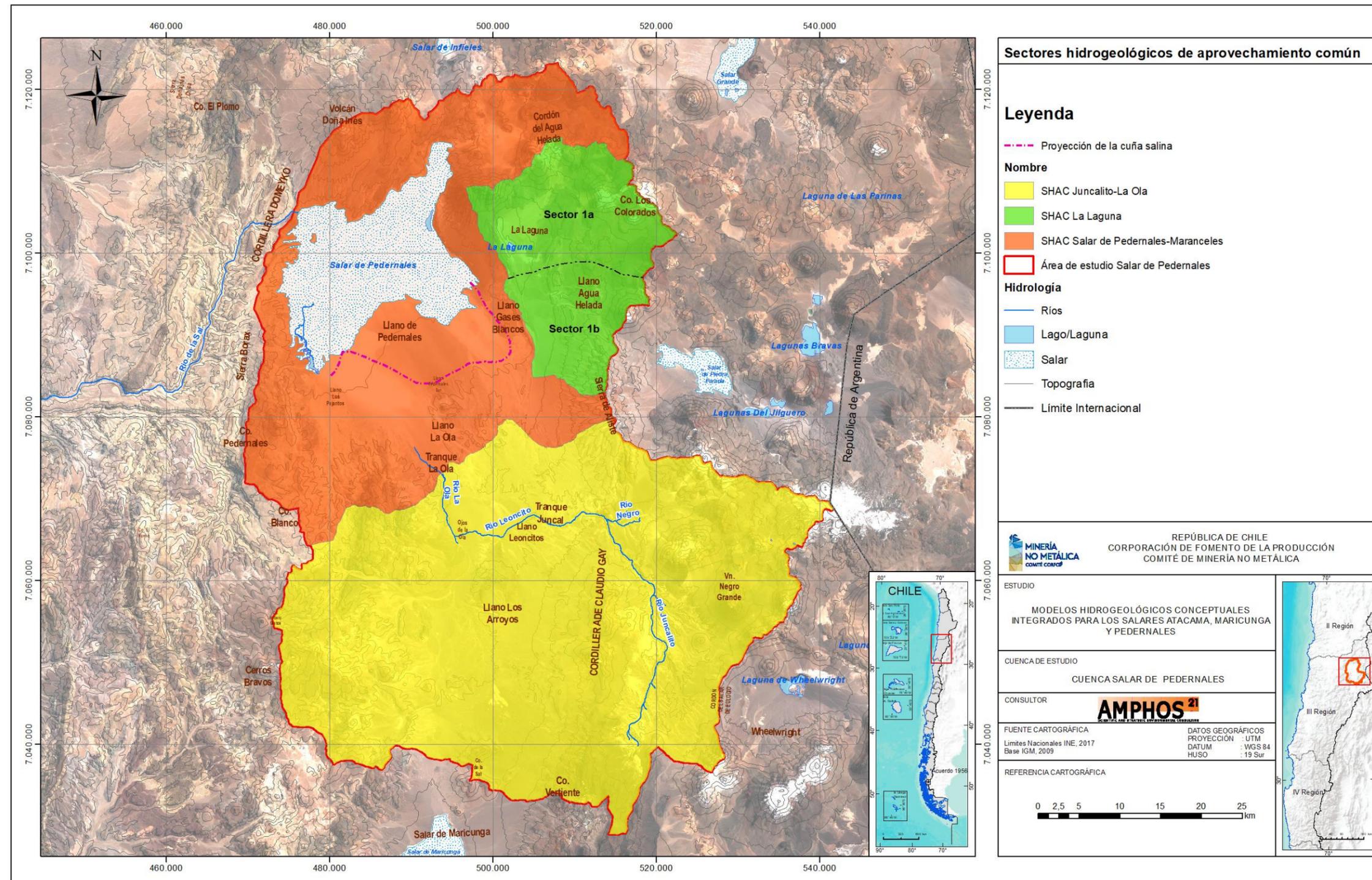


Figura 11-1. Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común cuenca Salar de Pedernales.

Fuente: elaboración propia.

## 12. Evaluación de la plataforma para la modelización numérica de flujo

En cuencas como la del Salar de Pedernales 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), 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 realizó 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, como la laguna de la subcuenca La Laguna, 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 Llano del Salar de Pedernales debe realizarse un modelo numérico con un dominio menor, acotado a la zona objeto de estudio y modelizar la densidad variable con SEAWAT o Feflow, 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	SUTRAMS (ModelM use)	TRANSDEN S	COMSOL Multiphysics	iCP (Interfaz COMSOL-PHREEQC)	Observaciones
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	
<b>Especificaciones</b>	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 trabajos futuros 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 han agrupado las incertidumbres relacionadas con el basamento y con la identificación y características de los acuíferos de la cuenca Salar de Pedernales, así como las condiciones de borde con otros acuíferos. Finalmente, se plantean incertidumbres sobre el balance hídrico y sus componentes, así como algunos aspectos sobre el cálculo del potencial del litio.

