

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

Etapa III. Informe Final

Modelo Hidrogeológico Consolidado Cuenca Salar de Atacama

Comité de Minería No Metálica CORFO

7 de marzo 2018

Elaborado:	Revisado	Verificado:	Validado:
Gemma Sendra Susana Vado Doménico Sciolla Adrián Muñoz Martin Lizama Diego Pérez Fernanda Cereceda Daniel Páez	Gemma Sendra Pilar Enguita	Pilar Enguita	Juan Castaño

Índice

RESUMEN EJECUTIVO	1
1. INTRODUCCIÓN	4
1.1 OBJETIVOS	5
1.2 SITUACIÓN GEOGRÁFICA	6
1.3 HISTORIA DE LAS OPERACIONES EN EL SALAR DE ATACAMA	8
1.4 METODOLOGÍA DE TRABAJO	13
1.4.1 <i>Recopilación y análisis de antecedentes</i>	13
1.4.2 <i>Catastro de puntos</i>	17
1.4.3 <i>Caracterización de la cuenca</i>	18
1.4.4 <i>Análisis hidrogeológico</i>	19
1.4.5 <i>Análisis hidroquímico e isotópico</i>	20
1.4.6 <i>Elaboración del modelo hidrogeológico 3D</i>	21
1.4.7 <i>Integración de la información en un proyecto GIS</i>	25
1.4.8 <i>Balance hídrico</i>	26
2. ANÁLISIS Y VALORACIÓN DE LOS ANTECEDENTES	28
2.1 ANÁLISIS Y REVISIÓN DE LA GEOLOGÍA	28
2.2 ANÁLISIS Y REVISIÓN DE LA GEOMORFOLOGÍA	32
2.3 ANÁLISIS Y REVISIÓN DE LA METEOROLOGÍA	33
2.4 ANÁLISIS Y REVISIÓN DE LA HIDROLOGÍA	37
2.5 ANÁLISIS Y REVISIÓN DE LA GEOFÍSICA	41
2.6 ANÁLISIS Y REVISIÓN DE LA HIDROGEOLOGÍA	48
2.7 ANÁLISIS Y REVISIÓN DE LA HIDROGEOQUÍMICA	58
2.8 ANÁLISIS Y REVISIÓN DE LOS ISÓTOPOS	63
2.9 ANÁLISIS Y REVISIÓN DEL BALANCE HÍDRICO	65
2.10 ANÁLISIS Y REVISIÓN DE LOS MODELOS NUMÉRICOS	68
2.11 SÍNTESIS Y RECOMENDACIONES DE LA VALORACIÓN DE ANTECEDENTES	73
3. CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA	76
3.1 CARACTERIZACIÓN HIDROGRÁFICA	76
3.2 CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA	80
3.3 ANÁLISIS HIDROLÓGICO	82
3.3.1 <i>Análisis de la precipitación</i>	82
3.3.2 <i>Distribución espacial de las precipitaciones</i>	88
3.3.3 <i>Análisis de escorrentía</i>	93

3.3.4	<i>Evaporación</i>	97
4.	CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA.....	102
4.1	MARCO GEOMORFOLÓGICO.....	102
4.2	MARCO GEOLÓGICO	105
4.3	UNIDADES GEOLÓGICAS	107
4.3.1	<i>Depósitos No Consolidados</i>	108
4.3.2	<i>Rocas Estratificadas</i>	108
4.3.3	<i>Rocas Intrusivas</i>	115
4.4	GEOLOGÍA ESTRUCTURAL.....	119
4.5	COLUMNAS LITOLÓGICAS	124
5.	CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA	127
5.1	PARÁMETROS HIDRÁULICOS.....	127
5.1.1	<i>Información disponible</i>	127
5.1.2	<i>Caudales específicos</i>	130
5.1.3	<i>Permeabilidad y Transmisividad</i>	133
5.1.4	<i>Coefficiente de almacenamiento</i>	138
5.2	UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS.....	140
5.2.1	<i>Unidad Hidrogeológica 1 (UH 1)</i>	142
5.2.2	<i>Unidad Hidrogeológica 2 (UH 2)</i>	147
5.2.3	<i>Unidad Hidrogeológica 3 (UH 3)</i>	151
5.2.4	<i>Unidad Hidrogeológica 4 (UH 4)</i>	152
5.2.5	<i>Unidad Hidrogeológica 5 (UH 5)</i>	155
5.2.6	<i>Unidad Hidrogeológica 6 (UH 6)</i>	156
5.3	GEOMETRÍA DE LOS ACUÍFEROS (3D LEAPFROG)	159
5.3.1	<i>Prospecciones geofísicas</i>	159
5.3.2	<i>Identificación de la extensión de la interfase salina</i>	177
5.3.3	<i>Geometría de los acuíferos y basamento</i>	179
5.4	PIEZOMETRÍA	186
5.4.1	<i>Inventario de puntos de agua</i>	186
5.4.2	<i>Evolución de niveles</i>	188
5.4.3	<i>Funcionamiento del flujo en la zona de estudio</i>	198
5.5	FUNCIONAMIENTO DE LOS SISTEMAS LAGUNARES	208
5.5.1	<i>Lagunas del sistema La Punta-La Brava</i>	208
5.5.2	<i>Lagunas del sistema Peine</i>	211
5.5.3	<i>Aguas de Quelana</i>	212

5.5.4	<i>Lagunas del sistema Soncor</i>	214
5.6	VOLUMEN DE ALMACENAMIENTO	216
6.	HIDROGEOQUÍMICA E ISÓTOPOS	217
6.1	INFORMACIÓN DISPONIBLE.....	217
6.2	CLASIFICACIÓN DE LOS PUNTOS DE AGUA Y SECTORIZACIÓN	217
6.3	VALIDACIÓN DE LOS DATOS	221
6.4	PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS	222
6.5	COMPONENTES MAYORITARIOS Y FACIES.....	226
6.5.1	<i>Sector Acuífero MNT</i>	228
6.5.2	<i>Sector Borde Este</i>	229
6.5.3	<i>Zona Cordillera</i>	230
6.5.4	<i>Sector Cordón de Lila</i>	232
6.5.5	<i>Sector Núcleo</i>	233
6.5.6	<i>Zona Marginal</i>	234
6.5.7	<i>Zona Norte y Zona Noroeste</i>	235
6.6	PARÁMETROS REPRESENTATIVOS DE SALARES.....	236
6.6.1	<i>Evolución temporal</i>	237
6.6.2	<i>Distribución espacial</i>	241
6.7	ISÓTOPOS	248
6.7.1	<i>Evolución temporal δ^2H y $\delta^{18}O$</i>	248
6.7.2	<i>Relación $\delta^2H / \delta^{18}O$</i>	255
6.7.3	<i>Relación Altitud / $\delta^{18}O$</i>	260
6.7.4	<i>Relación $B^{3+}/Cl^- / \delta^{18}O$</i>	263
6.8	MODELO HIDROGEOQUÍMICO	265
7.	SITIOS DE PROTECCIÓN AMBIENTAL Y SECTORES DE EXPLOTACIÓN	268
7.1	SITIOS DE PROTECCIÓN AMBIENTAL	268
7.2	SECTORES DE EXPLOTACIÓN Y DERECHOS DE AGUA.....	271
8.	DETERMINACIÓN DE FLUJOS DE ENTRADA Y SALIDA	273
8.1	PERCOLACIÓN	273
8.2	ESCORRENTÍA SUPERFICIAL	276
8.3	BALANCE HIDROMETEOROLÓGICO	279
8.4	EVAPORACIÓN EN EL SALAR.....	281
8.5	EVAPOTRANSPIRACIÓN EN ÁREAS CON VEGETACIÓN	289
8.6	EXTRACCIONES ANTRÓPICAS	290
8.7	ESTIMACIÓN DE CAUDALES SUBTERRÁNEOS DE APORTE AL NÚCLEO	291

9.	BALANCE HÍDRICO DEL ACUÍFERO.....	294
9.1	RESULTADOS DEL BALANCE HÍDRICO.....	294
9.2	DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	299
10.	ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE LITIO	301
10.1	EL LITIO COMO RECURSO	301
10.2	TECNOLOGÍAS DE EXTRACCIÓN DEL LITIO.....	302
10.3	PUREZA DEL CONCENTRADO Y SUBPRODUCTOS	303
10.4	ANTECEDENTES DE LA ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE LITIO EN EL SALAR DE ATACAMA.....	304
10.5	ESTIMACIÓN PRELIMINAR DEL POTENCIAL DE LITIO	307
11.	SECTORES HIDROGEOLÓGICOS DE APROVECHAMIENTO COMÚN (SHAC)	311
11.1	ANTECEDENTES	311
11.2	DEFINICIÓN DE LOS SHAC Y ANÁLISIS CRÍTICO.....	314
12.	EVALUACIÓN PLATAFORMA PARA MODELIZACIÓN NUMÉRICA DE FLUJO ...	319
13.	INCERTIDUMBRES DEL MODELO CONCEPTUAL Y GEOMETRÍA 3D	321
14.	SÍNTESIS Y CONCLUSIONES.....	325
15.	RECOMENDACIONES	328
15.1	RECOPIACIÓN DE ANTECEDENTES	328
15.2	RECOMENDACIONES DE GEOLOGÍA.....	328
15.3	RECOMENDACIÓN HIDROLOGÍA Y METEOROLOGÍA	330
15.4	RECOMENDACIONES DE GEOFÍSICA.....	335
15.5	RECOMENDACIONES DE HIDROGEOLOGÍA.....	337
15.6	RECOMENDACIONES HIDROQUÍMICA	342
15.7	RECOMENDACIÓN DE MODELOS NUMÉRICOS	343
16.	BIBLIOGRAFÍA.....	348

ANEXOS

ANEXO I. ANTECEDENTES Y BASE DE DATOS

ANEXO II. GEOLOGÍA

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 cuenca Salar de Atacama.....	7
Figura 1-2: Regla operacional de Rockwood Lithium aprobada en RCA 021/2016.	8
Figura 1-3: Regla operacional de extracción de salmuera (L/s) aprobada desde 2007 hasta 2031 para SQM. Fuente: CSIC (2017).....	9
Figura 1-4: Extracción histórica, actual y futura de las compañías de SQM y Rockwood Lithium en el núcleo del Salar de Atacama.	10
Figura 1-5: Extracción de pozos de agua en el acuífero aluvial del borde este entre 1997 y 2014, por parte de SQM.....	11
Figura 1-6: Extracción de pozos de agua en la zona marginal por parte de Rockwood Lithium entre 1999 y 2014.	12
Figura 1-7: Perfiles geofísicos realizados entre 2004 y 2015. Exageración vertical de 3x.	27
Figura 2-1: Ubicación de los perfiles de geofísica disponible y no disponible.....	47
Figura 2-2: Valores históricos para la profundidad del nivel estático (TP2 N.E) y de la interfase salina (TP2 I.S), piezómetro TP-2.....	62
Figura 3-1: Ubicación y red hidrográfica.	78
Figura 3-2: Ubicación de las 17 subcuencas definidas para el área de estudio.	79
Figura 3-3. Curvas hipsométricas.	80
Figura 3-4: Ubicación de las estaciones meteorológicas.....	85
Figura 3-5: Serie de tiempo de precipitación anual (periodo 1974-2016).....	87
Figura 3-6: Relación de IUA contra precipitación media anual.....	90
Figura 3-7: Mapa de ubicación del norte de Chile con la los gráficos de frecuencia de precipitación media mensual estandarizada. La precipitación media anual se muestra entre paréntesis.	91
Figura 3-8: Curvas isoyetas de precipitación media anual.	92
Figura 3-9: Curvas de variación estacional de caudales para distintas probabilidades de excedencia (%).....	95
Figura 3-10: Ubicación de estaciones fluviométricas en el área de estudio.....	96
Figura 3-11: Gradiente de la evaporación media anual.....	99
Figura 3-12: Evaporación media mensual en estaciones DGA.	101
Figura 4-1: Morfoestructuras presentes en la zona de estudio.	104
Figura 4-2: Grandes unidades geológicas que delimitan la cuenca del Salar de Atacama.	105
Figura 4-3: Geología cuenca Salar de Atacama.....	117
Figura 4-4: Leyenda del mapa geológico de Cuenca Salar de Atacama (Figura 4-3).	118
Figura 4-5: Geología estructural.	123
Figura 4-6: Ubicación de las columnas litológicas existentes en el área de estudio.	126

Figura 5-1: Puntos de agua con información de permeabilidad hidráulica.....	129
Figura 5-2: Distribución espacial del caudal específico en el área de estudio.	132
Figura 5-3: Distribución espacial de la permeabilidad hidráulica en el área de estudio. En el núcleo se presentan los valores obtenidos a menos de 50 m de profundidad con respecto la superficie, según los datos recopilados por SGA (2015).	136
Figura 5-4: Distribución espacial de la permeabilidad hidráulica en el área de estudio. En el núcleo se presentan los valores obtenidos a más de 50 m de profundidad con respecto la superficie, según los datos recopilados por SGA (2015).	137
Figura 5-5: Distribución espacial del coeficiente de almacenamiento en el área de estudio. ...	139
Figura 5-6: Clasificación de las Unidades Hidrogeológicas en la cuenca.	141
Figura 5-7: Mapa de ubicación del perfil de Dalannais (1979).	144
Figura 5-8: Perfil geológico del borde este, a partir de las columnas estratigráficas de pozos.	146
Figura 5-9: Mapa hidrogeológico de la cuenca Salar de Atacama.	158
Figura 5-10: Información geofísica recopilada y analizada para la cuenca del Salar de Atacama.	161
Figura 5-11: Perfiles geológicos realizados a partir de la interpretación de los perfiles sísmicos. Ubicación de los perfiles en Figura 5-10.	163
Figura 5-12: Interpretación de perfiles sísmicos de la cenca de Salar de Maricunga. En amarillo se indica el espesor de sedimentos y rocas semiconsolidadas con potencial acuífero. La sección AA” está construida sobre el perfil sísmico F14; sección B’B” se construyó sobre el perfil 1g016 y el perfil CC” equivale al perfil 1g022 (Figura 5-10).	165
Figura 5-13: Perfiles TEM L1 y L2 del margen oriental del salar. Perfiles provenientes de DGA (2015) (REF.063-3).	169
Figura 5-14: Perfiles geofísicos del margen nor-oriental del Salar de Atacama (DGA, 2015) con estratigrafía de pozos cercanos. Se observa correlación entre respuesta de baja resistividad y facies ricas en arcillas y resistividades intermedias con depósitos volcánicos e ignimbritas....	170
Figura 5-15: Ubicación de perfiles TEM efectuados por la empresa SLM NX Uno de Peine en el borde oeste del Salar de Atacama. Campañas de 2004 (amarillo), 2006 (azul) y 2007 (rojo)..	171
Figura 5-16: Perfil TEM L1 del margen oeste del Salar de Atacama (REF.029-2). Descripción en texto.....	173
Figura 5-17: Identificación de cuña de la interfase de aguas dulce-salobres y salmueras en el sector sureste del Salar de Atacama mediante perfiles TEM. Ubicación de los perfiles en Figura 5-10.	174
Figura 5-18: Ubicación del trazado del perfil TEM L9, en la parte central del salar. Se indican coordenadas y cota de las estaciones No. 300, 322 y 345. Detalle del perfil en Figura 5-19...	175

Figura 5-19: Perfil TEM L9 del sector central del salar. Ubicación del perfil en Figura 5-10 y Figura 5-18.	176
Figura 5-20: Identificación de la interfase salina en el sector sur del salar por medio de la correlación con perfiles de conductividad eléctrica en pozos.	178
Figura 5-21: Imagen en planta de los volúmenes construido en el Leapfrog Hidro V2.7.2. Exageración vertical: x2.	182
Figura 5-22: Vista noreste de los acuíferos del Salar de Atacama construídos en el Leapfrog Hidro V2.7.2. Exageración vertical: x8.	183
Figura 5-23: Vista noroeste de los acuíferos del Salar de Atacama construídos en el Leapfrog Hidro V2.7.2. Exageración vertical: x8.	184
Figura 5-24: Imagen en planta del Volumen 6 construído en el Leapfrog Hidro V2.7.2. Exageración vertical: x2.	185
Figura 5-25: Catastro de pozos con registro de nivel de agua.	187
Figura 5-26: Ubicación de los pozos analizados en la evolución temporal del nivel de agua.	189
Figura 5-27: Evolución temporal de la cota piezométrica en el borde sureste del Salar de Atacama (zona marginal).	191
Figura 5-28: Evolución temporal de la cota piezométrica en el borde sureste del Salar de Atacama. Zona marginal (L12-2 y TPZ-11A) y núcleo (pozo 2018, 1001 y SOPM-12C).	191
Figura 5-29: Evolución temporal de la cota piezométrica en la zona marginal centro del Salar de Atacama (Aguas de Quelana).	192
Figura-5-30: Gráfico con variación de las cotas piezométricas en la zona marginal norte del Salar de Atacama (Laguna Chaxa).	193
Figura-5-31: Gráfico con variación de las cotas piezométricas en la zona marginal norte del salar de Atacama (Barros Negros).	193
Figura 5-32: Gráfico con variación de las cotas piezométricas en la zona marginal centro del salar de Atacama y núcleo (SOPM-9, L5-4).	194
Figura-5-33: Evolución temporal de la cota piezométrica en el acuífero aluvial Salar de Atacama (inmediaciones del Pozo Mullay-1).	195
Figura 5-34: Evolución temporal de la cota piezométrica en el acuífero aluvial Salar de Atacama (inmediaciones del Pozo Allana).	196
Figura 5-35: Evolución temporal de la cota piezométrica en el acuífero aluvial Salar de Atacama (inmediaciones del Pozo Camar-2).	196
Figura-5-36: Gráfico con variación de las cotas piezométricas en la zona de influencia del cono de bombeo generado por SQM.	197

Figura 5-37: Mapa piezométrico del nivel de salmuera (m s.n.m.) a 12-08-1986 (Hydrotechnica, 1987).	199
Figura 5-38: Mapa piezométrico de la Cuenca Salar de Atacama (agosto de 2013). Equidistancia de 10 m.	202
Figura 5-39: Mapa piezométrico del núcleo del Salar de Atacama y el acuífero del borde este (agosto de 2013). Equidistancia de 1 m.....	203
Figura 5-40. Perfil hidrogeológico conceptual de la cuenca de Salar de Atacama.	206
Figura 5-41. Perfil hidrogeológico conceptual del sector de Monturaqui Negrillar Tilopozo.....	207
Figura 5-42: Situación de las reglillas de las lagunas La Punta-La Brava.....	209
Figura 5-43: Análisis isotópico del sistema de las lagunas La Punta-La Brava.	210
Figura 5-44: Modelo conceptual del funcionamiento de las lagunas del sistema La Punta-La Brava.	210
Figura 5-45: Mapa de ubicación de las lagunas del Sistema Peine.	211
Figura 5-46: Modelo conceptual del funcionamiento de las lagunas del sistema Peine.	212
Figura 5-47: Mapa de ubicación de las lagunas del sistema Aguas de Quelana.	213
Figura 5-48: Modelo conceptual del funcionamiento de las lagunas del sistema Aguas de Quelana.	213
Figura 5-49: Mapa de ubicación de las lagunas del sistema Soncor.	214
Figura 5-50: Modelo conceptual del funcionamiento de las lagunas del sistema Soncor.	215
Figura 6-1: Tipos de Punto con datos de hidroquímica.	219
Figura 6-2: Sectorización Hidroquímica.	220
Figura 6-3: Relación entre la CE y TDS.....	224
Figura 6-4: Distribución espacial de la CE	225
Figura 6-5: Diagrama de Piper de todas las aguas emplazadas en la cuenca Salar de Atacama.	227
Figura 6-6: Diagrama de Piper de las aguas emplazadas en el sector Acuífero MNT.....	228
Figura 6-7: Diagrama de Piper de las aguas emplazadas en el sector Borde Este.	229
Figura 6-8: Diagrama de Piper de las aguas emplazadas en el sector Cordillera.	231
Figura 6-9: Diagrama de Piper de las aguas emplazadas en el sector Cordón de Lila	232
Figura 6-10: Diagrama de Piper de las aguas emplazadas en el sector Núcleo.....	233
Figura 6-11: Diagrama de Piper de las aguas emplazadas en la zona Marginal.	234
Figura 6-12: Diagrama de Piper de las aguas emplazadas en las zonas Norte y Noroest.	235
Figura 6-13: Evolución temporal del B, Li, K y Mg disuelto en las lagunas de la zona Marginal.....	239

Figura 6-14: Evolución temporal del B, Li, K y Mg disuelto en los piezómetros MP-01A y MP-01B situados en el sureste de la zona Marginal.....	240
Figura 6-15: Concentración de B, Li, Mg y K según tipología y sector geográfico.	243
Figura 6-16: Distribución de boro (Bo).	244
Figura 6-17: Distribución de litio (Li).	245
Figura 6-18: Distribución de magnesio (Mg).	246
Figura 6-19: Distribución de potasio (K).....	247
Figura 6-20: Evolución temporal de $\delta^{18}O$ de las aguas en los sectores Acuífero MT, Borde Este, Cordón de Lila y Zona Cordillerana.	250
Figura 6-21: Evolución temporal de $\delta^{18}O$ de las aguas subterráneas del sector Zona Marginal.....	252
Figura 6-22: Evolución temporal de $\delta^{18}O$ de las aguas superficiales del sector Zona Marginal.....	253
Figura 6-23: Evolución temporal de $\delta^{18}O$ de las aguas subterráneas del sector Núcleo del Salar.	254
Figura 6-24: Composición isotópica δ^2H v/s $\delta^{18}O$ de las aguas analizadas.....	258
Figura 6-25: Composición isotópica de las muestras de precipitación (localizadas fuera de la cuenca).....	259
Figura 6-26: Ejemplo de una relación entre diferentes muestras de aguas y la recta altitudinal local. Fuente: FCIHS (2009).	261
Figura 6-27: Relación de la cota topográfica de muestreo v/s $\delta^{18}O$ de las aguas analizadas.....	262
Figura 6-28: Relación B/Cl v/s $\delta^{18}O$ de las aguas analizadas.....	264
Figura 7-1: Mapa de ubicación de zonas de protección ambiental y explotación.	270
Figura 8-1: Cuenca aportante a estación San Pedro en Cuchabrachi.	277
Figura 8-2: Sistema hidrometeorológico simplificado de la precipitación al caer al suelo.....	280
Figura 8-3: Curvas de evaporación contra profundidad en la estratificación salina.	282
Figura 8-4: Curvas de evaporación contra profundidad del limo salino.....	282
Figura 8-5: Curvas de evaporación contra profundidad del sulfato granular.....	283
Figura 8-6: a) Imagen satelital. b) Índice de brillo (TCBI). c) Índice de humedad (TCWI). d) Reclasificación.	285
Figura 8-7: Curvas de profundidad contra índice de humedad (TCWI).....	286
Figura 8-8: Distribución de las secciones de cálculo de caudal.	293
Figura 9-1: Vista esquemática del balance hídrico del acuífero en régimen natural (años 80).....	297
Figura 9-2: Vista esquemática del balance hídrico del acuífero en régimen de explotación (promedios y tasas representativas del periodo 2000 a 2015).....	298