### 13.1 Incertidumbres generales

- 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 por lo tanto, el volumen de los acuíferos teniendo en cuenta el espesor saturado podría cambiar.
- 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. Sin embargo, para poder construir el modelo se han tenido que realizar ciertas aproximaciones y estimaciones para determinar espesores representativos y realizar 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. De esta forma, la definición de los acuíferos del Salar de Pedernales (espesores y porosidades) se ha realizado a partir de estimaciones y valores representativos.
- 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.

### 13.2 Incertidumbres con respecto al modelo en Leapfrog

A modo de organizar la información, se indican las incertidumbres por zonas. La falencia 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:

- Llano de Pedernales y Salar. Se ha inferido el basamento y su morfología mediante perfiles geofísicos TEM y gravimétricos, pero no existe litología que lo respalde ni que permita situar

con precisión el depocentro de la cuenca. Del mismo modo, los espesores de los acuíferos podrían determinarse mejor con mayor información litológica.

- Llano de Leoncito y Llano los Arroyos. Se ha detectado que la información litológica es insuficiente y se encuentra muy localizada. La morfología del basamento se sustenta en pocos perfiles geofísicos y los espesores de los acuíferos dependen mucho de la información superficial y de interpretaciones hidrogeológicas.
- Sur de la cuenca (Quebrada de Pastos Largos). No se dispone de información litológica y se ha trabajado en base a geofísica, información superficial e interpretación hidrogeológica.
- Quebrada del Juncalito. No se dispone de suficiente información litológica y los perfiles geofísicos disponibles no se han podido validar con la litología en profundidad. Solamente se dispone de dos pozos (CP-10 y CP-10B) con lo que se validó la presencia de roca fracturada en esta zona.

### **13.3 Incertidumbres con respecto a la identificación y características de los acuíferos del Salar de Pedernales 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 Pedernales y La Laguna. No se tiene suficiente conocimiento de la morfología del basamento en profundidad ni de la relación entre las estructuras imperantes en este sector y el flujo de agua. Tampoco se ha podido estimar con precisión el caudal pasante de una cuenca a 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 Llano de Pedernales. Además, no se conocen las profundidades de las muestras de agua tomadas en esta zona y la densidad de hidroquímica es escasa.
- No se tiene una distribución en planta y en profundidad de la conductividad eléctrica y/o total de sólidos disueltos de detalle ni en el núcleo del salar. Teniendo en cuenta lo anterior, se recomienda disponer de mayor información si se quiere construir un modelo numérico y modelar ciertas zonas teniendo en cuenta la 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. Se sabe de la existencia de un pozo profundo, perforado por ENAP, llamado Fortuna 1-X de 2684 m de profundidad; sin embargo, no se dispone de su información estratigráfica.

## 13.5 Incertidumbres con respecto al balance hídrico (entradas y salidas)

- Existe cierta incertidumbre en la estimación de la evaporación que se produce en la zona del Salar debido a la escasa información.
- No se cuenta con estaciones meteorológicas de carácter público en la cuenca que permita tener un acceso expedito a información clave para los cálculos necesarios para el balance hídrico.
- No existe información de las precipitaciones que ocurren en la Cordillera de Domeyko ni de Claudio Gay porque no hay estaciones meteorológicas. En el presente estudio se ha estimado mediante la extrapolación de la información disponible.
- Los datos de antecedentes correspondientes a niveles de agua se presentan como nivel piezométrico (m s.n.m.) y no como profundidad del nivel de agua con respecto a la superficie. Además, algunos trabajos no presentan el valor de la cota topográfica del pozo. De esta forma, no ha sido posible realizar un mapa de isopropundidades de nivel de agua y además, como el nivel piezométrico está referenciado por cada autor a una cota diferente, mediciones ejecutadas por diferentes autores a un mismo pozo o sector no coinciden y existen diferencias centimétricas, precisión que se requiere en el sector de la zona marginal. Aun así, Amphos 21 ha calculado la evaporación con el apoyo de imágenes satelitales y puntos conocidos de profundidad de nivel.
- 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.

## 13.6 Potencial de litio

Las incertidumbres con respecto a la estimación del potencial de litio están relacionadas con:

- No se ha podido caracterizar la composición hidroquímica de la salmuera con detalle debido a que los datos de antecedentes no están homogéneamente distribuidos (ni en superficie ni en profundidad). La estimación del potencial de litio propuesto podría cambiar a medida que se dispongan de más datos en el núcleo y perímetro cercano del salar. Se necesita complementar con geofísica y perfiles de densidad-conductividad a lo largo de los sondeos existentes, en particular en el Llano del Salar de Pedernales.
- Para realizar una óptima estimación del potencial de litio es necesario disponer de más datos de porosidad efectiva, tanto espacial como en profundidad, para obtener una aproximación más realista del potencial. La realización de ensayos de bombeo sería de gran ayuda para estimar el coeficiente de almacenamiento del acuífero y a la obtener transmisividades.
- Los espesores, utilizados para el cálculo del potencial de litio, son estimativos. Se necesitan más sondeos profundos para poder validar la geofísica existente y así disminuir la incertidumbre actual.
- Además, a medida que se obtenga un mayor conocimiento de los acuíferos del salar, la geometría y, por lo tanto, el volumen de acuífero podría cambiar. De esta forma, la estimación del potencial de litio debiese de actualizarse.

## 14. Síntesis y conclusiones

A continuación, se presentan las conclusiones más importantes derivadas de la Etapa II del presente proyecto.

- A partir del análisis de antecedentes ha sido viable la construcción del presente modelo conceptual hidrogeológico a nivel de cuenca. Cabe destacar que existen zonas de mayor incertidumbre que otras (al sur de la cuenca se dispone e menor información y por lo tanto, las conclusiones y recomendaciones que se extraen y el funcionamiento hidrogeológico propuesto tiene en cuenta las brechas existentes.
- El Salar de Pedernales se encuentra localizado en el sector septentrional de la zona de estudio. En superficie, el salar tiene unas dimensiones en planta aproximadas de 22 km x 10 km. En esta zona los espesores de yeso y halita pueden llegar a los 400 m. Al suroeste del salar, afloran materiales aluviales con espesores de hasta 50 m y además, se ha observado, a partir de las columnas litológicas-geofísica-hidroquímica, que hay presencia de materiales evaporíticos.
- El acuífero identificado en la zona de estudio está constituido por materiales detríticos y fracturados con distintas propiedades hidráulicas, pero que muestran características similares en cuanto a su superficie piezométrica.
- 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 Pedernales, 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.
- 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, y disminuye a medida que la superficie alcanza cotas más bajas. De este modo, la dirección de flujo principal de la cuenca presenta a grandes rasgos una orientación SSE-NNW, desde las zonas más altas de la cuenca, hacia la depresión topográfica representada por el Salar de Pedernales.
- La recarga en la cuenca se produce principalmente mediante precipitaciones (lluvia y nieve). Las zonas de recarga se localizan en las partes más elevadas (Cordillera de Domeyko y Cordillera de Claudio Gay) y posteriormente las aguas descienden hacia cotas más bajas descargando finalmente al Salar de Pedernales y lagunas (del Salar y de la Laguna):

- Destaca la confluencia entre el río Juncalito y el río Negro, donde la elevación del sustrato paleozoico (UH 6) causado por la existencia de un cabalgamiento con rumbo SW-NE, provoca el ascenso de las aguas acumuladas en la subcuenca del Juncalito y un aumento del caudal superficial del curso de agua (río Juncalito).
  - Las aguas procedentes tanto de la recarga directa sobre el acuífero como de la infiltración indirecta continúan su descenso hacia las zonas bajas, alcanzando el Llano de Los Arroyos, el Llano Leoncito y el Llano La Ola (llanos formados principalmente por la UH 1) y en el caso de las aguas procedentes del norte de la Cordillera de Claudio Gay, el Llano de la Vega Helada (cuenca La Laguna).
  - En el Llano La Ola confluyen las aguas recogidas en el sector meridional de la cuenca, que discurren tanto de forma superficial como subterránea, y en él se produce un estrechamiento de la sección de paso hacia el norte de la cuenca (presencia de tobas).
  - En el funcionamiento de flujo subterráneo se ha observado la existencia de una conexión hidráulica entre el Salar de Pedernales en su borde oriental, en la zona conocida como el Llano de los Gases Blancos, y el Llano de Agua Helada, situado en el extremo nororiental de la cuenca. Se ha identificado en esta zona un acuífero constituido por materiales fracturados (UH 4) en sector de los manantiales de Gases Blancos y se ha validado con los perfiles geofísicos la continuidad de esta unidad en profundidad.
  - Los cursos de agua principales, río La Ola, río El Leoncito, río Juncalito y su afluente, el río Negro, se encuentran relacionados con el sistema acuífero de manera efluente en la mayoría de los casos.
- En la zona del salar, es posible distinguir que las facies hidroquímicas son de tipo cloruradas sódicas y que presentan los mayores valores de conductividad eléctrica registrada (> 250.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). Además, en estas zonas se encuentra también, la mayor concentración de Li, B, K y Mg.
  - Los análisis isotópicos de las aguas muestran una distribución distinta a la recta MWL, alejándose de ésta a medida que se enriquecen en concentraciones de  $\delta\text{D}$  y  $\delta^{18}\text{O}$ . En el caso de las aguas superficiales es claro que su tendencia responde a una recta de evaporación. Sin embargo, en el caso de las aguas subterráneas y manantiales/vertientes, se atribuye mayormente: (1) a la infiltración de aguas evaporadas desde una lámina libre, (2) evaporación desde el terreno donde el nivel del agua es somero; (3) recarga de aguas-nieve que han sufrido procesos de sublimación (DGA, 2009; Risacher et al., 1999).
  - Del análisis de la hidroquímica e isotopía es posible identificar que las direcciones de flujo de las aguas superficiales y subterráneas poseen una trayectoria predominante de sur a norte, desde las partes altas a las bajas, convergiendo en el mismo Salar de Pedernales para luego ser afectadas procesos de evaporación y disolución-precipitación reiterativa en el tiempo, generando reconcentración mineral. La evolución química e isotópica es concluyente al respecto, mostrando

los valores más elevados de conductividad eléctrica y enriquecimiento de isótopos pesados en el salar, avalando estos procesos.