Figura 10-1: (1) Usos de compuestos de litio por aplicación en 2014. (2)	301
Figura 10-2: Proceso de producción de carbonato de litio a partir de salmuera.	302
Figura 10-3: Potencialidad de Li en salmueras a nivel mundial.	304
Figura 10-4: Composición química de salmueras en el núcleo del Salar de Atacama (g/l).	305
Figura 11-1: SHAC definidos por la DGA en Informe Técnico SDT N°339 de 2013	312
Figura 11-2: Mapa de ubicación de sectores hidrogeológicos de aprovechamiento común.	318
Figura 15-1: Cartografía geológica disponible y utilizada para el análisis de la cuenca del Salar de Atacama.	329
Figura 15-2: propuesta de instalación de los anillos de infiltración	335

Índice de tablas

Tabla 1-1: Pozos con derechos de agua pertenecientes a SQM.	11
Tabla 1-2: Pozos con derechos de agua pertenecientes a Rockwood Lithium hasta 2015	12
Tabla 2-1: Resumen de información geofísica reinterpretada para el estudio de referencia.	44
Tabla 2-2: Unidades hidrogeológicas definidas en los estudios EIA, por autores diferentes.	56
Tabla 2-3: Valoración de antecedentes según el número de registros, la distribución de éstos y la información disponible.	74
Tabla 3-1: Parámetros morfológicos principales de las 17 subcuencas.	81
Tabla 3-2: Estaciones meteorológicas.	83
Tabla 3-3: Disponibilidad de información pluviométrica.	86
Tabla 3-4: Estadígrafos principales de la precipitación anual.	89
Tabla 3-5: Estaciones pluviométricas.	93
Tabla 3-6: Disponibilidad de información pluviométrica.	94
Tabla 3-7: Caudales aforados en quebradas y vertientes.	97
Tabla 3-8: Estaciones con medición de evaporación de tanque.	98
Tabla 3-9: Disponibilidad de información de evaporación de tanque.	100
Tabla 5-1: Caudales específicos en pozos ubicados en la cuenca Salar de Atacama.	130
Tabla 5-2: Correlación entre conductividad hidráulica y unidades hidrogeológicas.	133
Tabla 5-3: Permeabilidades promedio para cada unidad geológica definida.	134
Tabla 5-4: Permeabilidades y transmisividades del acuífero de MNT.	135
Tabla 5-5: Parámetros hidráulicos del acuífero UH 1 en el borde norte del Salar de Atacama.	142
Tabla 5-6: Parámetros hidráulicos del acuífero UH 1 en el sector borde sur del Salar de Atacama.	144

Tabla 5-7: Parámetros hidráulicos del acuífero UH 1 en el sector del borde este del Salar de Atacama, obtenidas mediante pruebas de bombeo.	145
Tabla 5-8: Parámetros hidráulicos del acuífero UH 2 en el sector occidental del núcleo del salar, obtenidas mediante pruebas de bombeo, representativas de menos de 50 m de profundidad.	148
Tabla 5-9: Parámetros hidráulicos del acuífero UH 2 en el sector occidental del núcleo del salar, obtenidas mediante pruebas de bombeo, representativas de más de 50 m de profundidad. ...	150
Tabla 5-10: Parámetros hidráulicos del acuífero UH 3 en la parte oriental del núcleo del Salar de Atacama, obtenidos mediante pruebas de bombeo.	152
Tabla 5-11: Características de las ignimbritas UH 4.	154
Tabla 5-12: Resumen de los parámetros hidráulicos, acuíferos y unidades hidrogeológicas de la Cuenca del Salar de Atacama. Fuente: elaboración propia a partir de antecedentes.	157
Tabla 5-13: Levantamientos geofísicos recopilados para el análisis de la geometría de los acuíferos.	160
Tabla 5-14: Rango de resistividades utilizadas para la interpretación de materiales y acuíferos en el Salar de Atacama.	167
Tabla 5-15: Datos de profundidad de la interfase Salina diagnosticada en pozos del sector Callejón, en el extremo sur de la cuenca del Salar de Atacama.	177
Tabla 5-16: Cálculo de volumen de almacenamiento.	216
Tabla 6-1: Tipos y subtipos de punto para clasificación hidroquímica.	217
Tabla 6-2: Concentraciones litio (Li) y Boro (B).	236
Tabla 6-3: Concentraciones de potasio (K) y magnesio (Mg).	237
Tabla 6-4: Cantidad de muestras, clasificadas en base a su ubicación y tipo de punto, con al menos 4 mediciones de isótopos $\delta^{18}O$ y δD	249
Tabla 8-1: Valores del coeficiente de infiltración (CI) en función de la permeabilidad cualitativa.	274
Tabla 8-2: Parámetros para la estimación de CID y CIL en las subcuencas del Salar de Atacama.	275
Tabla 8-3: Estimación de la percolación.	275
Tabla 8-4: Estimación de Ce.	278
Tabla 8-5: Estimación de escorrentía en el área de estudio.	278
Tabla 8-6: Resultados del balance hidrometeorológico.	280
Tabla 8-7: Área de zonas evaporantes en el Salar de Atacama.	287
Tabla 8-8: Evaporación estimada para el salar de Atacama en régimen natural.	288

Tabla 8-9: Evaporación estimada para el salar de Atacama en régimen de explotación (2000 a 2015).	289
Tabla 8-10: Evapotranspiración estimada en el área de estudio.....	290
Tabla 8-11: Extracciones antrópicas de salmuera y aguas fresca	290
Tabla 8-12: Estimación de caudales subterráneos a partir de la piezometría elaborada (agosto 2013).	292
Tabla 9-1: Balance hídrico en el acuífero en régimen natural (años 80).....	295
Tabla 9-2: Balance hídrico en el acuífero en régimen de explotación (promedios y tasas representativas del periodo 2000 a 2015).	296
Tabla 9-3: Comparación con balances históricos (régimen natural)	300
Tabla 10-1: Comparaciones relevantes en salares en el mundo.	306
Tabla 10-2: Concentraciones de Li y K en los salares del norte de Chile.	306
Tabla 10-3: Rangos de concentraciones adoptados junto con sus ponderaciones.	309
Tabla 10-4: Resumen estimación en Mt del potencial de Litio.	310
Tabla 11-1: Oferta de recursos hídricos frente a demanda comprometida	313
Tabla 11-2: Demanda comprometida por sector SHAC al 30 de julio de 2014.....	314
Tabla 12-1: Comparativa de software para modelización numérica.....	320
Tabla 15-1: Costos y métodos de obtención de una topografía.	341
Tabla 15-2: Listado de parámetros posibles a analizar en laboratorio.	343

Resumen Ejecutivo

Las cuencas de 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 y 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 realizada durante la Etapa I, del modelo hidrogeológico conceptual de la Etapa II y finalmente en la Etapa III se ha incluido, además, la construcción del modelo Leapfrog 3D y la integración de la información en un proyecto SIG.

La zona de estudio corresponde a la cuenca del Salar de Atacama que tiene una extensión de 17.007 km². En la parte topográficamente más baja y en el depocentro de ésta se encuentra el Salar de Atacama, que tiene una superficie de 3.200 km². Morfológicamente el salar es un elipsoide, cuyo eje longitudinal tiene 85 km y el transversal presenta una anchura máxima de 50 km. La cuenca se ha dividido en 17 subcuencas, de las cuales 4 corresponden al propio salar y 13 a cuencas aportantes. Dicha subdivisión en subcuencas también ha sido definida por otros autores como SGA (2015) y DGA/GCF (2010).

En la cuenca existen numerosos sistemas de fallas y cabalgamientos originados en las distintas orogenias. Durante el Cretácico Medio se produce una etapa compresiva que genera el plegamiento de los materiales y que se denomina Orogenia Peruana (Steinmann, 1929), mientras que, en eventos posteriores, en el límite Eoceno-Oligoceno comienza la Orogenia Incaica (Steinmann, 1929), que genera los rasgos morfoestructurales que caracterizan la cuenca del Salar de Atacama: Cordillera Domeyko, Cordón del Lila, Cordillera Occidental y Arco volcánico actual.

El Salar está formado por depósitos salinos, principalmente evaporitas, mientras que hacia los bordes predominan los sedimentos detríticos (finos, arenas y gravas, etc.). Los depósitos salinos tienen espesor máximo en el centro del salar (núcleo), donde el basamento se encuentra a mayor profundidad. Los espesores de los depósitos salinos en el núcleo estarían comprendidos entre 900 y 1.100 m.

La parte superficial del núcleo del Salar de Atacama es heterogéneo. En términos generales, se observa un comportamiento hidráulico distinto en el bloque elevado y hundido del Sistema Falla Salar (SFS) -falla inversa que atraviesa el Salar de Atacama por su centro-, de tal forma que se ha definido el sector occidental, como un acuífero constituido por las Unidades Hidrogeológicas 2 y 4 y el sector oriental como un acuífero kárstico con una Unidad Hidrogeológica 3 con permeabilidad muy elevadas. En profundidad todo el núcleo del salar está constituido por Unidad Hidrogeológica 4.

Además del acuífero asociado al núcleo, existen otros acuíferos principales identificados de tipo Unidad Hidrogeológica 1 (acuífero aluvial borde este) y de tipo Unidad Hidrogeológica 2 (acuífero de Monturaqui-Negrillar-Tilopozo), que contribuyen significativamente en la recarga del núcleo del Salar de Atacama. Sin embargo, el borde oeste presentaría una recarga menor, aunque existen pocos datos para cuantificar la recarga subterránea de este sector.

En términos generales, las direcciones de flujo subterráneo son convergentes al núcleo del salar y provienen del norte (desde el delta de San Pedro, acuífero aluvial y depósitos evaporíticos de la zona marginal norte), a lo largo del borde este (acuífero aluvial), sureste (acuífero MNT) y suroeste (aportes menores desde la parte sureste de Cordillera de Domeyko). Los gradientes hidráulicos son bajos ($< 0,0086$) y disminuyen drásticamente en el núcleo del salar.

Las aguas de recarga, que se encuentran en las partes altas de la cuenca (zona de cordillera) tienen una composición mayoritariamente clorurada-sódica y se encuentran más diluidas que las aguas de la zona marginal o del núcleo.

Asimismo, desde las zonas de recarga y en la dirección general de flujo, las aguas subterráneas se enriquecen en iones debido al tiempo de residencia en el acuífero y en la zona marginal, donde se produce la cuña salina entre el agua dulce y la salmuera del salar. En esta última zona, predominan los procesos de evaporación de las aguas subterráneas al aflorar en superficie, evaporarse y mezclarse con la salmuera del núcleo del salar.

En la zona marginal y el núcleo del salar, es posible distinguir que las facies hidroquímicas son de tipo cloruradas sódicas y que presentan los mayores valores de conductividad eléctrica registrada ($> 250.000 \mu\text{S/cm}$). 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 concretado y detallado en el capítulo 15 y que tienen como finalidad arrojar información en las zonas con mayor incertidumbre y mejorar el modelo hidrogeológico conceptual.

1. Introducción

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

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

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

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

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

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

En el presente informe de Etapa III, correspondiente a la **cuenca hidrogeológica Salar de Atacama** (en adelante cuenca Salar de Atacama), se ha llevado a cabo la realización del modelo hidrogeológico conceptual. En este contexto las tareas que se han desarrollado han sido la caracterización hidrológica, geológica, geofísica, hidrogeológica e hidroquímica de la zona de estudio a partir de la toda la información recopilada y revisada.

1.1 Objetivos

El objetivo general del proyecto consiste en la recopilación de todos los antecedentes existentes de la cuenca Salar de Atacama con el fin de conformar un modelo hidrogeológico integrado para poder determinar y diseñar la manera más sustentable de obtener el recurso hídrico de la zona.

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

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

- Revisión y el análisis de antecedentes disponibles, relevantes para este estudio.
- Elaboración de un catastro de puntos en la zona de estudio (levantamiento de bases de datos).
- Análisis de los datos hidrometeorológicos existentes en las zonas de trabajo, para alcanzar un mayor grado de precisión en la evaluación hidrológica. A partir de esto, se podrá progresar en la exactitud de la evaluación de los recursos hídricos existentes en la zona.
- Mejora del conocimiento geológico e hidrogeológico de la zona, a partir de la interpretación de perfiles geofísicos, que conllevará la mejora del conocimiento del funcionamiento conceptual de la cuencas 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.
- 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 la cuenca Salar de Atacama.
- 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

La cuenca Salar de Atacama se sitúa en el extremo oriente de la II Región de Antofagasta (Chile). El límite oriental de la cuenca constituye la frontera entre Chile-Bolivia, al norte, y Chile-Argentina, al sur y se encuadra, aproximadamente entre las siguientes coordenadas en DATUM WGS84, las cuales se ilustran en la Figura 1-1:

- Límite Norte 7.530.000
- Límite Sur 7.275.000
- Límite Este 525.000
- Límite Oeste 650.000

La cuenca corresponde a una cuenca endorreica donde el Salar de Atacama se ubica en la parte topográficamente más baja y en el depocentro de ésta. Morfológicamente el salar es un elipsoide, cuyo eje longitudinal tiene 85 km y el transversal presenta una anchura máxima de 50 km. La parte central se encuentra a 2.300 m.s.n.m. (Muñoz et al., 2004).

El Salar de Atacama se encuentra aproximadamente a 160 km Calama, 220 km de la ciudad de Antofagasta (capital de la II Región) y a 270 km de Tocopilla. Las poblaciones más cercanas al salar, nombradas de norte a sur son: San Pedro de Atacama, Toconao, Socaire, Peine, Tilomonte y Tilopozo.

El acceso al Salar de Atacama desde Calama se realiza a través de la Ruta Internacional 23-CH, que une la ciudad de Calama con el paso internacional Sico (límite entre Chile y Argentina). Desde Calama hasta el pueblo de Toconao, la ruta transcurre por una carretera asfaltada. A partir de este punto se accede a la ruta B-355, que recorre el borde oriental del Salar y que conecta con la localidad de Peine.



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

1.3 Historia de las operaciones en el Salar de Atacama

En la cuenca Salar de Atacama se efectúa históricamente la extracción de salmuera en el núcleo del Salar de Atacama y explotación de agua mediante pozos de bombeo en otros acuíferos de la cuenca.

Extracciones de salmuera en el núcleo del salar:

- La Sociedad Chilena del Litio Limitada, inicia la explotación de salmuera del núcleo del Salar de Atacama en 1983, con una extracción promedio anual de 48,6 l/s.
- Desde 1997 se incrementa progresivamente la extracción hasta superar los 100 l/s promedio anual en el año 2005 y finalmente se alcanzan 142 l/s en 2015 por la compañía Rockwood Lithium, mediante 21 pozos ubicados en el sur del núcleo del Salar limitado por el Cordón de Lila.
- En enero de 2016, se aprueba con RCA N°021/2016 el proyecto “EIA Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de evaporación Solar en el Salar de Atacama” de Rockwood Lithium, el aumento del caudal de explotación de salmuera de 300 l/s, adicionalmente a los 142 l/s ya aprobados. El aumento de la extracción se realizará mediante incrementos semestrales de 60 l/s, iniciándose desde la fecha de término de construcción de los pozos del Plan de Alerta Temprana (PAT) (Figura 1-2).

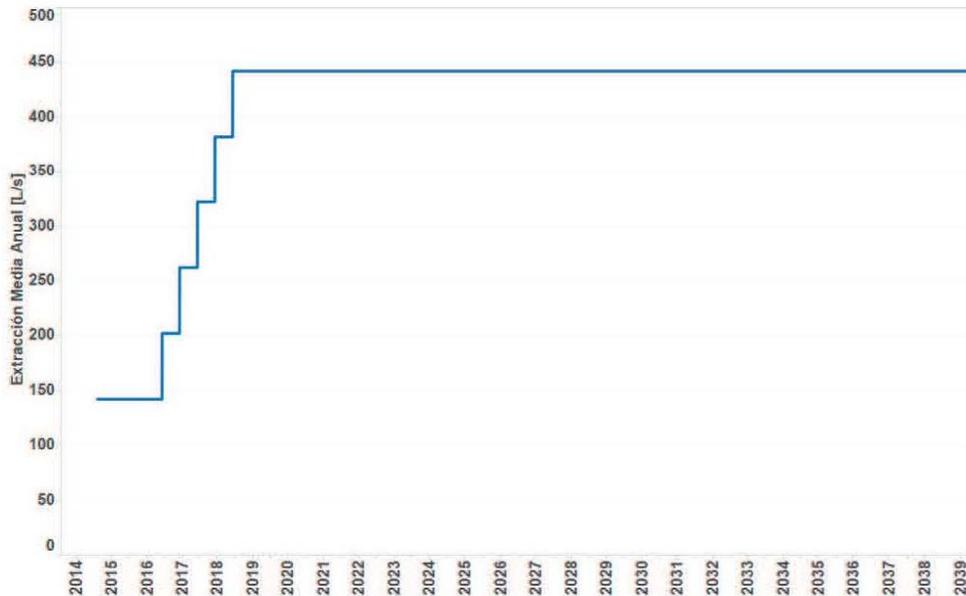


Figura 1-2: Regla operacional de Rockwood Lithium aprobada en RCA 021/2016.

Fuente: CSIC (2017).

- MINSAL Ltda. inicia en noviembre de 1994 la explotación de la salmuera del núcleo del Salar de Atacama con un caudal promedio anual del orden de 70 l/s.
- En 2006, con la aprobación de la RCA226/2006, SQM Salar (antigua MINSAL Ltda.) comienza a aumentar los caudales de explotación, al menos hasta 750 l/s, pero según la regla operacional de las reinyecciones que se efectúan a raíz de la RCA, el caudal puede ser mayor. Este caudal se bombea en la zona centro y suroeste del núcleo del salar.
- En la actualidad (2017) SQM bombean al menos 1.500 l/s y se pretende llegar a los 1.700 l/s a partir del 2026. En la Figura 1-3 se muestran los caudales de extracción aprobados en RCA226/2006 hasta el año 2031.

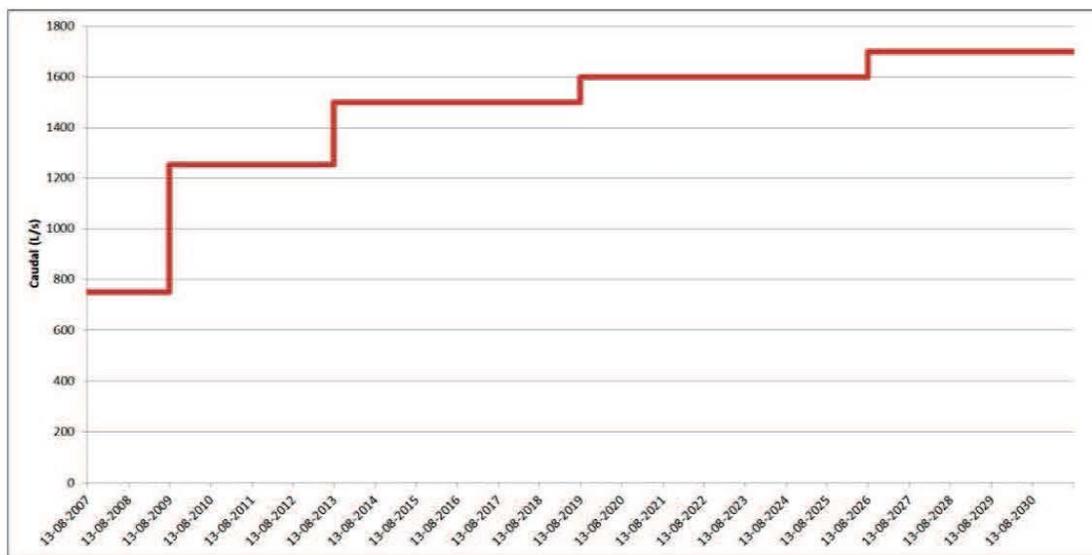


Figura 1-3: Regla operacional de extracción de salmuera (L/s) aprobada desde 2007 hasta 2031 para SQM.
Fuente: CSIC (2017).

La extracción de salmuera histórica, actual y futura de SQM y Rockwood se presenta en la Figura 1-4.