- El balance hídrico para la cuenca del Salar de Pedernales se presenta en la Tabla 9-1. Como se puede observar, tanto la evaporación directa desde el salar como las extracciones antrópicas son componentes importantes dentro del balance de esta cuenca. La diferencia entre entradas y salidas calculada es de un 2% de la recarga media de largo plazo aproximadamente. Considerando lo anterior, el balance muestra que el área de estudio se encuentra prácticamente equilibrio.

Entradas (l/s)		Salidas (l/s)	
Percolación	760-820	Evaporación en el salar y la Laguna	700- 800
Escorrentía	940-1040	Evaporación en humedales	80-100
		Extracciones antrópicas	950-970
<b>Total</b>	<b>1700-1860</b>	<b>Total</b>	<b>1730-1870</b>

Tabla 14-1. Balance hídrico cuenca Salar de Pedernales.

Fuente: elaboración propia.

- Tras obtener los volúmenes de salmuera almacenada y las respectivas concentraciones de litio para los dos volúmenes caracterizados, se ha realizado el cálculo del potencial obteniendo el siguiente resultado como sumatorio del tonelaje en los dos volúmenes de salmuera de: **14.577 Tn de litio**.

Cabe destacar que se estima que haya mayor potencialidad de litio en la zona de estudio pero que por la falta de información geológica e hidroquímica ha sido necesario interpretar determinados aspectos para el cálculo. Las incertidumbres existentes tienen que ver, principalmente, con el espesor exacto de la salmuera, la porosidad efectiva de los volúmenes definidos y sobre todo la concentración de litio adoptada en cada uno de ellos.

- 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 han tenido 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 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.

Entre los antecedentes que se requieren incorporar en trabajos futuros son:

- Conseguir columna estratigráfica completa del pozo Fortuna 1-X, perforado por ENAP, cuya profundidad alcanza los 2684 m. Sus coordenadas son 7099382 N/ 478356 E y se encuentra ubicado en el sector NW del Salar de Pedernales. La litología podría ser de mucha utilidad para caracterizar con mayor precisión las unidades en profundidad.
- EDRA, 1999. Hidrogeología Sector Cerro Pampa. Trabajo encargado por Placer Dome Latin America. Exploración y Desarrollo de Recursos de Agua S.A. (EDRA), 67 p. Anexos A-H.
- 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 profundidad y en el sector sur de la cuenca no hay muchos 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 zonas donde no hay abundante información (al sur de la cuenca Salar de Pedernales concretamente en el Llano de Leoncito, en la Subcuenca de Juncalito y en el Llano de los Arroyos). La construcción de estos

pozos servirá, a su vez, para interpretar mejor la información geofísica existente y para caracterizar hidrogeológicamente la zona sur de la cuenca.

Trabajos a realizar:

- Perforación de 21 pozos (9 pozos de bombeo y 12 pozos de observación) distribuidos:
  - 7 pozos de observación de 200-250 m de profundidad situados en el Llano Los Arroyos y Llano Leoncito y con sus respectivos 7 pozos de bombeo.
  - 3 pozos situados en el límite sur del propio Salar de Pedernales de, al menos, 300 de profundidad (Llano de Pedernales).
  - 2 pozos de bombeo en el nacimiento del Río Negro y 2 pozos de observación (Subcuenca Juncalito).

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 que evitar el uso de 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 e hidrogeológica.

Duración/Frecuencia: 4-6 meses de ejecución de los trabajos.

Monto aproximado: 3,5 y 4 mil millones de pesos chilenos (por los 21 pozos y la supervisión).

- 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 Pedernales 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 televiwer, 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 permitirán caracterizar las condiciones subterráneas. Además, ayudarán a determinar de forma aproximada el nivel de la napa y determinar el flujo subterráneo en distintos puntos de la zona de estudio.

Los objetivos son:

- Caracterizar con mayor precisión la proyección del Salar de Pedernales en profundidad.
- Conocer la geometría y profundidad del basamento.

Trabajos a realizar:

- 2 perfiles TEM dirección W-E en el Llano de Pedernales N y S (relación con el Salar).
- 2 perfiles gravimétricos N-S y W-E del Salar de Pedernales.
- 3 perfiles gravimétricos Llano de Los arroyos, uno de ellos N-S y dos más W-E.
- 1 perfil TEM para ver la interconexión con la cuenca Quebrada Maranceles y Salar de Pedernales.
- 5 -8 perfiles NanoTEM a los humedales existentes y lagunas.

Duración/frecuencia: 1 mes de trabajo

Monto aproximado: 93 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:**

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 parte alta de la cuenca (Subcuenca Juncalito) y una estación meteorológica en la parte baja (Salar de Pedernales). Como alternativa para la esta estación en la parte baja se podría utilizar una estación privada, llegando a un acuerdo con sus propietarios. Recolección, validación y publicación de los datos medidos.

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: 54-59 millones de pesos chilenos (en función de la calidad de la estación ya que debido a las condiciones de viento y al intenso 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 ( $C_e$ ) realizadas 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 Pedernales. 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). Estas 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 estas técnicas ya que son capaces de medir la evaporación de amplios sectores (a escala de  $\text{km}^2$ ) de forma integrada. Así, las técnicas son menos susceptibles 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, estas técnicas no producen 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.

- Realizar mediciones de terreno de la evaporación en el salar de Pedernales 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 y La Laguna.
- Desarrollar campañas de terreno de medición de la evaporación en al menos 2 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.

Duración/frecuencia: la duración estimada para las campañas de mediciones es de 2-3 meses.

Monto aproximado: 63-67 millones de pesos chilenos.

▪ **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 Pedernales. 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 Pedernales, 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 de infiltración en terreno 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: tres semanas de trabajo.

Monto aproximado: 23 millones de pesos chilenos.

- **Incorporar 18-25 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: 31 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 campañas periódicas, al menos, cada 6 meses, con la medición de 75 niveles en cada una de ellas.

Duración/frecuencia: 4 campañas semestrales.

Monto aproximado: 43-60 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 9 ensayos de bombeo** en la zona

sur de la cuenca y en el propio Salar de Pedernales. 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: 4-5 meses

Monto aproximado: 475 millones de pesos chilenos para los 9 ensayos.

- **Referenciar bajo una misma cota topográfica la cota del nivel piezométrico**, ya que se han observado variaciones de hasta 80 cm en las cotas piezométricas medidas por diferentes autores.
  - A continuación, se presentan diferentes técnicas para obtener una topografía de detalle y los precios por Ha aproximados (Tabla 15-1). Se debe tener en cuenta la precisión topográfica que se necesita que debería ser de orden centimétrico pero que a nivel 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.

- En zonas donde coexistan acuíferos con aguas subterráneas de diferente densidad, se recomienda hacer la equivalencia del nivel de salmuera (de densidad alrededor de 1,09-1,15 g/cm<sup>3</sup>) a una densidad equivalente de agua dulce (1 g/cm<sup>3</sup>). Para ello se recomienda tener una topografía de detalle, realizar la campaña de terreno de monitoreo de niveles y perfiles de conductividad eléctrica, así tener el conocimiento de la habilitación de los pozos monitoreados para obtener la posición de las rejillas ranuradas de los pozos de monitoreo.

Objetivo: tener una piezometría a nivel de cuenca equivalente y corregir el efecto de la densidad, para mejorar el conocimiento del comportamiento hidráulico de los acuíferos de la cuenca y obtener mayor conocimiento del comportamiento de la zona marginal del salar.

Duración/frecuencia: 1 mes.

Monto aproximado: solicitar a los usuarios que instalen un lector que se vea el consumo.

- Instalar flujómetros en los pozos con derechos otorgados que registren el consumo real del pozo.

Duración/frecuencia: 1 mes.

Monto aproximado: s solicitar a los usuarios que instalen un lector que se vea el consumo.

- **Robustecer el modelo 3D Leapfrog:** una vez recopilada la información actualizada de los niveles piezométricos, litologías, parámetros hidráulicos, reconocimiento de límites entre unidades hidrogeológicas por la interpretación de la geofísica, se incorporarán al modelo Leapfrog construido en esta Etapa III, para un mayor conocimiento de la geometría de los acuíferos.

Duración/frecuencia: 1 mes.

Monto aproximado: 14-16 millones de pesos chilenos.

## 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.

Los objetivos son:

- Caracterizar con mayor precisión la salmuera en el salar.
- Establecer orígenes del agua con más detalle.
- Controlar la calidad de las aguas con el efecto del bombeo.
- Caracterizar química e isotópicamente el agua de recarga y ajustar la recta meteórica local (LMWL).

Trabajos a realizar:

- Plan de Vigilancia de Calidad: control de 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 35-40 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  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$  de todas las muestras de agua.

Asimismo, los trabajos de hidroquímica deberían 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.

Duración/frecuencia: 4 campañas semestrales.

Monto aproximado: 110-120 millones de pesos chilenos.

Parámetros Físico-Químicos							
Conductividad Eléctrica	SM 2510 B Ed.22	$\mu\text{S}/\text{cm}$ a 25°C	10	pH	SM 4500 H		0.1
Sólidos Totales Disueltos	SM 2540C Ed.23	mg/L	10				
<b>Cationes +</b>							
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				
<b>Aniones -</b>							
Alcalinidad Total	IT-610	mg/L $\text{CaCO}_3$	10	Bromuros	PE-2090	mg/L	0.1
Carbonatos	IT-610	mg/L $\text{CaCO}_3$	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				
<b>Metales Disueltos</b>							
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 de los Modelos Numéricos

En la cuenca Salar de Pedernales solamente se dispone del *Estudio de Modelación Matemática Hidrogeológica Cuenca de Pedernales* realizado por CPH Consultores Ltda (2004). En dicho estudio abarca aproximadamente la Subcuenca Salar de Pedernales (una tercera parte que en el presente estudio) y se realizó con el objetivo de satisfacer las necesidades hídricas de Codelco División Salvador a causa de su desarrollo y expansión. Codelco propuso la construcción de un modelo matemático hidrogeológico de la cuenca que pudiese ser utilizado como herramienta de evaluación y análisis para escenarios de futura explotación.

Actualmente la información compilada en el modelo del Salar está obsoleto y limitado por ello se recomienda llevar a cabo nuevos modelos numéricos hidrológicos e hidrogeológicos que integre el acuífero de la zona de estudio que se extiende en toda la zona de estudio.

- **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 precisión la magnitud, distribución 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 características 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 transiente en el tiempo.