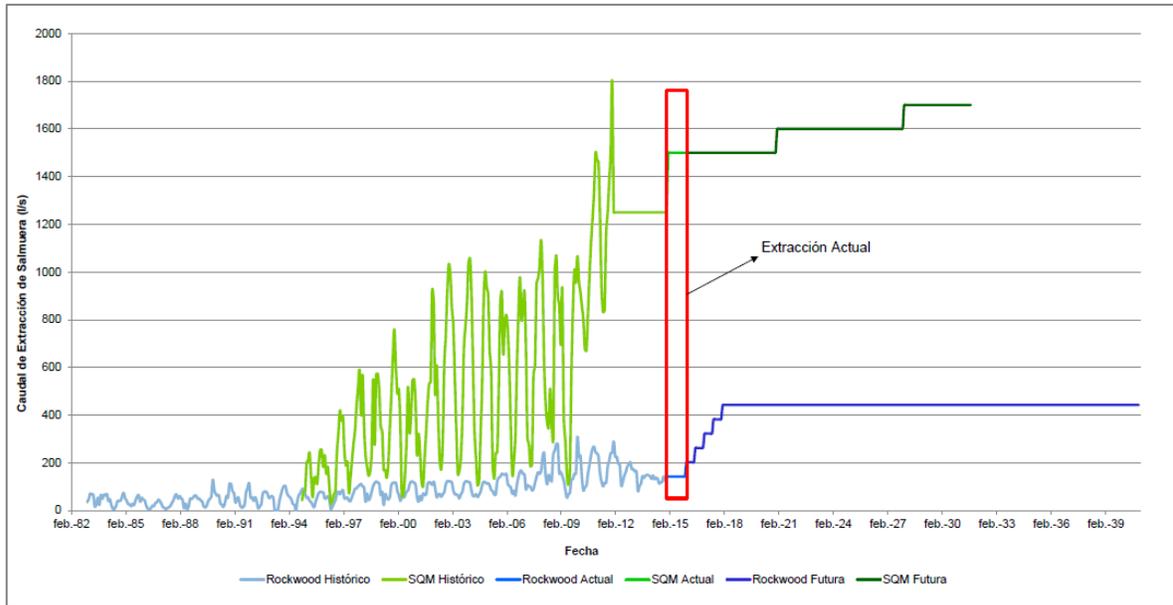


Figura 1-4: Extracción histórica, actual y futura de las compañías de SQM y Rockwood Lithium en el núcleo del Salar de Atacama.

Fuente: SGA (2015).

Extracciones de agua dulce en los acuíferos de la cuenca:

Las extracciones de agua dulce en otros acuíferos de la cuenca para uso industrial se realizan principalmente por Minera Escondida Limitada (MEL), Compañía Minera Zaldívar (CMZ), SQM y Rockwood Lithium (RWL). A continuación, se presentan los acontecimientos históricos de la cuenca:

- MEL opera desde 1998, en el sur de la cuenca del Salar de Atacama. En la actualidad, bombea 1.400 l/s en el acuífero de Monturaqui-Negrillar-Tilopozo (MNT) agua para uso industrial. Dicho caudal fue otorgado con la aprobación ambiental de la RCA1/97, en el año 2001.
- CMZ cuenta con la aprobación ambiental para extraer un caudal máximo de 500 l/s, según la RCA574 del año 1993. La empresa comenzó a extraer un caudal de 146 l/s en el acuífero de MNT en el año 1994, justo aguas abajo de las operaciones de MEL (sector Negrillar). Hasta la fecha, la extracción ha variado entre 132 y 219 l/s conforme al desarrollo de las instalaciones mineras. En la actualidad CMZ bombea 195 l/s.
- SQM es titular de aprovechamientos de agua subterránea por un caudal total de 547 l/s, aunque solo se explotan 240 l/s mediante 5 pozos ubicados en el borde este del salar (Mullay-1, Allana, Camar-2, P-2 y Socaire-5). Existen 5 pozos más que tienen pendiente autorización ambiental.

Nombre	Código de Expediente	Fecha de Resolución	WGS 84		Cota collar m.s.n.m	Caudal Autorizado (l/s)
			Este	Norte		
Mullay 1	ND-0202-2670	02/03/1988	599,918	7,422,647	2,406	40
CAMAR 2	ND-0202-2670	02/03/1988	598,048	7,409,857	2,382	60
ALLANA	ND-0202-2670	02/03/1988	598,933	7,414,864	2,406	40
SOCAIRE 5	ND-0202-2670	02/03/1988	597,952	7,405,823	2,357	65
P2	ND-0202-1073	26/09/1997	596,063	7,396,456	2,324	35
ACS SEIS	ND-0202-2180	10/11/2014	595,696	7,395,237	2,322	13*
S-5	ND-0202-1887	10/11/2014	595,838	7,393,819	2,322	42*
S-6	ND-0202-1887	10/11/2014	595,696	7,395,237	2,322	50*
SP-1	ND-0202-2217	10/11/2014	596,106	7,394,686	2,325	58*
SP-4	ND-0202-2216	10/11/2014	595,892	7,392,848	2,319	47*

* Sin Autorización Ambiental

Tabla 1-1: Pozos con derechos de agua pertenecientes a SQM.

Fuente: SGA (2015) con información de DGA (2014).

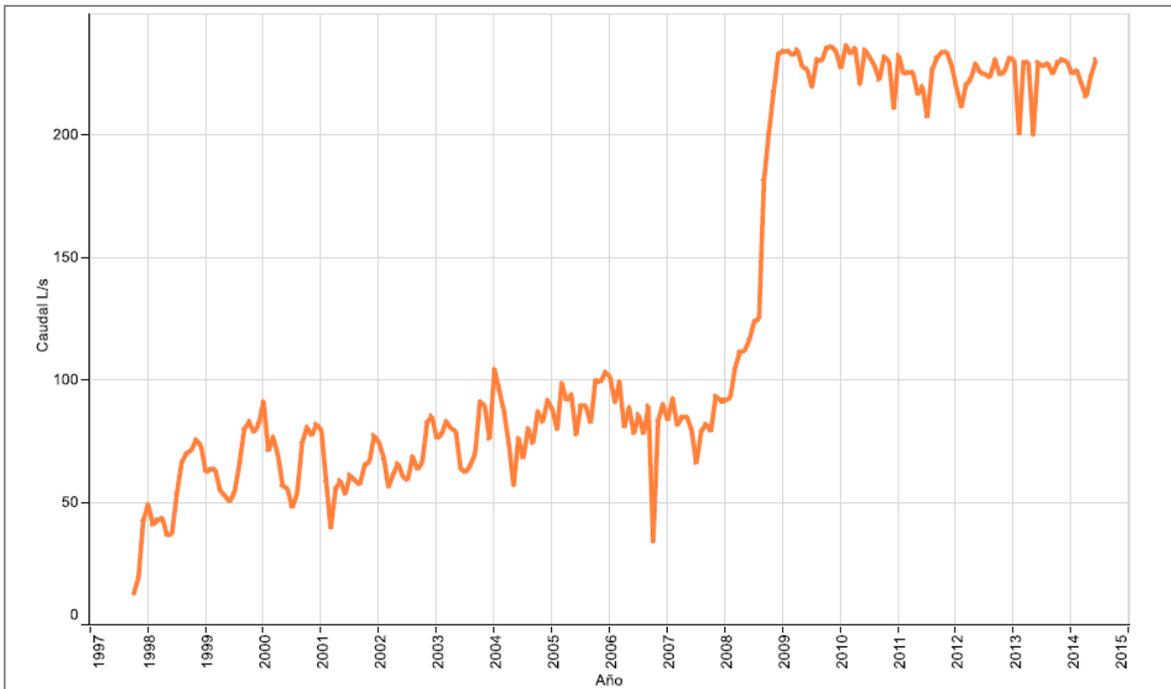


Figura 1-5: Extracción de pozos de agua en el acuífero aluvial del borde este entre 1997 y 2014, por parte de SQM.

Fuente: SGA (2015) sobre la base de datos publicados en SQM en los informes “Segunda Actualización del modelo de flujo de agua subterránea en el Salar de Atacama según RCA 226/2006” e “Informe N° 15 del Plan de Seguimiento ambiental hidrogeológico Proyecto Cambios y Mejoras de la Operación Minera en el Salar de Atacama”.

- RWL tiene otorgado un caudal de 23,5 l/s para el aprovechamiento de agua subterránea, que realiza mediante 3 pozos ubicados en la zona sureste del núcleo del Salar de Atacama. En el RCA N°021/2016 se aprobó, además, un aumento de caudal de extracción por 6 l/s más en Tucúcaro y Tilopozo. De esta forma, el caudal otorgado es de 29,5 l/s.

Nombre	Código de Expediente	Fecha de Resolución	WGS 84		Cota collar msnm	Caudal otorgado (l/s)
			Este	Norte		
Tilopozo	ND-0202-2728	24-08-1983	577.715	7.369.511	2.308,10	8,5
Tucúcaro	ND-0202-1125	10-07-1996	572.970	7.373.199	2.303,13	10
PEINE	ND-0202-1509	22-09-2000	593.722	7.381.893	2.326,28	5

Tabla 1-2: Pozos con derechos de agua pertenecientes a Rockwood Lithium hasta 2015

Fuente: SGA (2015).

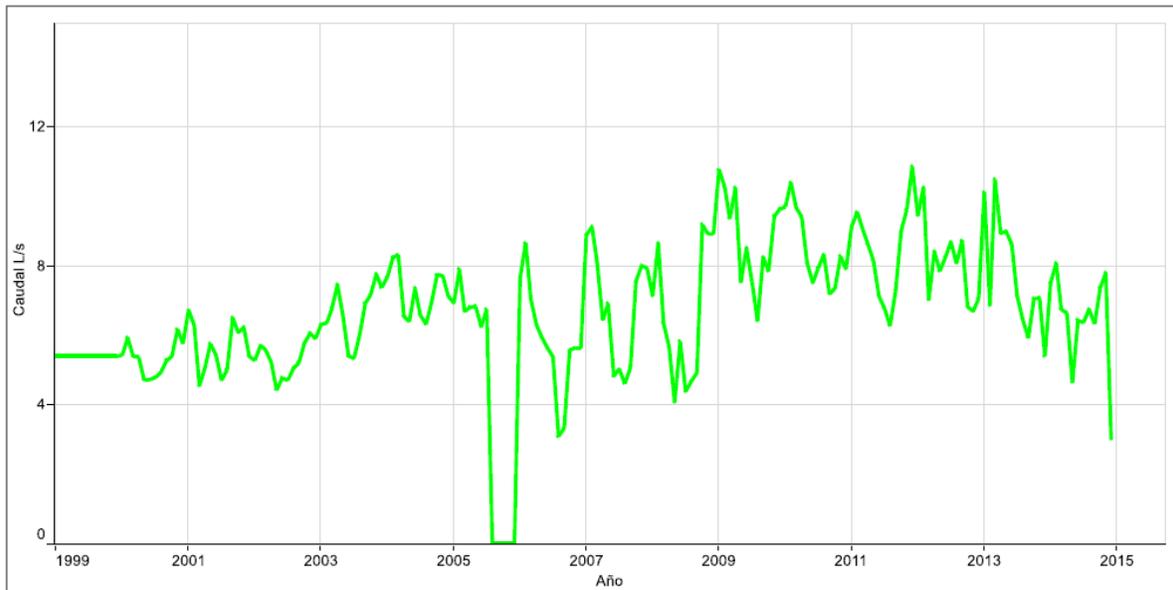


Figura 1-6: Extracción de pozos de agua en la zona marginal por parte de Rockwood Lithium entre 1999 y 2014.

Fuente: SGA (2015).

1.4 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.

1.4.1 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 que será entregado en el presente informe de Etapa III.

1.4.1.1 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 "A" de Atacama, seguida de una numeración correlativa (A_REF.001; A_REF.002, etc.).

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

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

- **Año:** año de publicación del trabajo.
- **Elaborado por:** indica la entidad (empresa, institución, compañía, consultora) que realizó el estudio.
- **Autor(es):** personas que realizaron el proyecto o empresa mandante.
- **Link de descarga:** ruta de internet para encontrar el archivo vía online, en caso de que exista.
- **Alcance geográfico:** indica el ámbito geográfico que abarca el estudio (nacional, inter-regional, regional o de cuenca).
- **Región:** indica la región en donde se emplaza el proyecto del informe consultado.
- **Provincia:** indica la provincia en donde se ubica la zona de estudio del proyecto.
- **Cuenca:** indica la cuenca en donde se emplaza la zona de estudio del proyecto.
- **Subcuenca:** indica la subcuenca 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.

1.4.1.2 Áreas temáticas

Se han definido 10 áreas temáticas con el objetivo de facilitar el análisis de cada una de las materias que integra el modelo conceptual hidrogeológico. De esta manera, las referencias se han integrado, en función de la información que presenta, en cada una de las áreas temáticas. Es posible que una misma referencia se encuentre detallada en más de un área temática. Cabe destacar, que en cada área temática y para cada documento se describe y analizan los aspectos más relevantes que contiene, según la metodología del punto 1.4.1.4 del presente informe.

La descripción de las áreas temáticas se explica a continuación:

- **Geología Regional y Local:** información geológica regional y local presentada en las cartas geológicas, artículos de investigación, informes, etc.
- **Geomorfología:** antecedentes relacionados con la descripción del relieve de las diferentes cuencas y/o áreas donde existen humedales, bofedales y/o ecosistemas de interés ambiental.
- **Meteorología:** estudios climatológicos que contienen el análisis de variables meteorológicas como el viento (direcciones predominantes, velocidad, etc.), la precipitación (caracterización espacial y/o temporal de las series de precipitación), temperatura atmosférica, radiación solar, insolación, presión atmosférica, evaporación, sublimación y/o humedad.
- **Hidrología:** estudios que contienen el análisis integrado de las componentes que intervienen en el balance hidrometeorológico; es decir, contempla la interacción de las variables atmosféricas (precipitación, evaporación, evapotranspiración), con los flujos superficiales (aforos en ríos), datos de la altura de la lámina de agua en lagos, embalses y/o lagunas, etc. Por lo tanto, en esta área temática se incluyen estudios que determinan valores de infiltración o recarga.
- **Geofísica:** documentos que incluyen el análisis de datos y perfiles geofísicos obtenidos por diferentes métodos (TEM, NanoTEM, Tomografía eléctrica, gravimetría, 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 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.

1.4.1.3 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.

1.4.1.4 Análisis y valoración de la información

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

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

1. Se enumeran los antecedentes más relevantes de cada área temática y se especifica la información que contiene cada documento según los apartados siguientes:
 - Número de registros de puntos de agua, pozos o sondajes con columnas estratigráficas que contiene el documento.
 - 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. Además, se realizará una evaluación de la calidad de la información especificando si la misma es “Buena” o “Regular”.

- 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, 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 se utilizan antecedentes de otros trabajos para hacer el estudio, 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.

1.4.2 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. El inventario corresponde principalmente a puntos de 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)*”.
- **Dominio:** área de estudio que engloba Salar de Pedernales o, 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 (m):** 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 par aun mismo punto exista más de una referencia.

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

Asimismo, si el pozo presenta **perfilaje de pozo** se indican qué tipo (*caliper*, *gamma natural*, neutrón, *gamma density*, conductividad eléctrica, temperatura, conductividad mediante inducción electromagnética). De la misma forma, si el existen registros de ensayos hidráulicos en el pozo, se indica qué **tipo de ensayo hidráulico** es, teniendo en cuenta el de mayor relevancia. En orden de mayor a menor relevancia se consideran los siguientes ensayos hidráulicos (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 de catastro de puntos puede encontrarse en formato digital en el Anexo I.

1.4.3 Caracterización de la cuenca

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

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

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

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

1.4.4 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 calcatas 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 realizó un mapa piezométrico y una valoración temporal de los niveles freáticos y se analizó la variación de almacenamiento.

- Base de datos de parámetros hidráulicos: Cada punto contiene su localización en un datum común, su elevación original y una elevación calculada a partir de un *Digital Elevation Model (DEM)*. La base de datos contiene datos de permeabilidad hidráulica (K), Transmisividad (T) y coeficiente de almacenamiento (S). Además, se especifica qué tipo de ensayo se realizó (Prueba de bombeo, prueba de bombeo con pozo de observación, etc), su fecha y el método utilizado para la interpretación de los ensayos (Theis, Hantush, etc). En cada punto se especifica de qué referencia origen se ha recopilado la información. Una vez compilados los parámetros hidráulicos y la geología, se procedió a la caracterización de las unidades hidrogeológicas. Adicionalmente, se 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. 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 el sector que pertenece el perfil.

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

1.4.5 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 éstos se generó una completa base de datos, en la cual se indica la ubicación del punto de monitoreo y el tipo de agua, además de la información hidroquímica y/o isotópica con la que cuenta.

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.

1.4.6 Elaboración del modelo hidrogeológico 3D

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, proveniente de las cartas geológicas del SERNAGEOMIN a escala 1:250.000 (Hojas de Calama y Toconao) y a escala 1:500.000 (Hoja de Antofagasta) (Anexo II-01 y Anexo VII del Informe Final) (formato .shp).
- Mapa hidrogeológico de la Cuenca Salar de Atacama realizado por Amphos 21 para el presente proyecto (Anexo III-01 y Anexo VII) (formato .shp).
- 206 columnas litológicas de pozos. La litología de las columnas se ha transcrito y se ha integrado en una base de datos Excel para posteriormente ser incorporado al Leapfrog. En el Anexo I-06 se presenta la base de datos, en el Anexo II se incluye el catastro de pozos con información litológica y Anexo VI-01-02 se presenta la base de datos de input al modelo Leapfrog.
- 73 perfiles geológicos extraídos de las referencias A_REF.029, A_REF.061, A_REF.063, A_REF.075, A_REF.092 y A_REF.093 (Anexo II-03 y Anexo VI-01-06) (formato .jpg).
- 97 perfiles geofísicos extraídos de las referencias A_REF.029, A_REF.047, A_REF.063, A_REF.077, A_REF.091 y A_REF.093 (Anexo II-04 y Anexo VI-01-06) (formato .jpg).
- Isopiezas realizadas por Amphos 21 para el presente proyecto correspondientes al mes de agosto de 2013 (Anexo VII) (formato .shp).
- Proyección en superficie de la interfase salina definida por Fock (2009), Salas (2010) y RWL (SGA, 2015) (formato .shp).
- Aster Global DEM de resolución 30 x 30 m (<https://gdex.cr.usgs.gov/gdex/>) (Anexo VI-01-07) (formato raster). Se realizó una corrección en el DEM debido a que se observaron máximos y mínimos topográficos de entre 50 y 100 m, en zonas más o menos llanas (núcleo y parte norte del salar). La corrección que se realizó fue homogeneizar la cota topográfica de dichas zonas a 2.305 m s.n.m., cota promedio de los collares de los pozos que se encuentran en esa parte y datos aportados por Google Earth.

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

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 estratigráfica de unidades hidrogeológicas, sus orientaciones y relación sedimentaria (erosión o depositación, intrusión) y estructurales.

Radial Basis Function corresponde a un método de interpolación determinístico exacto (la superficie debe pasar por cada valor de muestra medido), mediante el cual se crea una superficie a partir de puntos medidos basándose en el grado de suavizado. Las RBF se usan para generar superficies suaves a partir de un gran número de puntos de datos. Las funciones producen buenos resultados para superficies con una variación suave como la elevación.

El límite horizontal del modelo corresponde al límite de las cuencas hidrográficas, el límite vertical superior corresponde a la topografía del terreno, mientras que el límite inferior está constituido por cierto espesor de basamento. La resolución del modelo 3D presentado es de 400 m. Dicho valor es óptimo para las dimensiones de las cuencas de estudio y el detalle que se ha definido en los volúmenes, en consideración al tiempo de procesamiento que ha requerido y el objetivo del modelo. El resultado mediante dicha resolución se considera aceptable. Adicionalmente, el usuario del modelo 3D puede cambiar dicha resolución en cualquier momento, desde el propio *software*. En trabajos futuros si se quiere modelar zonas concretas de la cuenca se recomienda aumentar la resolución.

Se han reiterado las interpolaciones en varias ocasiones hasta obtener resultados coherentes en los volúmenes modelados.

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

- el archivo Viewer_Salar de Atacama (Anexo VI-03) 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) se encuentran 7 archivos dxf que corresponden a los 6 volúmenes modelados y la superficie piezométrica, archivos que se pueden visualizar o trabajar en el *software* de AutoCAD.
- Perfiles de corte del modelo 3D: 10 perfiles con dirección E-W y 10 perfiles con dirección N-S. Estos se encuentran en el Anexo VI-03-03 como imágenes.

1.4.6.1 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 georeferenciar imágenes en el propio software, y exportarlas georeferenciadas.
- Las bases de datos que se utilizan de entrada de datos son validadas por el software mediante un QA/QC ágil, eficiente y además, Leapfrog permite extraer como producto una base de datos sin errores.
- Los datos de interpolación, que sirven para construir superficies y volúmenes, pueden corresponder a datos medidos o inferidos, éstos últimos se generan manualmente mediante interpretación geológica por el propio geólogo y se pueden ajustar a zonas conocidas mediante perfiles geofísicos o perfiles geológicos en formato imagen.
- Leapfrog es capaz de interpolar datos tipo punto, polilíneas, superficies, polígonos, raster. Lo anterior ofrece versatilidad en el uso y la integración de las diferentes fuentes.
- La creación de los volúmenes que constituyen el modelo 3D es relativamente rápida en función de las dimensiones, resolución del modelo y capacidades computacionales.
- La interfaz gráfica del software es ágil y presenta comandos de teclado de acceso rápido a las vistas. Permite realizar la interpretación de la información de forma espacial. Esto es especialmente ventajoso versus el trabajo realizado en dos dimensiones, donde se tiende a interpretación solo en dos dimensiones y sesgar la tercera.
- Una vez realizado el modelo, la generación de material visual para presentar es rápida y eficiente. Adicionalmente, el producto visual, imágenes, videos, etc. que se obtiene del modelo es de buena calidad.
- Existe la posibilidad de generar un proyecto para ser visualizado en Leapfrog Viewer, en el que se puede observar el modelo y los avances del proyecto.
- Mediante Leapfrog es posible exportar a otros formatos compatibles con MODFLOW, AutoCAD, Vulcan y otros softwares mineros.
- Su compatibilidad con MODFLOW permite exportar grillas para MODFLOW, junto a parámetros 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.

1.4.6.2 Inventario de columnas litológicas y perfiles geológicos

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 Atacama. 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, azimut/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 de agosto de 2013 que se describe en el Capítulo 5.4, del presente informe.

1.4.6.3 Antecedentes geofísicos

Para la realización de la geometría 3D, fue necesario tomar información de levantamientos geofísicos realizados anteriormente, se usaron 64 perfiles TEM, 19 perfiles NanoTEM, 3 perfiles de resistividad eléctrica, 13 perfiles magnetotelúricos, 15 perfiles sísmicos y 2 perfiles gravimétricos. Estos antecedentes se recopilan Anexo VI y Capítulo 5.3. 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 1-7).

1.4.7 Integración de la información en un proyecto GIS

Además, para facilitar la comprensión e integrar 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.