Duración/frecuencia: la duración estimada para la elaboración del modelo es de 4 meses.

Monto aproximado: 25-27 millones de pesos.

▪ **Elaboración de un nuevo modelo numérico hidrogeológico:**

- Se requiere la actualización del modelo numérico de manera de incorporar los nuevos antecedentes recopilados. Modelar la cuenca hidrogeológica de Pedernales (integrar el sistema acuífero completo (Salar-La Laguna-La Ola-Llano de Leoncito-Juncalito (Figura 15-2).
- 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 19 sur y los archivos del modelo de flujo en la plataforma MODFLOW junto a toda la información digital base ordenada bajo una estructura temática acordada.

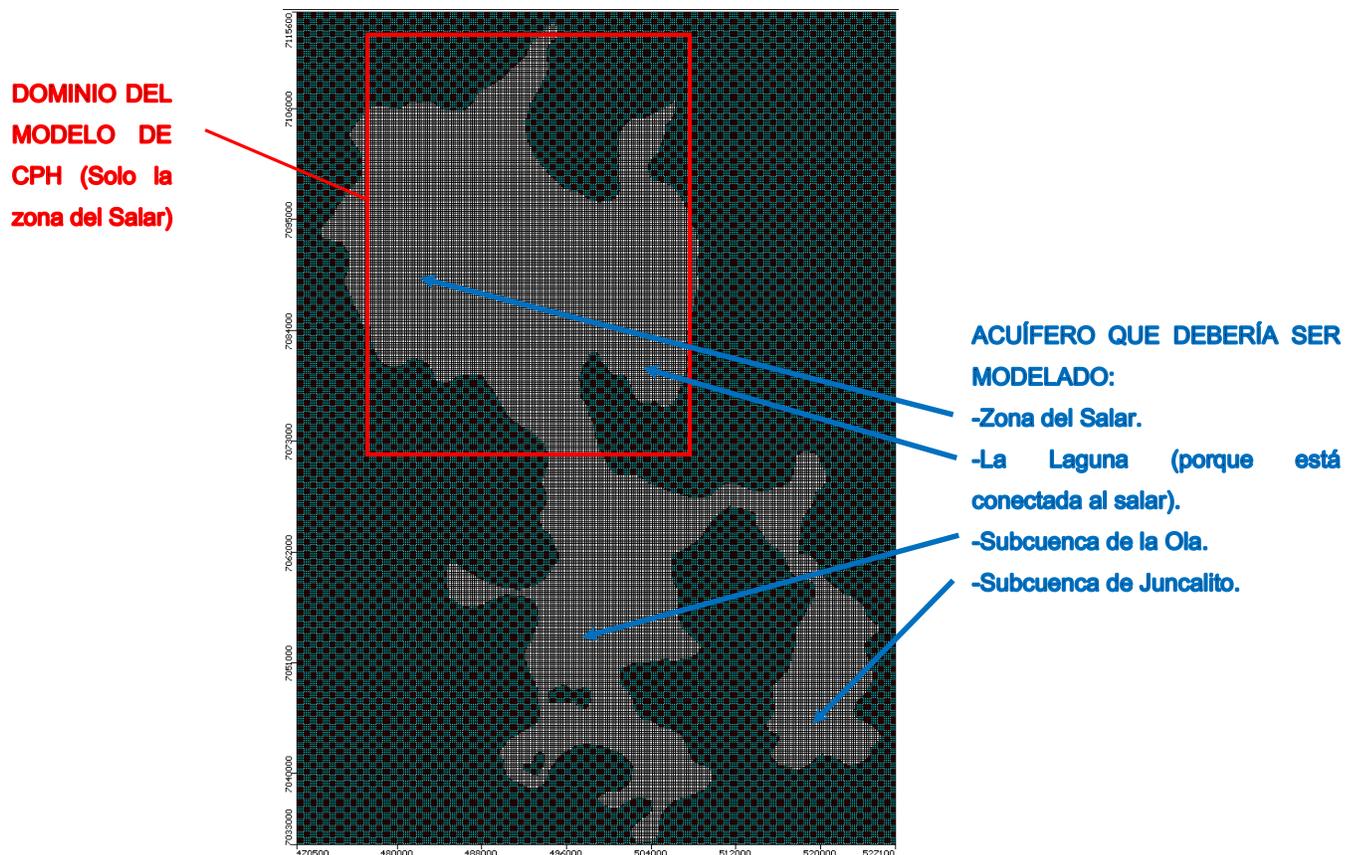


Figura 15-2. Ubicación del dominio modelado de CHP y zona que se recomienda a ser modelada.

Fuente: elaboración propia.

En la elaboración del modelo numérico de la cuenca, 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 el modelo de transporte en Modflow.

## 16. Bibliografía

- AGUA Ingenieros Consultores Ltda. (1978). Evaluación de Recursos Subterráneos Salar de Pedernales.
- AGUA Ingenieros Consultores Ltda. (1984). Actualización Modelo de Simulación Llano de Pedernales.
- 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.
- 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.
- Behn, Gerardo y Henríquez, Hugo (2005). Estudio de Gravimetría. Proyecto Llano de la Laguna. Sector NE Salar de Pedernales. III – Región de Atacama – Chile. GEODATOS Geofísica Avanzada.
- Bustamante Valdés, Ana María (2013). Caracterización de Humedales Alto-Andinos para una Gestión Sustentable de las Actividades Productivas del Sector Norte del País. CIREN. Recursos Hídricos Parte I. Hidrografía del Altiplano, Información fluviométrica y de Calidad de Aguas. Región de Atacama.
- Charrier, R., Pinto, L., Rodríguez, M.P. (2007). Tectonostratigraphic evolution of the Andean Orogen in Chile.
- Clark I. and P. Fritz, (1997). Environmental isotopes in hydrogeology.
- Clavero, J; Gardeweg, M; Mpodozis, C (1998). Mapa Geológico Preliminar del Área del Salar de Piedra Parada, Región de Atacama, Servicio Nacional de Geología y Minería (Chile) Mapas Geológicos. Escala 1:100000.
- 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 Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, 1 mapa escala 1:100000. Santiago.
- CODELCO (2004). EIA Explotación Minera Proyecto Purén, Informes de Monitoreo de Aguas del Seguimiento y Fiscalización Presentes en el SEA. Horacio Lira Duarte Ingenieros y AGUA Ingenieros Consultores.
- Compañía Minera Casale (2001). EIA Proyecto Minero Aldebarán. Línea base hidrología hidrogeología y calidad de las aguas. SENES Chile S. A.

- Cornejo, P; Mpodozis, C; Tomlinson, A.J (1996). Hoja Salar de Maricunga, Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería. Mapas Geológicos N°7, 1 mapa escala 1:1000000. Santiago.
- CPH Consultores Ltda (2004). Estudio de Modelación Matemática Hidrogeológica Cuenca de Pedernales.
- Crist, EP; Cicone, RC. (1984). A physically-based transformation of thematic mapper data—the TM Tasseled Cap. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 22.
- Crist, EP; Laurin, R; Cicone, RC. (1986). Vegetation and soils information contained in transformed Thematic Mapper data. In: Proceedings of IGARSS'86 Symposium. pp 1465–1470. European Space Agency. Paris. <http://www.ciesin.org/docs/005-419/005-419.html>
- De Bruin, HAR; Wang, J. (2017). Scintillometry: a review.
- DGA (2009). Evaluación de los recursos hídricos subterráneos en cuencas de la región de Atacama ubicadas entre el río Copiapó y la región de Antofagasta.
- DGA (2012), Evaluación de la disponibilidad de recursos hídricos subterráneos en los sectores acuíferos Salar de Pedernales Norte y Sur
- DGA (2013). Actualización de la demanda comprometida en los sectores acuíferos Salar de Pedernales Norte y Sur.
- DGA. (1987). Balance Hídrico de Chile.
- DGA. (2009). Levantamiento hidrogeológico para el desarrollo de nuevas fuentes de agua en áreas prioritarias de la zona norte de Chile.
- DIA Continuidad Operacional División Salvador (2017)
- DGA-DIHA PUC (2009). Levantamiento hidrogeológico para el desarrollo de nuevas fuentes de agua en áreas prioritarias de la zona norte de Chile.
- Dirección General de Aguas (2009). Evaluación de los Recursos Hídricos Subterráneos en Cuencas de la Región de Atacama Ubicadas entre el Río Copiapó y la Región de Antofagasta. Informe Técnico Departamento de Administración de Recursos Hídricos S.D.T. N° 276.
- Dirección General de Aguas (2011). Estimación de recargas en Cuencas Altiplánicas y Precordilleranas de Vertiente Pacífica. División de Estudios y Planificación SDT N°334.
- Dirección General de Aguas (2013). Actualización de la Demanda Comprometida en los Sectores Acuíferos Salar de Pedernales Norte y Salar de Pedernales Sur. Informe Técnico DARH N°52.