1.4.8 Balance hídrico

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

Se identificaron y calcularon los flujos de descarga del sistema hídrico subterráneo, incluyendo consumos antrópicos y naturales (lagunas, vegetación y salares). Para estimar la evaporación desde el Salar de Atacama 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.

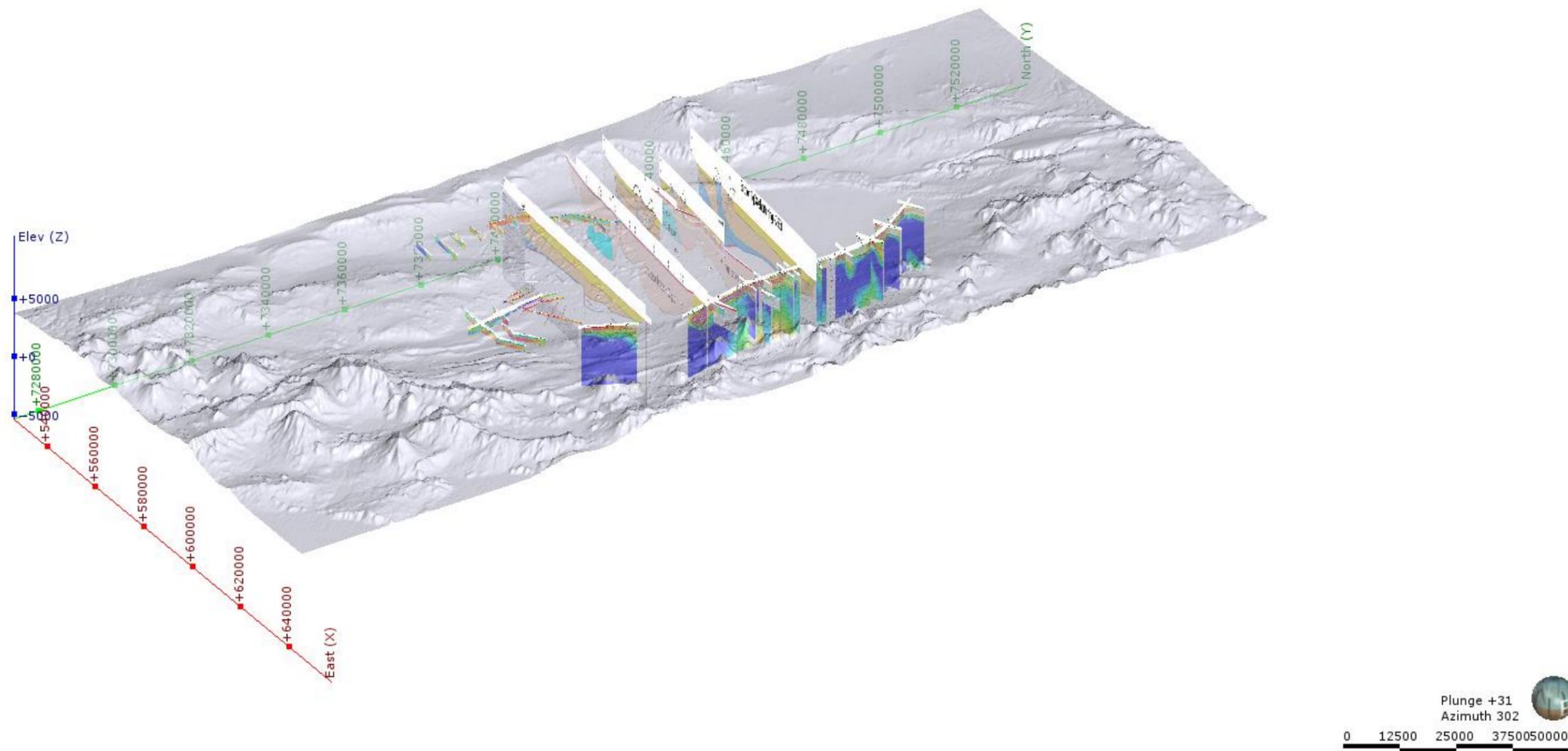


Figura 1-7: Perfiles geofísicos realizados entre 2004 y 2015. Exageración vertical de 3x.

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 e interesantes teniendo en cuenta el objetivo del proyecto.

2.1 Análisis y revisión de la geología

Los antecedentes que se han consultado para llevar a cabo el análisis de la geología de la cuenca del Salar de Atacama son los que se presentan a continuación.

- A_REF.069:

Ramirez y Gardeweg (1982). Carta geológica de Chile. Escala 1:250.000. Hoja de Toconao. Región de Antofagasta. Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN).

En la descripción de la carta geológica se detallan las formaciones, estructuras e historia geológica, así como perfiles donde se observa el espesor de las capas y la relación estratigráfica entre materiales. El mapa geológico ocupa la parte centro-sur de la Cuenca del Salar de Atacama.

La información que se presenta en el mapa y la descripción de éste es de buena calidad.

- A_REF.068:

Marinovic y Lahsen (1984). Carta geológica de Chile. Escala 1:250.000. Hoja de Calama. Región de Antofagasta. Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN).

De la misma forma que en la anterior referencia, en la descripción de la presente carta geológica se detallan las formaciones, estructuras e historia geológica, así como perfiles donde se observa el espesor de las capas y la relación estratigráfica entre materiales. Dicha carta ocupa la parte norte de la Cuenca del Salar de Atacama.

La información que se presenta en el mapa y la descripción de éste es de buena calidad.

- A_REF.090:

Boric, Díaz y Maksaev (1987). Geología y yacimientos metalíferos de la Región de Antofagasta. Hoja 2 de 2 (Sector Sur). Escala 1:500.000. Región de Antofagasta. Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN).

La referencia anterior corresponde a un mapa geológico. En el mapa geológico se muestra la ubicación espacial de yacimientos de elementos metálicos como el cobre, la plata, el manganeso, hierro, etc. Además, también especifica la forma del yacimiento y la categoría. Dicho mapa geológico cubre el extremo sur de la Cuenca del Salar de Atacama.

La información que se presenta en el mapa y la descripción de éste, es de buena calidad.

Es importante mencionar que la geología de la cuenca del Salar de Atacama queda cubierta en su totalidad con las tres referencias mencionadas anteriormente.

- A_REF.038:

Jordan, Mpodozis, Muñoz, Blanco, Pananont, Gardeweg (2007). Cenozoic subsurface stratigraphy and structure of the Salar de Atacama Basin, northern Chile. Journal of South American Earth Sciences 23.

En este estudio se presenta la evolución geológica de la cuenca del Salar de Atacama desde el Cenozoico hasta la actualidad. Además, se detallan las formaciones geológicas que intervinieron en esta etapa y la relación de éstas con las morfoestructuras más relevantes del salar.

Adicionalmente, se incluye la columna estratigráfica del pozo de exploración “Pozo Toconao-I”, que perforó el consorcio formado por las compañías Hunt Oil Co. y ENAP, con el objetivo de explorar hidrocarburos. La profundidad de dicho pozo alcanzó una profundidad de 5.425 m.

La calidad de la información de este estudio es buena y se presentan datos nuevos.

- A_REF.047:

ICASS LTDA. (2014). Análisis de los Mecanismos de Evaporación y Evaluación de los Recursos Hídricos del Salar de Atacama. Dirección General de Aguas (DGA) SIT N 137. Santiago, Chile.

A partir de una recopilación de antecedentes los autores del presente informe incluyen una descripción geológica de superficie, un mapa y perfiles geológicos. La escala de trabajo es a nivel de cuenca del Salar de Atacama.

El mapa geológico contiene las principales morfoestructuras, así como las unidades geológicas de la cuenca, modificado de Bevacqua (1992), SERNAGEOMIN (2003), Aron et al. (2008) y Arriagada et al. (2006).

Las secciones geológicas que presentan son tres, se distribuyen transversalmente al Salar de Atacama y han sido elaboradas por Arriagada et al. (2006). La sección A-A” se ubica al norte del salar, cerca de San Pedro de Atacama; la sección B-B” en el centro; y la C-C” al sur.

Además, incluye un mapa que muestra la distribución de sondajes con información estratigráfica procedente de diferentes fuentes.

Adicionalmente, en el informe se presentan 8 perfiles geológicos de detalle elaborados a partir de las columnas estratigráficas de los sondajes. Cuatro de ellos han sido elaborados por autores como Fock (2011), Díaz del Río, et al. (1972), EDRA (1997) y los otros cuatro han sido realizados por ICASS (2014).

La calidad de la información es buena y el análisis geológico se ha realizado con datos existentes.

- A_REF.091:

Igsa Consultores, Pramar Ambiental Consultores e Ingeniería Dictuc. (2004-2006). EIA Cambios y mejoras en la operación minera en Salar de Atacama. Realizado para SQM Salar S.A. (Se incluyen la EIA y las 4 Adendas).

En la EIA se incluye información estratigráfica de calicatas realizadas para el estudio en el núcleo del salar.

Además, el presente estudio contiene una extensa recopilación de información desde los trabajos realizados por la empresa Hydrotechnica (1988) y también perforación de pozos en el borde este del salar y calicatas construidas en el núcleo del mismo.

La calidad de la información es buena y los datos corresponden a existentes y nuevos.

- A_REF.092:

Golder Associates. (2017). Anexo IV.1 Modelo Hidrogeológico. Modelo Hidrogeológico conceptual y Numérico para el Acuífero de Monturaqui-Negrillar-Tilopozo. EIA Proyecto Monturaqui. Minera Escondida.

En el Anexo IV.1 del EIA realizada por Golder (2017) se presenta un análisis geológico del área de Monturaqui-Negrilla-Tilopozo.

El estudio incluye un mapa geológico (SW, 2016a), otro de estructuras y 5 perfiles geológicos transversales y longitudinales al área de estudio elaborados por SW (2016a). Además, se incluye 4 perfiles geológicos realizados a partir de la interpretación de perfiles de resistividad.

La calidad de la información es buna y en general los datos corresponden a datos existentes.

- A_REF.093:

SGA. Solución en Gestión Ambiental (2015). Adenda 5. Anexo I. Estudio Hidrogeológico y modelo numérico sector sur del Salar de Atacama. EIA Proyecto modificaciones y mejoramiento del sistema de pozas de evaporación dólar en el Salar de Atacama. Rockwood Lithium.

En el Anexo 1 de la Adenda 5 se incluye un mapa geológico que se presenta en el proyecto corresponde a la Carta Geológica N° 54. Hoja de Toconao de Ramírez y Gardeweg (1982). Además, se presenta un detalle de las costras salinas del Salar de Atacama (Moraga et al., 1974) y una equivalencia de las costras salinas entre Ramírez y Gardeweg (1982) y Moraga et al. (1974).

Además, se han elaborado 7 perfiles geológicos transversales y longitudinales al Salar de Atacama.

En el marco de la EIA presentada se han realizado un total de 59 perforaciones (34 piezómetros someros, 13 piezómetros, 4 pozos y 8 multipiezómetros, de los cuáles se realiza una descripción detallada que se presenta en el Apéndice C del Anexo 1.

La calidad de la información es buena ya que los perfiles geológicos son de detalle y las perforaciones presentan las coordenadas de ubicación, así como información estratigráfica. Los datos corresponden a nuevos y existentes.

- A_REF.029:

CPH Consultores y asociados S.A. (2017). Adenda III Anexo 5. Estudio Hidrogeológico del Salar de Atacama. Modelo Conceptual. Proyecto SLM NX Uno de Peine Rev.0. EIA Planta de Producción de Sales de Potasio. Realizado para Minera SLM NX Uno de Peine.

El estudio hidrogeológico contenido en la EIA presentada por La Minera SLM NX Uno de Peine se ha realizado a partir de la información recopilada en las EIA de SQM y Rockwood y también, de otros antecedentes históricos.

Además, desde el año 2007 se han perforación numerosos pozos de exploración dentro de los límites de la concesión minera, que se encuentra en el borde oeste del salar. A partir de la información estratigráfica de los pozos de exploración perforados en la zona de concesión minera han elaborado 6 perfiles geológicos.

Adicionalmente perforó 3 sondajes (pozo Algarrobilla, pozo P5 y P6) en el borde este del salar. Del pozo Algarrobilla existe información estratigráfica y de calidad química, mientras que del pozo P5 y P6 sólo existen perfiles geofísicos.

Además, a partir de la información de perfiles geofísicos y la información estratigráfica de los pozos CORFO (Chi 69-355, 1977), CPH ha elaborado para la EIA 3 perfiles geológicos en el borde este del salar.

La calidad de la información es buena y en general los datos corresponden a datos existentes y nuevos.

- A_REF.081:

Hydrotechnica (1988). Evaluation of brine reserves in the Salar de Atacama. Salar de Atacama. Phase 3B. Hydrological Investigations. Volume I. Report Text. 5.1076/R7. Minsal Ltda. Santiago de Chile.

Hydrotechnica realizó un estudio hidrogeológico en el núcleo del Salar de Atacama en el que se realizaron ensayos de bombeo, estudios de evaporación con lisímetros entre otros. En los anexos se presentan columnas litológicas de al menos 38 pozos y que, además, contienen perfilajes con sondas: sonda neutrón (a partir de la cual se determina la porosidad total), gamma natural, temperatura, densidad, entre otros.

Los pozos son de la propiedad de Minsal. La calidad de la información es buena y la información que se presenta corresponde a datos nuevos.

Valoración general sobre los antecedentes disponibles de geología

En general, la información existente se concentra en el borde este, sur del borde oeste y sur del Salar de Atacama (Monturaqui-Negrillar-Tilopozo). En estos sectores la información es de buena calidad. Los datos disponibles provienen principalmente de estudios de EIA. En general existen varios perfiles geológicos en estos sectores y columnas estratigráficas de pozos y sondajes.

Sin embargo, en el núcleo y en la parte norte del salar (sector San Pedro) existe poca información estratigráfica a partir de sondajes. En el núcleo los datos que se disponen corresponden a registros de los años 1987-1988 (Hydrotechnica, 1988). De esta forma, en el sector de San Pedro de Atacama el acuífero deberá ser caracterizado con la información que se presenta en los expedientes de derechos de agua.

Los mapas geológicos disponibles en la Cuenca del Salar de Atacama son suficientes para elaborar una cartografía base y construir el modelo hidrogeológico.

2.2 Análisis y revisión de la geomorfología

La caracterización geomorfológica de la cuenca se ha realizado principalmente a partir de los antecedentes que se exponen a continuación:

- A_REF.075:

Díaz del Río, Bonilla Parra y Peralta Toro (1972). Geología de superficie, sub-superficie y geoquímica del Salar de Atacama. Departamento de recursos hidráulicos Corfo.

En este informe se describe las unidades morfoestructurales que delimitan la cuenca del Salar de Atacama y como se distribuye la red fluvial de la misma. Se caracteriza el relieve y la red de drenaje.

La calidad de la información geomorfológica que se presenta es buena y los datos que se utilizan en el estudio corresponden a información existente. Además, en el estudio se incluye la estratigrafía y un mapa de ubicación de al menos, una veintena de sondajes y pozos. No obstante, ni el mapa de ubicación ni el mapeo de los sondajes presentan coordenadas y por lo tanto la calidad de la información en este sentido es regular. Los registros de estos pozos corresponden a nuevos y existentes.

- A_REF.093:

SGA. Solución en Gestión Ambiental (2015). Adenda 5. Anexo I. Estudio Hidrogeológico y modelo numérico sector sur del Salar de Atacama. EIA Proyecto modificaciones y mejoramiento del sistema de pozas de evaporación dólar en el Salar de Atacama. Rockwood Lithium.

En este capítulo se describen las características geomorfológicas del Salar de Atacama, empezando por la caracterización geomorfológica regional de la cuenca, y posteriormente describiendo la geomorfología local detallando los diferentes componentes del relieve y geoformas identificables en el terreno. Esta descripción comprende los elementos de la geomorfología estructural del área como son las cordilleras.

Geomorfológicamente los Andes centrales del Norte de Chile se pueden dividir en cinco elementos morfotectónicos diferentes (Flint et al., 1993 citado en Mc. Cartney 2001): 1) Cordillera de las Costa; 2) Depresión Central; 3) Cordillera de Domeyko; 4) Depresión Preandina y 5) Cordillera de los Andes.

A escala local, las subunidades geomorfológicas existentes en el área de interés, nombradas de oeste a este, son las siguientes: 1) Llano de la Paciencia; 2) Cordillera de la Sal; 3) Glacis detrítico del borde del Salar; 4) Depresión de Atacama; 5) Cordón de Lila y 6) Cordillera prealtiplánica.

La información es de buena calidad y los datos corresponden a existentes.

- Información pública descargada de internet:

La geomorfología de la cuenca, como el relieve, las características morfológicas de la cuenca, etc. así como los límites geográficos de la misma se pueden caracterizar mediante imágenes satelitales. Las zonas protegidas, como acuíferos, bofedales, sitios Ramsar, santuarios de la naturaleza, etc., que es información de carácter público y que se incluye en esta área temática, puede ser descargada de las páginas web de la DGA. La información descargada de la DGA, así como los DEM (*Digital Elevation Model*) utilizados se incorporarán en el proyecto GIS. También se dispone de la red hidrográfica de la IGM.

Valoración general sobre los antecedentes disponibles de geomorfología

A partir de toda la información disponible y analizada se concluye que, en general, las descripciones geomorfológicas y la información descargada de la DGA y otras entidades, es suficiente y de buena calidad. Además, abarca toda el área de estudio.

2.3 Análisis y revisión de la meteorología

Los antecedentes más relevantes que se han consultado para llevar a cabo el análisis de la meteorología de la cuenca del salar de Atacama son los que se presentan a continuación.

- A_REF.015:

Peña, Humberto; et al. (1986). Balance Hidrológico Nacional, II Región. DGA.

Este estudio contiene una recopilación de la estadística de precipitación, caudales, temperatura y evaporación de tanque tipo A en la región de Antofagasta. El periodo escogido para representar los

valores medios es de 1961 a 1981. Son de interés las relaciones que plantea el estudio sobre la variación de la precipitación y la evaporación potencial en función de la altura.

La calidad de la información es buena y presenta datos nuevos y existentes.

- A_REF.029-2:

CPH Consultores y Asociados S.A. (2008). Adenda 2: EIA Planta de Producción de sales de potasio SLM NX uno de Peine. Modelo numérico.

La segunda adenda de este EIA presenta la precipitación anual y la evaporación potencial en las estaciones Chaxas y Salar de SQM, junto con el registro de precipitación en 5 estaciones públicas entre los años 1975 a 2009. Estas estaciones son relevantes, ya que permiten caracterizar zonas del salar que no tienen instaladas estaciones meteorológicas cuyos datos sean de acceso público.

La calidad de la información es buena y presenta datos nuevos dentro del salar, así como datos existentes en estaciones públicas.

- A_REF.034:

Houston, John (2006). Variability of precipitation in the Atacama Desert: its causes and hydrological impact. International Journal of Climatology 26.

Esta publicación analiza la precipitación a escala regional del desierto de Atacama, usando 27 estaciones meteorológicas públicas, con un periodo de registro que va desde 1977 al año 2000. El análisis permite generar un límite entre las áreas dominadas por precipitaciones de invierno y de verano. Las precipitaciones de verano tienen su origen el Amazonas, mientras que las precipitaciones de invierno provienen del océano Pacífico. También se demuestra que durante años con el fenómeno del niño suelen registrarse precipitaciones de invierno más intensas, mientras que con el fenómeno de la niña se registran años con precipitaciones de verano más intensas.

La calidad de la información es buena y presenta datos existentes en estaciones públicas.

- A_REF.035:

Houston, John (2006). Evaporation in the Atacama Desert: An empirical study of spatio-temporal variations and their causes. International Journal of Hydrology 330.

La publicación se enfoca en la determinación de la evaporación potencial a escala regional para el norte de Chile. Para lograr este objetivo se utilizan mediciones de evaporación de tanque en 11 estaciones meteorológicas de la DGA. Las estaciones se ubican en el norte de Chile y presentan registros entre los años 1977 a 1991. La estadística se complementa con datos de evaporación recolectados durante 15 meses entre los años 1987 y 1988 por Hydrotechnica (1987, 1988). Los resultados muestran que la evaporación potencial es una función de la temperatura máxima, de la altura y de la densidad del fluido evaporado. El estudio también entrega una curva normalizada con

la distribución de la evaporación mensual. Finalmente se indica que la nubosidad registrada durante el verano en las zonas altas mitiga la evaporación. Esta mitigación coincide con el periodo de verano, en que pueden ocurrir las precipitaciones más significativas.

La calidad de la información es buena y utiliza datos existentes.

- A_REF.041:

GCF Ingenieros Limitada (2010). Actualización de la evaluación de la disponibilidad de recursos hídricos para constituir derechos de aprovechamiento en las subcuencas afluentes al salar de Atacama. Región II. DGA.

Este estudio presenta una subdivisión actualizada de las subcuencas aportantes al Salar de Atacama. La cuenca del salar queda dividida en 13 subcuencas, las que en conjunto presentan un área total igual a 17.257 Km². La subdivisión se realizó a partir de criterios topográficos, hidrogeológicos, hidrográficos y ambientales, dejando de lado características administrativas y de uso de suelos. Por otro lado, se presenta la estadística de 53 estaciones meteorológicas públicas (entre los años 1970 a 2009) distribuidas en el norte de Chile y una metodología para rellenar la estadística mediante la generación de series sintéticas en base a modelos estocásticos. También se presenta la relación entre la evaporación potencial mensual con la altura a la que se ubica la estación meteorológica.

La calidad de la información es buena y presenta datos existentes en estaciones públicas.

- A_REF.092:

Golder Associates. (2017). Anexo IV.1 Modelo Hidrogeológico. Modelo Hidrogeológico conceptual y Numérico para el Acuífero de Monturaqui-Negrillar-Tilopozo. EIA Proyecto Monturaqui. Minera Escondida.

En la línea base hidrológica del EIA del Proyecto Monturaqui se describe la cuenca de Monturaquí-Negrilla-Tilopozo. Esta cuenca se ubica en la parte sur del Salar de Atacama. En el estudio se presenta la precipitación media anual en 29 estaciones, de las cuales 6 pertenecen a la Minera Escondida (MEL). Las estaciones se ubican en la parte alta de la cuenca del río Loa, en Monturaqui y sus márgenes y en el salar de Punta Negra y sus márgenes.

El registro de las estaciones públicas va desde el año 1975 al 2016, mientras que la extensión del registro de las estaciones privadas varía entre 3 y 18 años. Estos datos son relevantes, ya que presentan mediciones de precipitación hacia el sureste de la cuenca, zona que presenta un número menor de estaciones meteorológicas con registros públicos.

Respecto de la evaporación, el estudio presenta la estadística de 10 estaciones meteorológicas, de las cuales 8 son estaciones públicas (con registros desde 1969 en adelante), 1 pertenece a MEL (registros entre el 2000 y el 2005) y 1 a Rockwood Lithium (registro de 1999 a 2013). Las últimas

dos estaciones mencionadas aportan información relevante para caracterizar la evaporación en la parte baja de cuenca.

La calidad de la información es buena y presenta datos existentes en estaciones públicas y datos nuevos en estaciones privadas.

- A_REF.093:

SGA. Solución en Gestión Ambiental (2015). Adenda 5. Anexo I. Estudio Hidrogeológico y modelo numérico sector sur del Salar de Atacama. EIA Proyecto modificaciones y mejoramiento del sistema de pozas de evaporación dólar en el Salar de Atacama. Rockwood Lithium.

En este estudio se presenta un análisis de la precipitación basado en 9 estaciones con registros públicos y tres estaciones privadas. Las estaciones públicas se ubican en la cuenca aportante al Salar de Atacama con registro entre los años 1974 y 2013. Las 3 estaciones privadas se ubican dentro del salar con registros a partir del año 1990. A partir de estos datos se genera una relación entre precipitación y altura, junto con curvas isoyetas sobre el salar. Se utilizan las curvas isoyetas del Balance Hídrico de Chile (1986) en el sector oriente del salar, ya que las estaciones disponibles se ubican en el sector este del salar.

El estudio presenta la estadística de evaporación en 8 estaciones meteorológicas, de las cuales 5 son estaciones públicas con registros desde 1963 en adelante, 1 pertenece Rockwood con registros entre el 2002 y el 2013, y 2 estaciones pertenecientes a SQM, cuyo registro va de 1999 a 2013.

La calidad de la información es buena y presenta datos existentes en estaciones públicas y privadas, junto con datos nuevos en las estaciones privadas Planta SCL, Salar (SQM) y Chaxas (SQM).

Valoración general sobre los antecedentes disponibles de meteorología

En general, existe una cobertura suficiente de estaciones meteorológicas en el sector oriental de la cuenca del Salar de Atacama. En este sector se registran las mayores precipitaciones de la cuenca. Los registros en este sector pertenecen a estaciones públicas con más de 30 años de datos y son de alta relevancia para el estudio. Respecto del sector del núcleo del salar y la parte occidental, no se cuenta con estaciones meteorológicas de carácter público. Aunque sí existen estaciones privadas de terceros, con registros que permiten estimar la precipitación en estos sectores. Adicionalmente, mediante los antecedentes consultados es posible establecer una relación entre la altura, la evaporación potencial y la temperatura, por tanto, la información es suficiente y de alta relevancia para el estudio.

2.4 Análisis y revisión de la hidrología

Los antecedentes más relevantes que se han consultado para llevar a cabo el análisis hidrológico de la cuenca del Salar de Atacama se presentan a continuación.

- A_REF.006:

Mardones, Leonardo (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.

En este estudio se estima la evaporación desde el nivel freático del salar. El trabajo muestra los resultados obtenidos de mediciones de evaporación realizadas con 23 lisímetros distribuidos dentro del salar. Se definieron 16 zonas de evaporación diferentes a partir de las mediciones de los lisímetros, la información de la profundidad del nivel freático, la densidad del agua, los tipos de sedimentos y las características de la costra salina. Las zonas del salar, que en total suman 2.703 km², presentan tasas variables de evaporación que fluctúan entre 2 mm/año (0,005 mm/día) y 5,8 mm/día y en total la evaporación desde el nivel freático en el salar es igual a 5.400 l/s aproximadamente. La descarga por evaporación ocurre principalmente en la franja lateral que rodea al núcleo por los bordes norte, este y sur del salar (zona marginal), ya que en este sector ocurre la mayor recarga al sistema y presenta afloramientos debido a la interacción entre el agua dulce y la salmuera.

La calidad de la información es buena y presenta datos nuevos.

- A_REF.015:

Peña, Humberto; et al. (1986). Balance Hidrológico Nacional, II Región. DGA.

El estudio presenta una relación entre la densidad de la salmuera y la evaporación media diaria. Esta relación es de interés, ya que permite estimar la disminución de la evaporación en función de la concentración (densidad) de la salmuera. Por otro lado, el estudio detalla las extracciones de caudales superficiales que ocurren en la cuenca. Finalmente, el estudio estima la evaporación del salar a partir de mediciones de profundidad del nivel freático y datos de evaporación obtenidas en lisímetros (Mardones, 1985). A partir de estos datos se estima la evaporación desde el salar, obteniendo un valor aproximado de 5.000 l/s.

La calidad de la información es buena y presenta datos nuevos respecto de la evaporación en función de la concentración de la salmuera y datos existentes en lisímetros.

- A_REF.022:

Kampf, Stephanie; et al. (2005). Evaporation and land surface energy budget at the salar de Atacama, northern Chile. Journal of Hydrology 310.

En este artículo se relaciona la evaporación en la superficie del salar con el tipo de costra salina, la profundidad de la superficie libre subterránea, el clima y los flujos de energía en la superficie del suelo. Según se describe, el Salar de Atacama contiene un amplio rango de tipos de costras salinas.

La evaporación se estima para cada tipo de suelo realizando mediciones de campo con estaciones de medición de la covarianza de remolinos (*Eddy covariance*) y flujos de energía. Se indica que la evaporación del núcleo salino de halita se encuentra bajo el límite de detección de esta técnica, que es de 0,1 mm/día, la cual según Mardones (1986) sería de 2 mm/año (0,005 mm/día). Así, el estudio señala que la costra en el núcleo del salar corresponde a una barrera impermeable para la evaporación. Finalmente, el artículo concluye señalando que la morfología de las costras salinas cambia dramáticamente la respuesta de la evaporación frente a las mismas condiciones climáticas y de profundidad del agua subterránea. Lo anterior es ejemplificado con una medición de campo en que el nivel freático se encuentra en la superficie del suelo y presenta una evaporación de solo 0,1 mm/día, lo que se explica por la presencia de una costra salina de 1 cm de espesor que se ubicaba sobre el suelo.

La calidad de la información es buena y presenta nuevas mediciones.

- A_REF.036:

Kampf, Stephanie; Tyler, Scott (2006). Spatial characterization of land surface energy fluxes and uncertainty estimation at the salar de Atacama, northern Chile. Advances in Water Resources 29.

El artículo da cuenta de la distribución espacial del flujo de energía y la evaporación en el Salar de Atacama, calculados a partir de imágenes satelitales (ASTER). La clasificación espacial del salar fue realizada usando mediciones de evaporación, balances de energía y clasificaciones conocidas del tipo de suelo. El estudio estima la evaporación en el salar usando diferentes metodologías. La estimación de evaporación basada en mediciones de campo entrega un rango de evaporación que va de 1.600 a 4.200 l/s. Por otro lado, se hicieron estimaciones usando distribuciones del flujo de calor latente, que entregan evaporaciones mayores a 20.000 l/s en el salar.

Los resultados de este estudio se explican en parte porque los modelos de balance de energía sobrestiman la evaporación en la costra de halita (núcleo del Salar). Este sector no debería tener evaporación medible. El estudio concluye indicando que los flujos de calor latente no pueden estimarse con suficiente precisión como para evaluar las pérdidas por evaporación en toda el área del salar. Los errores podrían ser de 1 mm/día en la evaporación y en un ambiente de salar, la evaporación medida es frecuentemente menor que este valor. Considerando lo anterior, la calidad de la información es regular y presenta datos nuevos y existentes.

- A_REF.035:

Houston, John (2006). Evaporation in the Atacama Desert: An empirical study of spatio-temporal variations and their causes. International Journal of Hydrology 330.

El estudio indica que el área asociada a ríos y sus zonas ribereñas ocupan un 1 % del área de la cuenca. Por otro lado, la publicación muestra un análisis de imágenes satelitales que le permite definir las zonas de superficie libre, las áreas del salar con mayor intensidad de evaporación, con menor intensidad de evaporación y las áreas sin evaporación.

La calidad de la información es buena y presenta datos nuevos.

- A_REF.092:

Golder Associates. (2017). Anexo IV.1 Modelo Hidrogeológico. Modelo Hidrogeológico conceptual y Numérico para el Acuífero de Monturaqui-Negrillar-Tilopozo. EIA Proyecto Monturaqui. Minera Escondida.

En este EIA se determina la recarga considerando sólo aquellos eventos de precipitación que superan un umbral de 21 mm. Se considera que dos eventos de precipitación son diferentes entre sí cuando se distancian por más de 8 días sin un registro de lluvia. Para determinar el umbral de 21 mm se realizó un análisis estadístico sobre 30 series sintéticas de 100 años a escala temporal horaria, en conjunto con observaciones de niveles piezométricos en el Salar de Atacama. Los niveles observados muestran 4 a 5 recuperaciones cada 10 años. Como resultado de esta metodología se estima que la recarga del sector Tilopozo es entre un 11 y 16 % de la precipitación total, lo que equivale a 640 y 930 l/s respectivamente. Por otro lado, en el estudio se generan curvas de evaporación desde el nivel freático somero a partir de mediciones realizadas con lisímetros y domos en 3 tipos diferentes de costras salinas del sector Tilopozo.

La calidad de la información es buena y presenta datos de mediciones nuevas de lisímetros y domos.

- A_REF.093:

SGA. Solución en Gestión Ambiental (2015). Adenda 5. Anexo I. Estudio Hidrogeológico y modelo numérico sector sur del Salar de Atacama. EIA Proyecto modificaciones y mejoramiento del sistema de pozas de evaporación dólar en el Salar de Atacama. Rockwood Lithium.

En este estudio se mediciones de evaporación desde el nivel freático realizadas con domos en el Salar de Atacama. Se midieron 23 puntos distribuidos a lo largo del salar, diferenciando si la evaporación ocurre desde salmuera o bien desde agua dulce. Por otro lado, se levantó la estadística de caudales en 5 estaciones fluviométricas y 5 estaciones de aforos sistemáticos pertenecientes a la DGA. También se reportan los caudales medios de mediciones realizadas en cauces afluentes al

borde este del salar. Finalmente se prestan los resultados de unas campañas de aforo realizadas en el sistema lacustre Peine y en el sector de Tilomonte.

La calidad de la información es buena y presenta datos nuevos de evaporación desde el nivel freático realizados con domos.

Valoración general sobre los antecedentes disponibles de hidrología

En general existen extensas mediciones de evaporación desde el nivel freático a lo largo del salar. Estas mediciones se han realizado con una serie de técnicas, compuestas por lisímetros, domos, covariancia de remolinos e imágenes satelitales. Entre las mediciones realizadas destacan por su importancia las mediciones con lisímetros realizadas por Mardones (1986). Este antecedente es el más importante respecto de la hidrología del sector, ya que sus mediciones permiten estimar las descargas por evaporación desde el nivel freático del salar. La mayoría de los estudios posteriores se basan en estas mediciones o bien complementan los datos con nuevas mediciones. Respecto de la estadística de caudales, el estudio de SGA (2013) presenta un adecuado resumen de la información pública disponible, así como aforos puntuales. Considerando los anterior, se puede mencionar que la información es suficiente y de alta relevancia para el estudio.

Se debe mencionar que los numerosos estudios en que se presenta una estimación de la evaporación desde el salar, se realiza de forma implícita un balance hídrico simplificado en régimen natural. Lo anterior se explica, ya que la cuenca es endorreica y por tanto toda la recarga al acuífero, que no es evaporada en las cuencas aportantes, debe evaporarse en el salar (bajo un régimen natural sin considerar cambios en el almacenamiento).

2.5 Análisis y revisión de la geofísica

Para recopilar la información geofísica del Salar de Atacama se han podido consultar varias fuentes de información. En la Figura 2-1 se presenta un mapa con la distribución espacial de la traza de los perfiles geofísicos que se han llevado a cabo en el área de estudio. En este se diferencian los perfiles que se disponen en formato digital, de los que no se dispone. A continuación, se muestran las fuentes más relevantes:

- A_REF.059:

CORFO-ONU-DGA-OCC (1974). Investigación de Recursos Hidráulicos en el Norte Grande (CHI/69/535).

En este informe se incorporan 2 perfiles gravimétricos y la interpretación con respecto al basamento la cuenca. Estos dos perfiles no se han podido representar en el proyecto SIG que se está construyendo debido a que las estaciones no tienen coordenadas.

Los registros de geofísica son nuevos. Desde el punto de vista del objetivo del proyecto, la calidad de la información es regular.

- A_REF.027:

Muñoz N. y Townsend F. (1997). Estratigrafía de la Cuenca Salar de Atacama. Resultados del Pozo exploratorio Toconao-1. Implicancias Regionales. Universidad Católica del Norte. Departamento de Ciencias Geológicas. VIII Congreso Geológico Chileno. Actas Vol. I. Sesión Temática 3. Páginas 555-558.

En este artículo de investigación, se realiza una interpretación de la línea sísmica ZA010 realizada por ENAP a partir de la columna estratigráfica reconocida en el pozo exploratorio Toconao-1. Pozo que tiene 5.425 m de profundidad y que se perforó el objetivo de explorar hidrocarburos en la zona.

Los datos que se presentan en este documento corresponden a antecedentes de los años 1990 y por lo tanto, los datos son existentes. La calidad de la información es buena.

- A_REF.010:

Muñoz N., Charrier R., Jordan T. (2002). Interactions between basement and cover during the evolution of the Salar de Atacama Basin, Northern Chile. Revista geológica de Chile. Vol. 29. N° 1. P. 55-80.

En este artículo de investigación se trabajó en la interpretación del techo del basamento y la relación de éste con las grandes estructuras que se reconocen en la cuenca, basándose en perfiles de sísmica de reflexión. En total se interpretaron 6 perfiles de sísmica de reflexión y además, se incluye la estratigrafía del pozo Toconao-1, que se localiza en el núcleo del Salar de Atacama. Los datos

corresponden a existentes y la calidad de la información es regular debido a la baja resolución de los perfiles sísmicos.

- A_REF.029-2:

Geodatos (2004). Estudio geofísico de transiente electromagnético TEM. Margen oriental Salar de Atacama. Antofagasta II Región de Chile. Cominor Ingeniería y Proyectos S.A. Adenda 2. Anexo 5.2. Proyecto Planta de Producción de Sales de Potasio. SLM NX Uno de Peine.

En el presente trabajo se ejecutaron 32 perfiles TEM en el margen oriental del Salar de Atacama, de entre 3 y 15 estaciones cada perfil, orientados longitudinalmente de este a oeste. No se tienen los perfiles originales de este proyecto, pero sí se presenta una interpolación de la resistividad del acuífero del borde este, la potencia de éste a lo largo de toda la superficie ensayada y finalmente, la profundidad del techo del basamento, realizada a partir de todos los registros de geofísica de cada estación.

Los datos son nuevos y la calidad de la información es regular debido a que la resolución de las imágenes donde se muestran las interpolaciones no es buena y no se pueden observar bien los datos.

- A_REF.029-2:

Geodatos (2008). Estudio geofísico de transiente electromagnético TEM. Sector Borde Oeste Salar de Atacama. Recopilación años 2004-2006-2007. Comuna: San Pedro de Atacama. Provincia: El Loa-II Región. Cominor S.A. Adenda 2. Anexo 5.3. Proyecto Planta de Producción de Sales de Potasio. SLM NX Uno de Peine.

Geodatos incluye en este trabajo una recopilación de perfiles TEM de los años 2004, 2006 y 2007. En total existen más de 30 perfiles TEM, que cubren la parte centro y sur del borde oeste del Salar de Atacama, dispuestos de forma transversal y longitudinalmente al salar. En el documento se presentan los perfiles de geofísica (modelo de capas y *smooth model*) en formato pdf.

Los datos corresponden a nuevos, ya que en ningún otro documento se han presentado los resultados. La calidad de la información es buena.

- A_REF.029-2:

Geodatos (2011). Estudio geofísico de transiente electromagnético TEM y NanoTem. Proyecto: Soncor. Salar de Atacama, II Región. Adenda 2. Anexo 4. Proyecto Planta de Producción de Sales de Potasio. SLM NX Uno de Peine.

En este estudio se realizaron 14 perfiles NanoTEM de entre 3 y 4 estaciones y también, 5 estaciones TEM. Los perfiles NanoTEM tienen una orientación este-oeste y están dispuestos a un lado y otro

de las lagunas del sistema Soncor (borde este del Salar de Atacama). Además, en el informe se incluye una interpretación geológica de las resistividades de los perfiles NanoTEM.

Los perfiles NanoTEM se presentan en formato pdf en modelo de capas y *smooth model*, mientras que de cada estación TEM se presenta la variación de la resistividad en función de la profundidad.

Los datos corresponden a nuevos. La calidad de la información es buena.

- A_REF.091-2:

PRAMAR Ambiental Consultores (2006). Adenda II. EIA Cambios y mejoras en la operación minera en Salar de Atacama. SQM Salar S.A.

En la Adenda II, se incluyen unos perfiles geofísicos realizados por Geodatos (2005), en el que se integran 3 perfiles geofísicos realizados a partir de 84 estaciones de medida transiente electromagnética (TEM). Los perfiles TEM se realizaron en el norte del Salar de Atacama (L2 y L1) y en el borde este del mismo (Q-3). No se dispone del informe original de Geodatos (2005) pero se tienen los perfiles insertados como imágenes en la Adenda II. Del perfil Q-3 se dispone de la correlación estratigráfica del perfil TEM, realizada por Pramar Ambiental (2006).

La información corresponde a datos nuevos. La calidad de la información es regular debido a la baja resolución de los perfiles.

- A_REF.092:

Golder Associates (2017). Anexo IV.1 Modelo Hidrogeológico. Modelo Hidrogeológico conceptual y Numérico para el Acuífero de Monturaqui-Negrillar-Tilopozo. EIA Proyecto Monturaqui. Minera Escondida.

Minera Escondida realizó una evaluación de 125 perfiles de diversas técnicas geofísicas disponibles en el área circundante a su proyecto Monturaqui. Dicha evaluación estuvo enfocada en reconocer el tipo de método geofísico empleado en la elaboración de los perfiles y la calidad de la información. Dado el importante volumen de información geofísica y la multiplicidad de fuentes, en 2016 MEL encargó a SWS-AguaEx (SWS-AguaEx, 2016) un estudio enfocado en la validación, integración y reinterpretación de la base de datos geofísica disponible. De esta forma, se seleccionaron 94 perfiles para realizar la reinterpretación (Tabla 2-1). A partir de la reinterpretación SWS-AguaEX (2016) construyó un modelo geofísico 3D de bloques. De todos los perfiles geofísicos disponibles solo se presentan en el proyecto los que corresponden al F2, F1 y J1, situados próximos a la Zona Marginal del Salar de Atacama (al sur del Salar de Atacama, en el contacto entre el núcleo del salar y el borde norte del acuífero MNT). En los perfiles de resistividad que se presentan se proyecta el límite de la interfase salina.

Empresa geofísica	Año	Sector	Método	Nro. Perfiles
Macal Geoscience	1993 - 1994	Tilopozo y Callejón	TEM	5
Quantec	1997	Negrillar, Roca Volcánica y Monturaqui	TEM	8
Macal Geoscience	1998 - 2001	Tilocalar - Callejón	TEM	13
Zonge	1998	Callejón y Tilopozo	TEM y NanoTEM	9
Geodatos	2004	Margen oriental Salar de Atacama	TEM	8
Wellfield Services Ltda.	2006	Tilopozo	ERT	2
Zonge	2007	Roca Volcánica y Monturaqui	AMT	4
Geodatos	2008	Callejón y Tilopozo	TEM	19
Wellfield Services Ltda.	2013	Callejón	MT	7
Wellfield Services Ltda.	2013	Callejón	Sísmica	6
Geodatos	2013	Callejón-Tilopozo-Tilocalar	TEM	12
SGA	2014	Tilopozo	TEM/MT/AMT	1
Total Perfiles Reinterpretados				94

Tabla 2-1: Resumen de información geofísica reinterpretada para el estudio de referencia.

Fuente: Golder Associates (2017).

- A_REF.093-5:

SGA. Solución en Gestión Ambiental. (2015). Adenda V. Anexo 1. Apéndice B. EIA Proyecto modificaciones y mejoramiento del sistema de pozas de evaporación dólar en el Salar de Atacama. Rockwood Lithium.

La geofísica que se incluye en SGA (2015) ha sido desarrollada por Geodatos (2013a, 2013b y 2014). Se ha integrado la información en un informe que corresponde al Apéndice B del Anexo 1 de la Adenda V. En este apéndice se integran 5 perfiles TEM y sobre la traza de éstos se han ejecutado 5 NanoTEM, en el sur del Salar de Atacama (sectores La Punta-La Brava), con un total de 145 estaciones TEM y 419 estaciones NanoTEM. La extensión de los perfiles tanto TEM como NanoTEM es del orden de 50 Km.

Además, en el sector Lagunas Sistema Peine se han realizado 4 perfiles TEM y 4 NanoTEM sobre la misma traza de los anteriores. El total de estaciones TEM son 122, mientras que las NanoTEM son 363. La extensión de los perfiles tanto TEM como NanoTEM es del orden de 40 Km.

También se han desarrollado estudios de geofísica en el sector de Tilopozo y Tilomonte. En este sector se han realizado 3 perfiles de geofísica (GRS-1, GRS-2 y GRS-3) que tienen 139 estaciones. La longitud de los perfiles cubre 40 Km de extensión.

En el informe presentado por SGA (2015) se ha validado la resistividad obtenida en los perfiles se con columnas estratigráficas de varios sondajes que se encuentran próximos a las estaciones.

En el informe no se presentan los informes originales de Geodatos (2013a, 2013b y 2014), pero sí los perfiles geofísicos interpretados.