- DGA - Amphos 21 Consulting (2016). Diagnóstico de Disponibilidad Hídrica en Cuencas Alto – Andinas de la Región de Atacama. Fase 3. Informe Final. Cuencas N° 2, 6 y 7 (Salar de Pedernales, La Laguna y Maranceles). Recopilación de antecedentes Geológicos. S.I.T. N°398.
- Dirección General de Aguas (2017). Declaración de Impacto ambiental para la continuidad operacional del proyecto de CODELCO División Salvador. Apéndice V-2 y V-3.
- Everitt, JD; Escobar, DE; Gerbermann, AH; Alaniz, MA. (1988). Detecting saline soils with video imagery. Photogramm. Eng. Remote Sens. 54.
- Grilli, A; Vidal, F. (1986). Evaporación desde salares : metodología para evaluar los recursos hídricos renovables. Aplicación en las regiones I y II / Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Departamento de Hidrología
- Geodatos (2001). Estudio Geofísico Transiente Electromagnético. Sector: Cordón de los Infieles. III Región de Atacama, Chile. NE-0301-367.
- Geodatos (2004). Estudio Geofísico, Transiente Electromagnético (TEM) y Gravimetría. Proyecto: Pajaritos. Sector: Suroeste Salar de Pedernales. El Salvador, III – Región.
- Geodatos (2004). Re-interpretación Estudio Geofísico Transiente Electromagnético (TEM). Sector: Salar de Pedernales. III Región de Atacama, Chile.
- Geodatos (2007). Estudio mediante TEM y Gravimetría, Potrerillos-Pedernales. III – Región de Atacama – Chile.
- H. Álvarez, Eduardo (1984). Exploración del Salar de Pedernales (Atacama) Mediante Imágenes Landsat Procesadas por Computador. Codelco Chile, División Salvador.
- Held Siebert, Bruno; Parga Lobo, Eugenio; Merino García, Enrique; Torrealba Peña, Humberto (1984). Contribución del Comité Chileno para el Programa Hidrológico Internacional (UNESCO) al Balance Hídrico de América del Sur. Dirección General de Aguas.
- Henríquez, Hugo; Montti, Silvia; Falcón, Eduardo (1975). Estudio Hidrogeológico de la Cuenca del Salar de Pedernales. Provincia de Atacama. Instituto de Investigaciones Geológicas.
- Instituto de Investigaciones Geológicas. (1975). Estudio hidrogeológico de la Cuenca del Salar de Pedernales, Provincia de Atacama.
- Jian, J; Yang, WN; Jiang, H; et al. (2012) A model for retrieving soil moisture saturation with Landsat remotely sensed data. International Journal of Remote Sensing 33.
- Johnson Vidal, Juan Eduardo (2009). Evaporación desde Napas Freáticas Someras en Cuencas Endorreicas del Altiplano Chileno. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería. Universidad Católica de Chile, Escuela de Ingeniería.

- Johnson, E; Yáñez, J; Ortiz, C; Muñoz, J. (2010). Evaporation from shallow groundwater in closed basins in the Chilean Altiplano. *Hydrological Sciences Journal* 55(4).
- Lira Duarte, Horacio; Torres Luna, Ángel (1982). Nuevos Recursos de Agua Industrial en el Llano Pedernales - Anteproyecto Obras de Captación. Horacio Lira Duarte Ingenieros y AGUA Ingenieros Consultores.
- Lüdi, A; Beyrich, F; Matzler, C. (2005). Determination of the turbulent temperature-humidity correlation from scintillometric measurements. *Boundary-Layer Meteorol.* 117.
- Mardones, L. (1986). Características geológicas e hidrogeológicas del salar de Atacama. Consultado en: *El litio un nuevo recurso para Chile* (Lagos, 1986). Universidad de Chile. Departamento Ingeniería de Minas.
- 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.
- Muñoz, José 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. Parte 1: Hidrografía Inter-Regional del Altiplano de Chile y Parte 2: Hidrología Inter-Regional del Altiplano de Chile y Etapa 2 parte 8. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Pontificia Universidad Católica de Chile. S.I.T N°157.
- Muñoz, José et al. (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 Parte X: Sistema Piloto III Región. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Pontificia Universidad Católica de Chile. S.I.T N°157.
- Muñoz, José et al. (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 Parte X, Sistema Piloto III Región. Salares de Maricunga y Pedernales. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Pontificia Universidad Católica de Chile. S.I.T N°195.
- Muñoz, José, 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. Informe Final Parte IV. Campañas de Muestreo Geoquímicos e Isotópicos. Salares de Maricunga y Pedernales. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental Pontificia Universidad Católica de Chile. S.I.T. N° 195, DGA.
- Muñoz, José, et al., (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 X. Sistema Piloto III Región. Salares de Maricunga y Pedernales. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental Pontificia Universidad Católica de Chile. S.I.T. N° 195, DGA.

- Petus, C; Lewis, M; White, D. (2013). Monitoring temporal dynamics of Great Artesian Basin wetland vegetation, Australia, using MODIS NDVI. *Ecological Indicators* 34.
- 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.
- Riquelme, R., (2003). Evolution géomorphologique néogène des Andes centrales du Désert d'Atacama (Chili): interactions tectonique-érosion-climat. Toulouse (France) et Santiago (Chili), Thèse de troisième cycle, 258 pp
- Risacher, François; Alonso, Hugo; Salazar, Carlos (1999). Geoquímica de Aguas en Cuencas cerradas: I, II y III Regiones – Chile. Volumen I y IV. DGA – UCN – IRD. S.I.T.N°51.
- 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.
- S. Bettancourt Eugenio, G. Julio Mario (1976). Estudio Geofísico Llano de Pedernales – III Región. Informe SGF 76 – 1. Instituto de Investigaciones Geológicas.
- 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.
- 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.
- Tomlinson, A.J; Cornejo.P; Mpodozis, C (1999). Hoja Potrerillos, Región de Atacama, Servicio Nacional de Geología y Minería (Chile) Mapas Geológicos. N° 14. 1 mapa escala 1:100000. Santiago.
- Una Gestión Sustentable de las Actividades Productivas del Sector Norte del País. Parte I: Hidrografía del Altiplano, Información Fluviométrica y de Calidad de Aguas. Región de Atacama. Ciren.
- Vargas Paysen, Jaime et al. (2013). Diagnóstico de Disponibilidad Hídrica en Cuencas Alto-Andinas de la Región de Atacama. Aquaterra Ingenieros Limitada. S.I.T. N° 329.
- 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.