Los datos que se presentan corresponden a nuevos y la calidad de la información es buena.

- A_REF.063-2

Geodatos - SAIC (2015). Estudio geofísico para la modelación hidrogeológica del Salar de Atacama. Estudio geofísico mediante MT, GRAV y TEM. Geofísica Salar de Atacama. Región de Antofagasta. Dirección General de Aguas. SIT N°368.

La DGA contrató a Geodatos para realizar un estudio geofísico en el Salar de Atacama. En total se realizaron 27 perfiles TEM y NanoTEM, de los cuáles, 1 perfil TEM y 1 NanoTEM se realizaron transversalmente al salar (en sentido este-oeste), en la parte norte del núcleo. El resto de los perfiles se ejecutaron en el borde este del salar. En el borde este se realizaron tanto perfiles longitudinales (de dirección norte-sur) como transversales (este-oeste). Además, se desarrollaron 2 perfiles gravimétricos (LG1 y LG2) transversales al núcleo del salar, de dirección oeste-este, que cruzan todo el salar desde el borde oeste hasta el borde este.

Los datos que se presentan corresponden a nuevos y la calidad de la información es buena.

- A_REF.047:

ICASS LTDA. (2014). Análisis de los Mecanismos de Evaporación y Evaluación de los Recursos Hídricos del Salar de Atacama. Dirección General de Aguas (DGA) SIT N 137. Santiago, Chile.

En el presente estudio se presentan los perfiles TEM y NanoTEM realizados en 2014 en el borde este del salar y que se presentan en el estudio de Geodatos –SAIC (2015). Los resultados de la geofísica se presentan en el Anexo 3 del informe de ICASS (2014). ICASS realiza una interpretación geofísica de los perfiles TEM e identifica dos unidades saturadas, una superficial y otra profunda. En la unidad más profunda se observa la cuña salina.

Los datos que se presentan corresponden a existentes y la calidad de la información es buena.

- A_REF.038

Jordan T.E, Mpodozis C., Muñoz N., Blanco N., Panamont P., Gardew M. (2007). Cenozoic subsurface stratigraphy and structure of the Salar de Atacama Basin, northern Chile. Journal of South American Earth Sciences 23,122-146.

En el presente artículo de investigación se realiza una correlación estratigráfica de las líneas sísmicas, ejecutadas por ENAP, para comprender la evolución tectónica de la cuenca no marina del

Salar de Atacama. A partir de la interpretación de varios perfiles sísmicos se realizan mapas de espesores de las diferentes unidades estratigráficas identificadas en el núcleo del salar.

Los datos que se presentan corresponden a existentes y la calidad de la información es buena.

Valoración general sobre los antecedentes disponibles de geofísica

En general, la información existente en la Cuenca del Salar de Atacama está concentrada en los bordes este, oeste y sur del salar, así como en el sector donde se encuentra el acuífero MNT. Dichas áreas corresponden a zonas de explotación y/o exploración minera. En el núcleo del salar la información geofísica está acotada a perfiles de sísmica.

Cabe destacar que hacia el norte del Salar de Atacama no se encuentra caracterizado a partir de perfiles geofísica.

2.6 Análisis y revisión de la hidrogeología

Los antecedentes más relevantes que describen la hidrogeología de la Cuenca del Salar de Atacama son los que se presentan a continuación. Cabe destacar que los estudios suelen caracterizar una parte de la cuenca y son pocos los que realizan un estudio integrado a nivel de cuenca.

- A_REF.077:

CORFO (1978). Cubicación del yacimiento Salar de Atacama. Corporación de fomento de la producción. Subgerencia desarrollo agrícola industrial. Área química. Santiago, Chile.

A partir de la perforación de 7 sondajes (S-1, S-2, S-3, S-5, S-5, S-6 y H-1), 21 calicatas y exploraciones geofísicas mediante sísmica de refracción, se realiza un estudio de la parte sur del núcleo del salar, concretamente en el borde oriental de la Península de Chépica.

Mediante ensayos de laboratorio se determinó la porosidad efectiva y la porosidad total de los 20 primeros metros de evaporitas, mientras que a partir de pruebas sísmicas se determinó una porosidad total media representativa. La porosidad efectiva de los primeros 20 m está comprendida entre 9 y 13 %, mientras que la porosidad total se encuentra entre 11 y 15%.

La porosidad total media en profundidad (> 20 m), determinada a partir de pruebas sísmicas es de alrededor del 6%.

También se presentan valores de coeficiente de almacenamiento obtenidos mediante pruebas de bombeo con pozos de observación. Los pozos utilizados para las pruebas de bombeo corresponden a pozos de CORFO (1976) y del Instituto de Investigaciones Geológicas (1969). A partir de dichas pruebas de bombeo se extraen parámetros hidráulicos.

Teniendo en cuenta la información anterior se hace una cubicación del yacimiento y se obtienen datos de toneladas de KCL, para las profundidades de 30, 25 y 20 m de profundidad. El coeficiente de almacenamiento utilizado para el cálculo es variable, así como las concentraciones de potasio (K).

La calidad de la información para el proyecto es regular debido a que no se presentan coordenadas de los pozos ni un mapa de ubicación de éstos. No obstante, se puede utilizar dicha información como representativa del área del proyecto donde se realizaron los estudios, de la que sí se presenta la ubicación. Los datos corresponden a nuevos y existentes.

- A_REF.073-1 y A_REF.073-2:

Ayala L. & Cabrera G. (1985). Salar de Atacama Northern clay area experiment on movement of pond leakage. Final report. Stage I & Stage II. Vol.2. Sociedad Chilena de Litio Ltda.

Las dos referencias anteriores corresponden al mismo estudio, la A_REF.073-1 está asociada al *Stage I*, mientras que la A_REF.073-2 al *Stage II*. El objetivo de dichos estudios es conocer la

dirección de flujo subterráneo natural de la salmuera en la zona llamada *Northern Clay Area* o Área de Arcillas Norte. El mapa de ubicación del área del proyecto no es posible referenciarlo espacialmente con precisión porque no se dispone de coordenadas ni referencias de toponimia. No obstante, el área de estudio se encuentra al sureste del pueblo de San Pedro de Atacama.

Para llevar a cabo el estudio se perforaron 24 pozos de una profundidad entre 3 y 5 m. Además, se tomaron muestras de suelo en éstos durante la perforación para obtener el valor de la conductividad hidráulica, mediante ensayos de laboratorio. Finalmente, se midió el nivel freático posteriormente a la perforación y se tomaron muestras de salmuera.

Adicionalmente, se realizaron 4 pruebas de bombeo para determinar parámetros hidráulicos, como la permeabilidad y el coeficiente de almacenamiento. De esta forma, se obtuvieron valores de permeabilidad del orden de 0,13 cm/s (100 m/d), coeficientes de almacenamiento de 0,006 y 0,18, mientras que la porosidad efectiva de la zona superficial del salar fue de 0,09. También se incorporan valores de peso específico y viscosidad cinética de la salmuera obtenidos en muestras de laboratorio, así como valores del Número de Reynolds (Re).

Cabe destacar que en la referencia A_REF.073-2 se presentan los resultados de las pruebas de bombeo con gráficos y resultados de ensayos de trazador.

La calidad de la información para el proyecto es regular debido a que no se presentan coordenadas de los pozos ni un mapa de ubicación de éstos. No obstante, se puede utilizar dicha información como representativa del área del proyecto donde se realizaron los estudios. Los datos corresponden a nuevos.

- A_REF.047:

ICASS LTDA. (2014). Análisis de los Mecanismos de Evaporación y Evaluación de los Recursos Hídricos del Salar de Atacama. Dirección General de Aguas (DGA) SIT N 137. Santiago, Chile.

El objetivo general de este proyecto es desarrollar y aplicar una metodología que permita estimar la evaporación desde la superficie freática existente en el Salar de Atacama.

El trabajo se desarrolla a partir de una recopilación y revisión de antecedentes, levantamiento de información hidrológica e hidrogeológica, así como la instalación de 10 estaciones de monitoreo. Cada estación de monitoreo incluye un lisímetro, un pluviómetro, un sensor de temperatura y un piezómetro. Además, se realizó una campaña de instalación de una red complementaria de piezómetros. Finalmente, se establece un modelo conceptual y un balance hídrico del sistema.

La calidad de la información es buena y corresponde a registros nuevos y existentes. Los registros recopilados por ICASS (2014) se presentan en un SIG y en formato base de datos. Por lo tanto,

pueden ser fácilmente analizados e integrados en el análisis que se pretende realizar en la Etapa II del proyecto.

- A_REF.064:

División de Estudios y Planificación de la DGA (2016). Sistematización de información de los recursos hídricos del Salar de Atacama para un futuro plan de gestión. SDT N 392. Santiago, Chile.

El objetivo general del proyecto es establecer una síntesis de antecedentes generales hidrológicos e hidrogeológicos existentes sobre el Salar de Atacama. Como objetivos específicos se ha analizado la metodología aplicada para el cálculo del balance hídrico, realizado por Mardones (1986) y diferentes métodos para el cálculo de la evaporación. Para llevar a cabo dichos objetivos realiza una breve descripción del modelo conceptual. De esta forma, en el presente informe se presentan unas isopiezas del margen este del Salar de Atacama, (CORFO, 1977) y la zonificación hidrogeológica realizada por Mardones (1986). Además, se incluye una actualización del inventario de estaciones de monitoreo que dispone la DGA, como estaciones meteorológicas, lisímetros, domos y estaciones fluviométricas.

La calidad de la información es buena. Los datos que utiliza para el análisis corresponden a datos existentes.

- A_REF.091:

Igsa Consultores, Prammar Ambiental Consultores e Ingeniería Dictuc. (2004-2006). EIA Cambios y mejoras en la operación minera en Salar de Atacama. SQM Salar S.A.

El estudio hidrogeológico que se presentó en la línea base del EIA se apoya en estudios previos realizados por Hydrotechnica (1987) y datos de Minsal S.A. El estudio se fundamenta con una descripción geológica del núcleo y parte de la cuenca del Salar de Atacama, un estudio de los niveles donde se presenta un mapa de isopiezas del 12 de agosto de 1986 (Hydrotechnica, 1987) y una caracterización de la salmuera.

Además, detalla el funcionamiento hidrogeológico del Sistema Lacustre Soncor, Sistema Aguas de Quelana y Sistema Lacustre Peine. Se incluye una descripción del funcionamiento hidráulico de estos tres sistemas y un balance hídrico de cada uno.

El estudio de los sistemas lagunares se realiza mediante gráficas de evolución temporal del nivel de agua subterránea en pozos cercanos a dichas lagunas y caudales promedios mensuales estimados a partir aforos en aguas superficiales que recargan las lagunas.

En la EIA se establece que no existe relación entre el comportamiento hidráulico de las lagunas del borde este y el comportamiento hidráulico del núcleo del Salar de Atacama.

En este sentido, se determina que las operaciones de extracción de salmuera por parte de SQM en el núcleo del salar, solo pueden afectar a la descarga subterránea de las lagunas del borde este. Adicionalmente se añade que dicha descarga subterránea representa menos del 1% de los flujos de descarga en el balance hídrico, por lo que sus efectos son despreciables.

En el estudio hidrogeológico del EIA se determina la existencia de una zona de baja permeabilidad que separa el acuífero de agua dulce del acuífero de salmuera. Lo anterior se concluye a partir de la respuesta del nivel piezométrico del acuífero frente a un evento de precipitación registrado en la estación Chaxa entre los años 2000 y 2001 y de la observación de dos pozos, uno ubicado en el borde este (L5-3) y otro en el núcleo del salar (L5-4). El nivel piezométrico del primer pozo no registra un incremento, mientras que el segundo sí.

En el Anexo X de la Adenda II se presentan 3 secciones geológicas realizadas en el núcleo del salar, en el sector MOP del yacimiento. Además, se incluyen dos perfiles geofísicos TEM, interpretados geológicamente. En estos se diferencia diferentes tipos de salmuera en función de la conductividad eléctrica. Dichos perfiles son transversales al Salar de Atacama y caracterizan la hidrogeología del borde este y parte del núcleo del salar.

En este mismo documento se incluyen unas curvas isofreáticas y direcciones de flujo en el borde este del salar (Harza, 1978) y también otras elaboradas para el proyecto a partir de los pozos "L" y calicatas (C1-C7), puntos todos ellos ubicados en el borde este.

En el Anexo V de la Adenda II se incluyen los informes ejecutivos de producción de los pozos de que se perforaron en el borde este (pozo SP-1, S-5, SP-4, S-6 y Pozo Flamenco, etc.). Dichos informes contienen ensayos de bombeo, columnas estratigráficas, esquemas de habilitaciones, mapas de ubicación, etc. Además, se presenta el nombre del derecho de agua otorgado. En este mismo anexo se recopilan antecedentes de parámetros hidráulicos de otros estudios (DICTUC, 2003; HYDROTECHNICA, 1987, entre otros.).

En la Adenda III se establecen los pozos de monitoreo del Plan de Seguimiento Ambiental (PSA) de los sistemas lagunares, de la cuña salina y del núcleo del salar, así como sus coordenadas y la frecuencia de monitoreo.

La información contenida en la EIA de SQM constituye información de referencia. No obstante, la calidad de la información es regular porque la mayor parte de ella no puede incorporada en el presente proyecto porque no se presentan los datos. La información se sustenta a partir de registros existentes y nuevos.

- A_REF.092:

Golder Associates. (2017). Anexo IV.1 Modelo Hidrogeológico. Modelo Hidrogeológico conceptual y Numérico para el Acuífero de Monturaqui-Negrillar-Tilopozo. EIA Proyecto Monturaqui. Minera Escondida.

Golder (2017) establece una línea base hidrogeológica a partir de la caracterización geológica, de las unidades hidrogeológicas, niveles de agua, posición de la interfase salina en el sector terminal del acuífero, así como el tamaño de las lagunas y cuerpos de agua del sector Tilopozo.

La información utilizada corresponde a datos públicos de la DGA, SERNAGEOMIN, entre otros y datos provenientes de terceros como la Compañía Minera Zaldívar (CMZ), Rockwood, así como de las investigaciones que MEL ha desarrollado durante 20 años.

El área de influencia (AI) definida por MEL se describe como la extensión espacial donde pueden manifestarse los potenciales efectos de la actividad del Proyecto. Por el sur se corresponde con el campo de pozos de Monturaqui, mientras que por el norte limita con el sector Tilopozo. El límite este del acuífero está definido por una barrera hidráulica constituida por la propagación de unas fallas que han alzado sedimentos finos y finalmente, por el oeste, el acuífero está delimitado por rocas del basamento, de carácter impermeable.

Además, en la EIA se ha definido un área de estudio (AE), que adicionalmente incluye una parte del sur del Salar de Atacama, al norte de Tilopozo. Dicha área de estudio se corresponde con el acuífero Monturaqui-Negrillar-Tilopozo (MNT).

Con el objetivo de caracterizar la hidrogeología del acuífero MNT, MEL ha realizado una recopilación de antecedentes de perforaciones existentes en el área de estudio, de terceros (Rockwood y CMZ) y propias. Las perforaciones han sido ejecutadas desde los años 80' hasta la actualidad.

En total se han inventariado 348 pozos, de los cuáles, 32 corresponden a captaciones de aguas subterráneas (pozos de producción), 202 pozos de observación (para medir el nivel de agua), 112 punteras (pozos del sector Tilopozo, habilitados, con menos de 5 m de profundidad) y 2 piezómetros que contienen cuerdas vibrantes para medir la presión de poros (NED-2 y NED-3). Además, se han catastrado 36 calicatas. Según el estudio el 72% de las perforaciones han sido realizadas por MEL.

De los 348 pozos, 248 tienen información estratigráfica, 255 están habilitados, 102 pozos tienen información de ensayos hidráulicos, 318 presentan registros de nivel de agua y 70 de hidroquímica.

Cabe destacar que existen 9 perforaciones que se utilizan para controlar la posición de la cuña salina, 2 ubicados en el sector Callejón y 7 en el sector de Tilopozo. Por parte de MEL los pozos utilizados para la caracterización de la cuña son TP-1, TP-2 y TP-3, monitoreados desde 1997. En el informe se presentan perfiles de conductividad eléctrica y se establece la posición actual de la interfaz salina y la histórica, a partir del registro de datos en estos pozos.

Las principales conclusiones del funcionamiento del acuífero MNT son las siguientes:

El acuífero MNT es principalmente de carácter libre y la dirección de flujo general es sur-norte. La recarga se produce principalmente al sur y este de Monturaqui, mientras que la descarga se genera en el sector Tilopozo. El acuífero está formado por diferentes unidades hidrogeológicas asociadas al relleno sedimentario. En el sector Tilopozo se origina una interfase salina, cuando el acuífero entra en contacto con el núcleo del salar. En este punto, el agua aflora en superficie y recarga las lagunas y además, existe una descarga por evaporación.

La información de este EIA es de buena calidad para el objetivo del proyecto que se está desarrollando, se presentan datos originales en los Anexos del EIA y coordenadas de ubicación de pozos. Los datos corresponden a nuevos y existentes.

- A_REF.093:

SGA. Solución en Gestión Ambiental (2015). Adenda 5. Anexo I. Estudio Hidrogeológico y modelo numérico sector sur del Salar de Atacama. EIA Proyecto modificaciones y mejoramiento del sistema de pozas de evaporación dólar en el Salar de Atacama. Rockwood Lithium.

El objetivo del EIA es presentar un modelo conceptual hidrogeológico y un balance hídrico a partir de campañas trimestrales de medición de evaporación y evapotranspiración en la cuenca. El modelo conceptual se ha construido a partir de datos de antecedentes (registros históricos) y actuales, obtenidos de las campañas de terreno ejecutadas.

En este sentido, se han desarrollado mediciones mensuales del nivel estático en el acuífero del núcleo salino y en el acuífero duce/salobre. Además, se han realizado mediciones de nivel y caudal de las aguas superficiales, análisis de la calidad y composición isotópica del agua y finalmente, realización de perfiles de conductividad eléctrica y temperatura del agua en pozos que se encuentran al sur de la Zona Marginal del Salar.

Adicionalmente, también se han llevado a cabo una campaña de geofísica (ver capítulo 2.5) y construcción de piezómetros de monitoreo (ver capítulo 2.1).

Para llevar a cabo el modelo conceptual hidrogeológico se han realizado pruebas de bombeo y pruebas tipo Lefranc, para obtener valores de transmisividad, permeabilidad y coeficientes de almacenamiento. Las pruebas de bombeo contaron con uno o dos puntos de observación y se ejecutaron en la zona de explotación de Rockwood y en los sistemas lagunares de Peine y La Punta-Brava. Los pozos donde se realizaron las pruebas de bombeo son PN-05, PN-08, PN-14, PN-16, CL-21 y CL-6.

Según el compromiso de Rockwood en el RCA N°92 del 31 de mayo de 2000 de II región; y RCA N° 3132 del 28 de noviembre de 2006 de Dirección Ejecutiva de CONAMA, la compañía debe presentar

informes trimestrales de 29 puntos de observación en el núcleo del salar y 2 puntos correspondientes a los pozos de bombeo de agua industrial. En el marco de la reciente EIA (SGA, 2015), ha ampliado la red de monitoreo, de tal forma que en la actualidad tiene 109 puntos de medición (36 piezómetros, 25 piezómetros someros, 8 multipiezómetros, 4 secciones de aforo, 4 limnímetros, 12 puntos de agua superficial, 2 puntos de bombeo de agua industrial, 1 zanja y 1 estación meteorológica).

- A_REF.029-3:

CPH Consultores y asociados S.A. (2017). Adenda III Anexo 5. Estudio Hidrogeológico del Salar de Atacama. Modelo Conceptual. Proyecto SLM NX Uno de Peine Rev.0. EIA Planta de Producción de Sales de Potasio. Realizado para Minera SLM NX Uno de Peine.

SLM NX Uno de Peine ha establecido la línea base hidrogeológica en la presente EIA a partir de datos de antecedentes provenientes principalmente de SQM, Rockwood Lithium y en menor medida de MEL.

En el estudio se describen las unidades hidrogeológicas a partir de descripciones geológicas, se define una geometría del acuífero mediante datos geofísicos, se detalla el funcionamiento hidrogeológico del borde del salar y del núcleo salino, así como la zona de la cuña salina.

Además, se realiza un análisis de los niveles y parámetros hidráulicos.

El análisis de niveles se realiza en 107 pozos que se distribuyen a lo largo del núcleo del salar y borde este, de los cuáles 32 pertenecen a SLM NX Uno de Peine. En dicho análisis se representan gráficas de pozos provenientes de SQM (Dictuc, 2004) con registros históricos desde 1997 (inicio de la operación de SQM).

Para obtener los parámetros hidráulicos, SLM NX Uno de Peine realizó una prueba de bombeo en un pozo situado en el borde nororiental del polígono de la propiedad de exploración. La prueba se desarrolló con 6 pozos de observación y se calculó una transmisividad para cada pozo. En promedio la transmisividad obtenida fue de entre 700 y 900 m²/d y se define como un acuífero libre, con un coeficiente de almacenamiento de entre 7 y 8. Dicho pozo de bombeo, situado en el borde oeste del salar, se encuentra entre 24 y 30 Km de distancia de las lagunas del sistema Soncor.

El resto de la información de parámetros hidráulicos la obtiene a partir de antecedentes de SQM y Rockwood.

Los registros que se encuentra en este EIA corresponden a datos nuevos y existentes. La información es de buena calidad y de utilidad para el proyecto, porque presentan datos originales en los anexos, que pueden ser incorporados en las bases de datos y posteriormente analizados.

En general, en los estudios de EIA elaborados por los diferentes autores, se integran datos de:

- Red de monitoreo hídrico y niveles freáticos tomados en pozos. Evolución temporal de niveles.
- Distribución de los derechos de agua otorgados, extracciones históricas y actuales de salmuera.
- Mapas de isopiezas y direcciones de flujo.
- Valores de permeabilidad, transmisividad, porosidad y coeficientes de almacenamiento, así como la distribución espacial de dichos parámetros.
- Geometría de la interfase salina.
- Comportamiento hidrogeológico de los sistemas lagunares.

Cabe destacar que en las EIA realizadas por Dictuc (2004), SGA (2015), CPH (2017) y Golder (2017) se definen diferentes unidades hidrogeológicas (UH) para unidades geológicas similares. En la Tabla 2-2 se enumeran las unidades hidrogeológicas definidas en cada EIA.

REFERENCIA	MANDANTE	UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS PARA EIA (UH)
A_REF.029	SLM NX Uno de Peine	Núcleo del Salar
		Borde del Salar de Atacama
		Baja permeabilidad
		Impermeable
A_REF.091	SQM	Núcleo del Salar
		Zona Marginal
		Borde Este
		Zona de extracción de salmuera
		Sistema lacustre aguas de Quelana
		Sistema lacustre Peine
		Sistema lacustre Soncor
A_REF.092	Minera Escondida	Sistema vegetal borde este
		Depósitos salinos
		Gravas y cenizas
		Ignimbritas
		Tiocalar superior
		Salín superior
		Tiocalar principal
		Salín inferior
		Tiocalar inferior
Basamento		
A_REF.093	Rockwood Lithium	Núcleo del Salar de Atacama
		Zona Marginal
		Borde Este
		Borde Sur
		Aluvial Cordón de Lila
		Delta del Río San Pedro
		Borde Cordillera de la Sal
		Llano de la Paciencia
Baja Permeabilidad		

Tabla 2-2: Unidades hidrogeológicas definidas en los estudios EIA, por autores diferentes.

Fuente: elaboración propia.

Valoración general sobre los antecedentes disponibles de hidrogeología

En términos generales y de forma preliminar, se concluye que la información referente a parámetros hidráulicos de acuíferos (permeabilidades, transmisividades, coeficientes de almacenamiento, porosidad de los materiales), es escasa y los sectores que se pueden caracterizar son únicamente el borde este y sureste del salar. No obstante, mediante los expedientes de derechos de agua es posible extraer datos hidráulicos a partir de la interpretación de las pruebas de bombeo.

La información hidrogeológica disponible de los antecedentes está concentrada en las zonas de explotación del núcleo del salar, así como en el borde este y sur del Salar de Atacama. No obstante,

a pesar de que debe existir información de pozos y sondajes en el núcleo del salar, dichos datos no están disponibles públicamente, al ser estos confidenciales.

En el borde oeste del salar, también se dispone de poca información hidrogeológica, únicamente se ha desarrollado una prueba de bombeo por parte de la empresa SLM NX Uno de Peine.

De esta forma, los sectores donde existe poca información hidrogeológica corresponden al norte borde oeste y núcleo del Salar de Atacama, así como las zonas alejadas del salar, zonas montañosas de la cuenca, Salar del Llano de la Paciencia y sector San Pedro de Atacama. Cabe destacar que en este último, es posible caracterizar algunas áreas donde existan pozos de agua con derechos otorgados, ya que en dichos expedientes se encuentran columnas estratigráficas y ensayos de bombeo, a partir de los cuáles es posible extraer información de parámetros hidráulicos.

2.7 Análisis y revisión de la hidrogeoquímica

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

- A_REF.018:

Alonso H. & Risacher F. (1996) Geoquímica del Salar de Atacama, parte 1: origen de los componentes y balance salino. Revista geológica de Chile. Vol.23. N°2, p. 113-122.

El estudio de geoquímica se desarrolla a partir de la recolección de 22 muestras de agua de aporte superficial del salar, mientras que las aguas subterráneas se han caracterizado a partir de una composición promedio definida por Díaz del Río et al. (1999).¹

En el proyecto se concluye que el modelo de deposición de la sal del núcleo que se infiere de los resultados del estudio contempla una preponderancia de aportes subterráneos muy enriquecidos en cloruro de sodio. Importantes precipitaciones habrían afectado la alta Cordillera de los Andes al este y sobre todo, al noreste del salar, infiltrándose las aguas en los terrenos volcánicos superficiales y redisolviendo las formaciones evaporíticas profundas.

Los datos corresponden a nuevos y la información es de buena calidad.

- A_REF.019:

Risacher, F. & Alonso, H. (1996). Geoquímica del Salar de Atacama, parte 2: evolución de las aguas. Revista geológica de Chile. Vol. 23. N° 2, p. 123-134.

Mediante la construcción de un modelo geoquímico de las aguas del Salar de Atacama, como continuación del estudio de Alonso H. & Risacher F. (1996) se determina que la salmuera del núcleo del salar no proviene de la desecación de un lago, contrariamente al caso del Salar de Uyuni. El origen de la salmuera, del Salar de Atacama, viene dada por la evaporación de la salmuera subterránea a través de la costra salina.

Los datos corresponden a existentes y la información es de buena calidad.

¹ 1991. Informe final del estudio, análisis y planificación de los recursos de agua en la Segunda Región de Antofagasta. Informe técnico (inédito). Intendencia II Región, 185 p.

- A_REF.086:

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

Como continuación de los trabajos de Alonso H. & Risacher F. (1996), se publicó el presente proyecto en el que se desarrollan los modelos hidrogeoquímicos de los principales salares del norte de Chile, a partir del análisis de muestras de agua.

Particularmente, en el Salar de Atacama se presentan datos de hidroquímica recolectados entre los años 1993 y 1996 de aguas superficiales (lagunas y ríos) y subterráneas (manantiales y pozos). El número de registros con datos de hidroquímica son 25 (en este estudio se presentan 3 muestras más que en los artículos de investigación realizados por los mismos autores en el año 1996).

Los parámetros analizados corresponden a mayoritarios y también minoritarios como el arsénico, el litio, el boro, el bromuro y el yodo.

Los datos corresponden a existentes y la información es de buena calidad.

- A_REF.091:

Igsa Consultores, Prammar Ambiental Consultores e Ingeniería Dictuc. (2004-2006). EIA Cambios y mejoras en la operación minera en Salar de Atacama. SQM Salar S.A.

El análisis hidroquímico se realiza principalmente a partir de antecedentes procedentes de Hydrotechnica (1987, 1988c y 1988d). Con dichos datos se construyen mapas de distribución espacial del sulfato, cloruro y arsénico, a lo largo del borde este del salar y se determina que existen un aumento de los sulfatos desde el noreste hacia el suroeste.

A partir del monitoreo hidroquímico realizado en los sondajes construidos por Minsal (empresa que operaba en el salar previamente a SQM), se determinó la distribución espacial de las concentraciones de sulfato, potasio, magnesio, litio, calcio y ácido bórico en el salar. De esta forma, se determinó que las concentraciones de litio y de potasio eran máximas en el núcleo del salar.

En general, los registros de hidroquímica corresponden a existentes, la EIA se presenta con datos mayoritariamente procedentes de antecedentes. La calidad de la información es regular porque no se disponen de los datos originales.

Los datos corresponden a existentes y la información es de buena calidad.

- A_REF.029-3:

CPH Consultores y asociados S.A. (2017). Adenda III Anexo 5. Estudio Hidrogeológico del Salar de Atacama. Modelo Conceptual. Proyecto SLM NX Uno de Peine Rev.0. EIA Planta de Producción de Sales de Potasio. Realizado para Minera SLM NX Uno de Peine.

NX Uno de Peine en el estudio anterior analizó 20 muestras de agua subterránea en sondajes que se encuentran en las instalaciones de la zona de exploración SLM NX Uno de Peine. Los análisis incluyen algunos componentes mayoritarios como el Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , SO_4^{2-} , Cl^- y NO_3^- y otros elementos como el Li^+ y el F^- .

Además, se incluye un análisis químico del pozo AlgarroBILLa a diferentes profundidades, pozo ubicado en el borde Este del Salar de Atacama. Los componentes químicos analizados corresponden a Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , SO_4^{2-} , Cl^- y H_3BO_3 . Para este mismo pozo, además, del Pozo 5 y el Pozo 6, pozos ubicados también en el Borde Este del Salar, se incluyen perfiles de conductividad eléctrica y temperatura del agua subterránea.

A partir de registros de antecedentes de Rockwood, SQM provenientes del borde este, así como las 7 muestras de salmuera del borde oeste correspondientes a SLM NX Uno de Peine, se representan las facies hidroquímicas en diagramas de piper y stiff del núcleo del salar, del sector Tilopozo, La Punta-La Brava, Borde Este, Tilomonte y Peine. Además, se incluyen perfiles de conductividad eléctrica (CE) en pozos y gráficos de variación espacial de la CE.

La calidad de la información de antecedentes es regular ya que no se presentan los datos. El estudio recopila datos nuevos y existentes.

A_REF.047:

ICASS (2014). Análisis de los Mecanismos de Evaporación y Evaluación de los Recursos Hídricos del Salar de Atacama. Informe Final. S.I.T. N°357. Santiago, diciembre de 2014. Realizado para DGA.

En el estudio anterior se han recopilado de antecedentes 463 análisis químicos de 125 puntos de muestreo distribuidos de norte a sur del Salar de Atacama. La calidad de la información es buena, los registros se recopilan en una base de datos y se mantiene la fuente de origen. Los datos que se utilizan en el estudio corresponden a datos existentes.

Los antecedentes utilizados para el estudio corresponden a Díaz del Río, Bonilla & Peralta, (1972), Hauser (1997), EDRA (1997), Risacher Alonso & Salazar (1999), Gestión Ambiental Consultores (2009) y BNA-DGA (1966).

- A_REF.093:

SGA. Solución en Gestión Ambiental (2015). Adenda 5. Anexo I. Estudio Hidrogeológico y modelo numérico sector sur del Salar de Atacama. EIA Proyecto modificaciones y mejoramiento del sistema de pozas de evaporación dólar en el Salar de Atacama. Rockwood Lithium.

El estudio del EIA presentado por Rockwood Lithium contiene un completo estudio de hidroquímica realizado a partir de datos de monitoreo propios, obtenidos entre febrero de 2013 y diciembre de

2014 y además, registros de antecedentes provenientes de SQM (2007-2013), Fock (2009) y MEL (1998-2013). El número de puntos de agua que Rockwood ha monitoreado es alrededor de 100, mientras que los registros de antecedentes son más de 50.

Los registros de hidroquímica caracterizan tanto aguas superficiales como subterráneas, procedentes de piezómetros, lagunas, piezómetros someros, cauces superficiales, vertientes, calicatas y vegas. Dichos puntos de agua se distribuyen en diferentes sectores de la cuenca del Salar de Atacama: núcleo costra de halita, sector La Punta y La Brava, Sistema Peine, Sector Tilopozo, Sector Borde Tilopozo, Sector Tilomonte, Borde Este y Sistema Norte. Además, en algunos pozos se presentan perfiles de conductividad eléctrica y temperatura. Cada análisis de hidroquímica tiene el cálculo del error asociado. El error aceptado ha sido el de 5%, aunque en algunas muestras muy salinas, se ha aceptado hasta el 7% de error.

Los parámetros analizados han sido pH, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos, sulfatos, cloruros, metales totales y metales disueltos, bromuros, deuterio y oxígeno-18, nutrientes y grasas y aceites.

En general, los datos corresponden a existentes y nuevos. La calidad de la información es buena.

- A_REF.092:

Golder Associates. (2017). Anexo IV.1 Modelo Hidrogeológico. Modelo Hidrogeológico conceptual y Numérico para el Acuífero de Monturaqui-Negrillar-Tilopozo. EIA Proyecto Monturaqui. Minera Escondida.

Se cuenta con 126 puntos de monitoreo, cuyos registros más actuales son de finales del año 2015, con muestreos trimestrales en el Sector Monturaqui y bianuales en el Sector Tilopozo. En total se consideran 1.864 muestras para la caracterización de las aguas subterráneas de la cuenca MNT.

La caracterización de las aguas subterráneas comprende los parámetros fisicoquímicos principales: pH, sólidos disueltos totales (SDT) y conductividad eléctrica; además de los elementos mayores tales como calcio (Ca), potasio (K), magnesio (Mg), sodio (Na), en el caso de los cationes; y sulfato (SO₄), cloruro (Cl) y bicarbonato (HCO₃), en el caso de los aniones. Otros elementos menores (como arsénico, nitrato, litio o amonio) se reportan sólo en algunos de los muestreos realizados.

Los puntos de monitoreo corresponden a aguas subterráneas y superficiales. Concretamente se han monitoreado las lagunas La Brava, La Punta y las Vegas de Tilopozo. Para estos puntos de monitoreo se han realizado series de evolución temporal de algunos parámetros hidroquímicos y se ha comparado con los datos de las estaciones limnimétricas.

Además, se realiza un estudio de la interfase salina existente al norte del acuífero MNT, en el que se compara la densidad del agua con la conductividad eléctrica y finalmente, se ubica la posición de la interfase en planta (sobre un mapa) y en profundidad (en perfiles en pozos).

Además, se presentan gráficos temporales de la profundidad del nivel freático y la posición de la interfase salina en diferentes pozos. En algunos pozos de monitoreo se observa que el nivel estático ha disminuido alrededor de 0,5 m desde los años 90' y la posición de la cuña salina se ha profundizado levemente, como por ejemplo en el piezómetro TP-2 (Figura 2-2)

La información corresponde a datos nuevos y existentes. La información es de buena calidad.

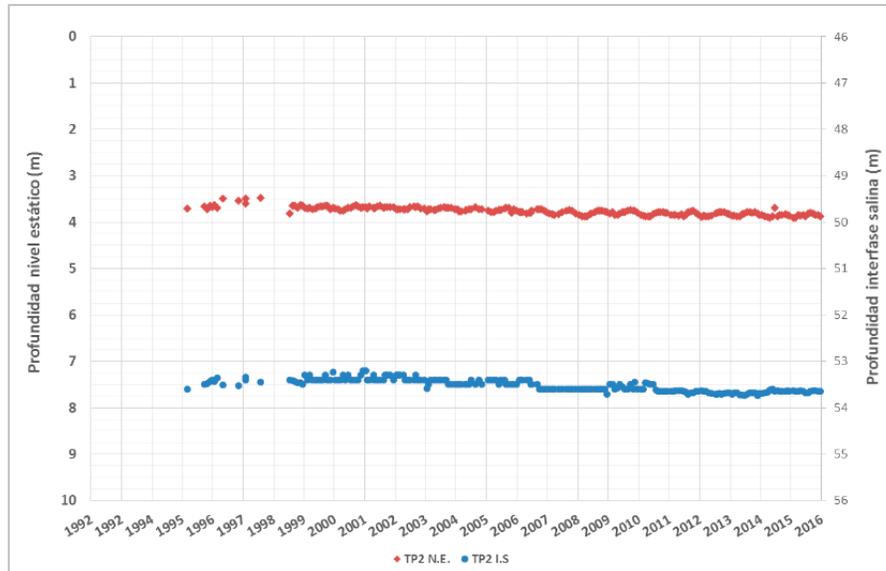


Figura 2-2: Valores históricos para la profundidad del nivel estático (TP2 N.E) y de la interfase salina (TP2 I.S), piezómetro TP-2.

Fuente: Golder Associates (2017).

Valoración general sobre los antecedentes disponibles de hidroquímica

La información hidroquímica disponible de los antecedentes está concentrada en las zonas de explotación del núcleo del salar y en el borde este y sur del Salar de Atacama. Existen zonas donde no se dispone de antecedentes hidroquímicos, como por ejemplo en el sector comprendido entre el límite norte del salar y el pueblo de San Pedro de Atacama. En el borde oeste del salar, también se dispone de poca información hidroquímica.

En sectores alejados del Salar de Atacama o zonas montañosas no se dispone de información hidroquímica. Tampoco se dispone de suficiente información hidroquímica de cursos de agua superficiales de las quebradas laterales de aporte al Salar de Atacama.

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.

- A_REF.086:

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

Como continuación de los trabajos de Alonso H. & Risacher F. (1996), se publicó el presente proyecto en el que se desarrollan los modelos hidrogeoquímicos de los principales salares del norte de Chile, a partir del análisis de muestras de hidroquímica e isótopos.

Particularmente, en el Salar de Atacama se presentan datos de hidroquímica recolectados entre los años 1993 y 1996 de aguas superficiales (lagunas y ríos) y subterráneas (manantiales y pozos). El número de registros con datos de hidroquímica son 25 (en este estudio se presentan 3 muestras más que en los artículos de investigación realizados por los mismos autores en el año 1997), de las cuáles 3 de ellas tienen análisis isotópico de deuterio y oxígeno-18.

Los datos corresponden a nuevos y existentes y la información es de buena calidad.

- A_REF.098:

Muñoz J. 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 IV. Campañas de Muestreo Geoquímicos e Isotópicos. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental Pontificia Universidad Católica de Chile. S.I.T. N° 195, DGA.

En el presente estudio se presentan analíticas de salares y otros puntos de interés que se encuentran en la Cuenca del Salar de Atacama. Los puntos muestreados en el estudio son un total de 23, distribuidos en 7 cuencas endorreicas. Dichos puntos de agua son representativos de aguas superficiales (lagunas, ríos y vertientes) y subterráneas provenientes de pozos de monitoreo existentes en la zona de estudio.

Las zonas de estudio que se encuentran dentro de las Cuenca del Salar de Atacama corresponden a las cuencas de Lejía, Aguas Calientes, Puntas Negras y Salar de Talar.

En el informe se presentan las coordenadas UTM y la altitud de los puntos de monitoreo, los parámetros físico-químicos tomados en terreno (conductividad eléctrica, temperatura y pH), los certificados de laboratorio de los análisis de cada muestra y los datos isotópicos.

Los elementos analizados en el laboratorio fueron pH, conductividad específica, cloruro, nitratos, sulfatos, bicarbonato, carbonato, calcio, potasio, magnesio, sílice, aluminio, hierro, boro, litio, zinc, y manganeso, mientras que los isótopos analizados corresponden al deuterio y al oxígeno 18.

Los datos corresponden a nuevos y la calidad de la información es buena.

- A_REF.093:

SGA. Solución en Gestión Ambiental (2015). Adenda 5. Anexo I. Estudio Hidrogeológico y modelo numérico sector sur del Salar de Atacama. EIA Proyecto modificaciones y mejoramiento del sistema de pozas de evaporación dólar en el Salar de Atacama. Rockwood Lithium.

Entre febrero de 2013 y diciembre de 2014 se tomaron muestras de agua para análisis isotópico, de aguas superficiales como subterráneas, procedentes de piezómetros, lagunas, piezómetros someros, cauces superficiales, vertientes, calicatas y vegas. Dichos puntos de agua se distribuyen en diferentes sectores de la cuenca del Salar de Atacama. Los puntos de agua con información isotópica son alrededor de 50. Los isótopos analizados son el deuterio y el oxígeno-18.

Cabe señalar que la salmuera representa diferentes fases de evaporación, por lo que su composición es heterogénea tanto en profundidad como en su distribución superficial. Sin embargo, presenta rangos de valores químicos e isotópicos que permiten diferenciarla de las lagunas y del acuífero en la Cuenca del Salar de Atacama.

En general, los datos corresponden nuevos. La calidad de la información es buena.

Golder Associates. (2017). Anexo IV.1 Modelo Hidrogeológico. Modelo Hidrogeológico conceptual y Numérico para el Acuífero de Monturaqui-Negrillar-Tilopozo. EIA Proyecto Monturaqui. Minera Escondida.

Se cuenta con un estudio de isótopos estables y radioisótopos en 15 pozos seleccionados de la serie MPW pertenecientes al sector de Monturaqui. Para estos se analizaron radioisótopos (tritio, carbono-13 y carbono-14), isótopos estables de agua e isótopos estables de sulfato.

Las principales conclusiones para el modelo conceptual que pueden extraerse del análisis de isotopía son las siguientes: 1) La totalidad de las muestras analizadas para radioisótopos presentan concentraciones de tritio bajo el límite de detección, por lo que es posible excluir aportes significativos de recargas recientes (menores a 55 años) y 2) La composición isotópica promedio estimada para la recarga, indicaría que probablemente la mayor parte de esta se formaría a partir de masas de humedad originadas desde el Amazonas.

Los datos isotópicos corresponden nuevos. La calidad de la información es buena.

Valoración general sobre los antecedentes disponibles de isótopos

La información isotópica disponible de los antecedentes no es suficiente como para establecer conclusiones determinantes a nivel de cuenca. Sí es posible determinar primeras aproximaciones en ciertas zonas donde existe mayor información.

2.9 Análisis y revisión del balance hídrico

Los antecedentes más relevantes que se han consultado para llevar a cabo el análisis del balance hídrico de la cuenca del Salar de Atacama se presentan a continuación.

- A_REF.029-2:

CPH Consultores y Asociados S.A. (2008). Adenda 2: EIA Planta de Producción de sales de potasio SLM NX uno de Peine. Modelo numérico.

La adenda de este EIA presenta un balance hídrico que se basa en un estudio realizado por DICTUC (2004). En el estudio citado se estima que la recarga media anual asociada a aportes subterráneos es de aproximadamente 2.170 l/s, mientras que la recarga media anual directa por precipitaciones en el salar es de aproximadamente 770 l/s. Los aportes subterráneos (recargas laterales por subcuencas aportantes) se determinan a partir de la precipitación observada en las estaciones meteorológicas. La recarga media anual directa en el salar se determina a partir de la precipitación menos la evaporación que ocurre luego de que la precipitación alcanza la costra de salar, que en este caso toma un valor de 5 mm para la evaporación. De forma adicional la adenda presenta los balances hídricos para los sistemas lacustres Soncor y Aguas de Quelana, ubicadas en el borde este del salar.

La información que se presenta corresponde a datos existentes. La calidad de la información es buena.

- A_REF.041:

GCF Ingenieros Limitada (2010). Actualización de la Evaluación de la Disponibilidad de Recursos Hídricos para Constituir Derechos de Aprovechamiento en las Subcuencas Afluentes al Salar de Atacama. Región II. DGA.

La evaporación desde el salar fue determinada siguiendo una metodología similar a la realizada por Mardones (1986). Se consideró una corrección en la definición de las zonas a partir de imágenes satelitales. Así, se obtuvo una descarga neta por evaporación desde la superficie libre en el salar de 5.600 l/s.

En este estudio se realiza un balance hídrico en las subcuencas aportantes al salar. Las subcuencas fueron divididas en bandas de altura de 100 m, las que en conjunto aportan al salar 5.600 l/s. Este

caudal se estimó como la precipitación efectiva menos la evaporación en vegas y lagunas. A su vez la precipitación efectiva se determinó como una proporción de la precipitación media en cada subcuenca. La proporción se ajustó para que el aporte al salar sea igual a las descargas por evaporación desde la napa subterránea.

El estudio también determina el balance hídrico en el salar, considerando como entradas los aportes de las subcuencas descritos en el párrafo anterior y como salidas la demanda de agua en vegas, lagunas y cultivos dentro de la zona plana del salar, estimando que en total estas demandas son de 3.080 l/s.

La información que se presenta corresponde a datos existentes. La calidad de la información es buena.

- A_REF.046:

Finger, Michael; et al. (2013). Análisis de la oferta hídrica del salar de Atacama. SDT N° 339. División de estudios y planificación, DGA.

Este estudio se basa en el estudio realizado por Mardones (1986), la Minuta 60 de la DGA (1999) y el reporte DGA/GCF (2010). La recarga al salar desde las sub-cuencas aportantes se calculó según el método propuesto por DGA/GCF (2010). En este informe se descuenta la precipitación que cae sobre el salar de la evaporación calculada desde la superficie freática. Considerando esto, se obtiene una evaporación neta y un caudal de aporte al salar igual a 5.178 l/s en el salar, lo que resulta ser el menor valor determinado en los antecedentes considerados por este estudio.

El estudio determina la oferta hídrica subterránea remanente en el salar realizando un balance entre los aportes subterráneos (por 4.340 l/s) menos la demanda ecológica en el salar (igual a 1.610 l/s), lo que entregó un total de 2.730 l/s.

La información que se presenta corresponde a datos existentes. La calidad de la información es buena.

- A_REF.091:

Tesam S. A. (2005). Estudio de Impacto Ambiental Modificaciones y mejoramiento del sistema de pozas de evaporación solar en el salar de Atacama. SQM Salar S.A.

Dentro de la línea base de este EIA se presenta el balance hídrico de largo plazo de la cuenca del Salar de Atacama. El balance resulta de la integración de modelos de datos geológicos, niveles de agua subterránea, flujos en el sistema de lagunas y conceptos de hidroquímica.

Los ingresos considerados corresponden a la precipitación directa en el núcleo (480 l/s), el flujo de agua subterránea (3.800 l/s) y los caudales superficiales en los ríos San Pedro, Vilama y otras quebradas (1.419 l/s). Por otro lado, las salidas consideradas corresponden a la evaporación en las

lagunas (1.980 l/s), la evaporación del agua subterránea en los márgenes del salar (2.629 l/s), la evaporación de salmuera en el núcleo (610 l/s) y la evaporación de la precipitación que cae directamente en el núcleo del salar (480 l/s). Tanto las entradas como las salidas suman en total 5.699 l/s.

La información que se presenta corresponde a datos existentes. La calidad de la información es regular ya que no se presentan los datos.

- A_REF.092:

Golder Associates. (2017). Anexo IV.1 Modelo Hidrogeológico. Modelo Hidrogeológico conceptual y Numérico para el Acuífero de Monturaqui-Negrillar-Tilopozo. EIA Proyecto Monturaqui. Minera Escondida.

En este estudio se realiza un balance hídrico del acuífero de Monturaquí-Negrilla-Tilopozo (MNT), considerando los aportes y las descargas del sistema. Los flujos de recarga se generan de forma principal en el sureste de Monturaqui, mientras que las descargas por evaporación ocurren en el sector de Tilopozo. Los aportes considerados son la recarga subterránea de tres subcuencas ubicadas en el sector alto de la cuenca de Monturaqui. Estas recargas se determinan como un rango que va del 11 % al 16 % de la precipitación media sobre la totalidad de la cuenca, lo que equivale a un rango entre 640 l/s y 931 l/s, adoptándose el menor valor. Las descargas consideradas son la evaporación en napas someras, en cuerpos de agua (lagunas) y la evapotranspiración de la vegetación.

El balance preliminar se realiza considerando el régimen natural de la cuenca, suponiendo que la recarga es igual a las descargas por evaporación. Usando un criterio conservador se estima un caudal de 640 l/s para las entradas y salidas del balance hídrico del acuífero.

La información que se presenta corresponde a datos existentes. La calidad de la información es buena.

- A_REF.093:

SGA. Solución en Gestión Ambiental (2015). Adenda 5. Anexo I. Estudio Hidrogeológico y modelo numérico sector sur del Salar de Atacama. EIA Proyecto modificaciones y mejoramiento del sistema de pozas de evaporación dólar en el Salar de Atacama. Rockwood Lithium.

En este estudio se realiza un balance hídrico de la cuenca completa del Salar de Atacama. El salar es dividido en tres zonas principales: 1) núcleo, 2) zona marginal y 3) zona marginal norte. La cuenca aportante se divide en 16 subcuencas que son agrupadas en 3 cuencas mayores, según drenan a las tres zonas definidas dentro del salar. El balance es presentando en las 3 zonas del salar definidas.

Los elementos considerados en el balance son la precipitación total, la evaporación en el suelo después de una lluvia, la evapotranspiración desde el acuífero a través del suelo o a través de la transpiración de la vegetación, la evaporación de la lámina libre (lagunas), los bombeos de agua dulce y salmuera, la infiltración, las variaciones de almacenamiento (que se asume igual a cero en el régimen natural) y la escorrentía subterránea, superficial y sub-superficial.

La evaporación desde el salar y la precipitación efectiva se determina usando una metodología similar a la presentada en el estudio DGA/GFC (2010). Sumando la evaporación que ocurre desde el nivel freático del salar, se obtiene un caudal de evaporación de 5.584,6 l/s el cual es igual a la recarga proveniente de las subcuencas aportantes.

La información que se presenta corresponde a datos nuevos y existentes. La calidad de la información es buena.

Valoración general sobre los antecedentes disponibles de balance hídrico

En general, existe un número importante de estudios que han determinado el balance hídrico en el Salar de Atacama. Estos estudios se basan en las mediciones y metodologías presentadas por Mardones (1986). Estudios posteriores mejoran la distribución de las áreas de evaporación (DGA/GFC, 2010) y validan con nuevos datos los registros de los lisímetros (SGA, 2015). A consecuencia de lo anterior, los estudios han encontrado que las descargas naturales del sistema del Salar de Atacama están entre los ~5.200 l/s a los ~5.700 l/s. Este rango es consistente con el resultado original de Mardones ~5.400 l/s. Finalmente, se debe mencionar que los estudios en que se presenta una estimación de la evaporación desde el salar (como los mostrados en el Capítulo 2.4 del presente informe) realizan de forma implícita un balance hídrico simplificado en régimen natural. Lo anterior se explica, ya que la cuenca es endorreica y por tanto toda la recarga al acuífero, que no es evaporada en las cuencas aportantes, debe evaporarse en el salar bajo un régimen natural sin considerar cambios en el almacenamiento.

2.10 Análisis y revisión de los modelos numéricos

La información más relevante sobre la modelación numérica existente en el Salar de Atacama se refleja entre los siguientes informes.

- A_REF.101:

CSIC (2017). Cuarta actualización del modelo hidrogeológico del Salar de Atacama. SQM Salar S.A

Esta revisión corresponde a la cuarta actualización del modelo de flujo de agua subterránea del “Proyecto Cambios y Mejoras de la Operación Minera en el Salar de Atacama”, contemplado en el Plan de Seguimiento Ambiental Hidrogeológico de Salar de Atacama.

Este modelo numérico fue construido en la plataforma FEFLOW v 7.0, que utiliza elementos finitos para resolver las ecuaciones de flujo que describen el comportamiento hidrogeológico del sistema. Se trata de un modelo numérico de flujo en medio saturado, que permite representar el comportamiento del sistema tanto en régimen estacionario como transitorio.

Este modelo soluciona el problema de la densidad variable con la corrección de los niveles por densidad variable debido a los cambios de salinidad entre el agua de recarga (dulce o de poca salinidad) y la salmuera en los pozos que disponen de medida del nivel piezométrico. Esta metodología tiene en cuenta las características particulares de cada punto de control, a fin de acotar lo máximo posible la corrección.

Como la interfaz de agua dulce y salina se puede considerar como estacionaria en el tiempo, es posible corregir todos los niveles a un único valor de densidad de referencia.

- A_REF.029-3:

CPH & Asociados S.A (2017). Adenda 3. Anexo 6. Estudio hidrogeológico del Salar de Atacama. Modelación numérica. Rev. 0. SLM NX Uno de Peine.

El modelo numérico se desarrolló a partir del modelo de simulación del DICTUC del 2004. Se complementa con la adición de nuevos sondajes y nueva geofísica.

Las condiciones de contorno implementadas en el modelo resultan coherentes con el modelo conceptual:

- Se establece una recarga directa por precipitaciones.
- Una recarga por infiltración desde las lagunas Soncor y Peine.
- Recarga lateral a partir de las zonas de quebradas adyacentes.
- En el salar se extrae a partir de los pozos de extracción de salmuera, agua salobre y agua dulce.

A partir de los valores de niveles obtenidos, se puede concluir que el modelo reproduce niveles registrados y las tendencias de los mismos; a partir de la calibración, se puede simular la explotación de salmueras en el núcleo del salar; y finalmente, las diferentes lagunas, de los Flamencos, Quelana y Peine, no resultan afectadas por los bombeos.

La calidad de la información es buena y los datos corresponden a nuevos y existentes.

- A_REF.093:

SGA. Solución en Gestión Ambiental (2015). Adenda 5. Anexo I. Estudio Hidrogeológico y modelo numérico sector sur del Salar de Atacama. EIA Proyecto modificaciones y mejoramiento del sistema de pozas de evaporación dólar en el Salar de Atacama. Rockwood Lithium.

El objetivo principal del trabajo consiste en la predicción de la evolución de las diferentes variables del sistema hidrogeológico del Salar de Atacama. A partir de una buena conceptualización del funcionamiento hidráulico de la zona de estudio, el trabajo reproduce las condiciones actuales en la zona de estudio. Una vez realizada la determinación de los parámetros hidráulicos de las diferentes unidades hidrogeológicas, el modelo tiene la capacidad de predecir la evolución del sistema en diferentes escenarios.

El proyecto se ha desarrollado a partir de la utilización acoplada de los códigos MODFLOW y SEAWAT. Los datos determinados a partir de las simulaciones del SEAWAT, se introducen como condiciones de contorno en el VISUAL MODFLOW. El modelo numérico y los campos disponibles contienen los puntos establecidos la guía del SEA (2012).

A partir de la introducción de diferentes escenarios de modelación, al final del trabajo se puede concluir lo siguiente:

- La operación del proyecto que en la extracción salmuera y agua dulce a salobre, no provoca cambios en el total de sólidos disueltos ni descensos importantes en las zonas de alimentación de las lagunas.
- La operación no genera descensos adicionales en los niveles de salmuera próximos a las lagunas Aguas de Quelana y Soncor.
- A pesar de haberse producido una sequía prolongada en la región, en las lagunas no se han producido efectos relevantes de disminución de los niveles.
- El proyecto es sustentable y no afecta a los sistemas lagunares del Salar de Atacama.

Debido a su alcance, se puede determinar que el trabajo presenta una relevancia alta para el presente proyecto. La calidad de la información es buena y los datos corresponden a nuevos y existentes.

- A_REF.091:

Igsa Consultores, Prammar Ambiental Consultores e Ingeniería Dictuc. (2004-2006). EIA Cambios y mejoras en la operación minera en Salar de Atacama. SQM Salar S.A.

El archivo corresponde a un modelo hidrogeológico para la correcta predicción y la evaluación a futuro del funcionamiento del salar, en base a las diferentes operaciones de las empresas mineras que operan en la zona.

El modelo se encuentra realizado en MODFLOW, representando a la zona medio-sur del Salar de Atacama. Presenta un tamaño de celda comprendido entre 250 hasta 1.000 m. las condiciones iniciales del modelo se han definido en base a los registros obtenidos en 180 pozos de observación y de bombeo.

Las condiciones de contorno implementadas corresponden a la evaporación, a la recarga por precipitación y lateral de los diferentes aportes a la cuenca y, finalmente, la representación de los sistemas lacustres de Soncor, Aguas de Quelana y Peine.

Inicialmente se realizó una calibración a partir de las observaciones registradas en 96 pozos, obteniendo permeabilidades entre un intervalo de 1 a 5.000 m/día y porosidades de 2 al 40 %. A pesar de tratarse de un modelo muy complejo, en la calibración se observa una reproducción bastante correcta de las tendencias de la variación de niveles en la zona.

El modelo fue utilizado para calcular los caudales de bombeo y reinyección de salmuera, de manera de que no se viesan afectados los sistemas lacustres ubicados en los márgenes del núcleo del salar.

El impacto sobre el sistema Aguas de Quelana se estimó en cuatro pozos de observación. El sistema no presentó ningún efecto por los bombeos de salmuera del núcleo, ni el de agua dulce en el Borde Este, a causa de la baja permeabilidad de la zona marginal del núcleo y la evaporación, que amortiguó los cambios en la recarga.

De la misma manera, en el sistema lacustre Soncor, se puede observar una disminución de los descensos frente a un traslado de los puntos de bombeo hacia una zona más alejada:

- Los descensos observados en pozos cercanos a las lagunas del sistema Soncor, reaccionan de forma proporcional a la variación de conductividad hidráulica I de la barrera: aumentan cuando aumenta ésta, y disminuyen con su disminución, a causa de la variación de la recarga al núcleo.
- En el sistema lacustre de Aguas de Quelana no se producen efectos significativos al variar las propiedades de la barrera.
- Frente a una disminución de la recarga lateral subterránea, los pozos cercanos al sistema Soncor muestran mayores descensos. Estos disminuyeron por el efecto amortiguador de la evaporación. En Aguas de Quelana, los efectos de una disminución en la recarga lateral son prácticamente despreciables.

- A_REF.045

Durán J. (2012). Modelación numérica y su contribución al estudio del comportamiento hidrogeológico del sector SW del acuífero del salar de atacama. II Región de Antofagasta, Chile. Universidad de Chile.

Trabajo de modelación numérica concerniente al estudio del comportamiento hidrogeológico del sector SW del Salar de Atacama. La información utilizada es la de SQM, pero solo se expone la información que no es confidencial.

El estudio se realiza para el conocimiento del funcionamiento del acuífero, y la caracterización del comportamiento del flujo y el transporte en la zona. Se realizan dos modelos: el primero monocapa, con 30 m de espesor, y el segundo, de tres capas, en el que se representa a geometría completa del acuífero. Se presenta una alta variabilidad de la transmisividad, con valores que oscilan entre 100 hasta 3.300 m²/día, y con una variación exponencial de la porosidad con la profundidad. En el modelo, se consigue una buena representación del sistema real existente en la zona, así como una correcta predicción de los supuestos escenarios futuros. Los modelos son válidos como herramientas de gestión en la zona.

Existe una buena representación del modelo conceptual no saturado, con gran cantidad de pozos y piezómetros en la geometría de la zona, además de numerosas referencias a los diferentes parámetros hidrogeológicos y la evolución de los mismos, con una precisa representación de la heterogeneidad existente en la zona de estudio. Las condiciones de contorno se encuentran bien representadas en el modelo.

A partir de todo lo expuesto, se puede concluir que el trabajo presenta una alta relevancia para el trabajo actual, aunque con una calidad media de los datos cuantitativos, debido a la manipulación de los mismos por el convenio de confidencialidad existente.

Valoración general sobre los antecedentes disponibles de modelos numéricos

A partir de la información de antecedentes consultada es posible identificar que las áreas de modelación corresponden a zonas concretas donde se desarrolla la operación y que no coinciden con las áreas que engloban al sistema acuífero de la zona estudio.

2.11 Síntesis y recomendaciones de la valoración de antecedentes

A continuación se detallan las principales conclusiones de la revisión de antecedentes. Además en la Tabla 2-3 se presenta la síntesis y las recomendaciones referentes al análisis de antecedentes:

- Los antecedentes revisados se han analizado, compilado y registrado de forma sistemática. Además, se ha elaborado una ficha técnica de cada documento con las principales características de éste, que permite establecer un acceso rápido a la información relevante del estudio. Lo anterior integra, enriquece el conocimiento del área de estudio y sirve de base para el actual y futuros proyectos.
- A partir del 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 dichos puntos 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 si ésta es o no suficiente para construir el modelo conceptual. Además, esta tarea servirá como estructura base para futuros trabajos.
- En términos generales y de forma preliminar, se concluye que la información referente a parámetros hidráulicos de acuífero (permeabilidades, transmisividades, coeficientes de almacenamiento, porosidad de los materiales), e hidroquímica de aguas tanto superficiales como subterráneas, sólo se encuentra disponible en el Salar de Atacama y en sectores específicos de éste. De esta forma, en el norte, núcleo, borde oeste y suroeste del Salar de Atacama no existe información o no hay registros suficientes como para construir un modelo conceptual robusto. Cabe destacar que la información isotópica sólo está disponible en el borde sureste del salar.
- Los registros de nivel en pozos son suficientes para caracterizar el núcleo del salar, el acuífero aluvial del borde este y el acuífero de MNT para el año 2013. Este es el año en el que se dispone de más puntos con registro de nivel en la cuenca. No obstante, al norte del Salar de Atacama los niveles corresponden a los valores obtenidos en los ensayos de bombeo realizados para los derechos de agua y sólo se pueden utilizar como referencia.
- En el núcleo y norte del salar se han identificado un número menor de perfiles de geofísica que en los sectores del borde este, borde oeste y borde sur del salar. Además, en el acuífero de MNT no se disponen de los perfiles de geofísica originales. Por lo tanto, en el sector del núcleo y norte del salar, así como en los sectores de Negrillar y Monturaqui se tendrá menor precisión en la construcción de la geometría del acuífero.
- La geología de superficie de toda la cuenca se ha caracterizado a partir de las cartas geológicas del SERNAGEOMIN y por ello, se dispone de una base como para definir las unidades hidrogeológicas a partir de características litológicas y geológicas. .

Información de antecedentes		Registros disponibles	Registros NO disponibles	Unidad	Sectores donde NO EXISTE información	Información NECESARIA y NO DISPONIBLE	Grado de precisión para construir el modelo	Justificación del grado de precisión
GEOLOGÍA	Columnas estratigráficas	322	*	ud	Norte del Salar de Atacama y áreas que bordean al salar (norte, este, oeste y sur de la cuenca)	-	Regular	El mayor número de columnas estratigráficas se encuentra en el Salar de Atacama, por lo tanto, a lo largo de la cuenca existen zonas donde se desconocen los espesores de las unidades geológicas. Como consecuencia de ello, la construcción de la geometría, en estas áreas, va a ser de precisión regular.
	Mapa geológico (SERNAGEOMIN)	3	0	ud	-	-	Bueno	Mediante los 3 mapas geológicos del SERNAGEOMIN disponibles, se logra caracterizar la geología en superficie de toda la cuenca. No obstante, el mapa disponible en la parte sur de la misma tiene una escala mayor (1:500.000) que los del norte (1:250.000). Por lo tanto, el grado de precisión no es "Óptimo", ya que es preferible tener el mismo detalle en toda la cuenca, pero sí es "Bueno" para construir el modelo conceptual.
METEOROLOGÍA	Estaciones meteorológicas	29	0	ud	Oeste de la cuenca	-	Regular	La construcción de las isoyetas mediante los registros de precipitación de las estaciones meteorológicas disponibles no es suficiente como para elaborar con precisión las isoyetas del oeste de la cuenca, debido a que no existen estaciones meteorológicas en este sector. No obstante, para el actual proyecto se están buscando alternativas que se detallarán en las siguientes etapas de trabajo.
HIDROLOGÍA	Estaciones fluviométricas y puntos de aforos sistemáticos	10	-	ud	La información disponible se considera suficiente para caracterizar la cuenca	-	Óptimo	La cantidad de estaciones fluviométricas y los registros disponibles provenientes de éstas, serán suficientes para elaborar el modelo hidrológico y el balance hídrico de la cuenca.
	Lisímetros	23	10	ud	Norte, oeste y suroeste del Salar de Atacama y llano de la paciencia.	No se cuenta con las mediciones de los lisímetros pertenecientes a la DGA instalados en 2014 según se reportó en el SIT 357 (DGA, 2014)	Bueno	La cantidad de lisímetros que se han instalado por parte de diversos autores, en el borde este, sureste y noreste del salar, sería suficiente. Sin embargo, existen zonas donde no se dispone de lisímetros ni domos. Por lo tanto, el grado de precisión es "Bueno" y no "Óptimo" teniendo en cuenta la totalidad de la cuenca. Además, cabe destacar que los datos correspondientes a los lisímetros instalados de la DGA no están disponibles y deben ser solicitados.
	Domos	31	-	ud		-	Bueno	
GEOFÍSICA	TEM y NanoTEM	88 / 629,9	78 / 488,7	perfiles/Km	Norte del Salar de Atacama y áreas alejadas del salar (norte, este, oeste y sur de la cuenca).	Perfiles geofísicos originales A_REF.092 (MEL, 2017) y Cuarta actualización de la EIA. SQM Salar S.A. (SQM, 2017)	Bueno	Debido a que no se tiene información geofísica del norte del Salar de Atacama y las áreas alejadas del salar (norte, este, oeste y sur de la cuenca), existen zonas en las que el modelo tendrá cierto grado de imprecisión. Por ello, la valoración de esta área temática es "Bueno". Sería óptimo si se tuviese información en todas las partes de interés de la cuenca.
	MT	13 / 144,2	11 / 53,9	perfiles/Km				
	Sísmica	5 / 229,4	13 / 204	perfiles/Km				
	Tomografía	0	2 / 6	perfiles/Km				
	Resistividad eléctrica (se desconoce el método específico)	3 / 35,9	0	perfiles/Km				
	Gravimetría	2 / 146,9	0	perfiles/Km				

Tabla 2-3: Valoración de antecedentes según el número de registros, la distribución de éstos y la información disponible.

Información de antecedentes		Registros disponibles	Registros NO disponibles	Unidad	Sectores donde NO EXISTE información	Información NECESARIA y NO DISPONIBLE	Grado de precisión para construir el modelo	Justificación del grado de precisión
HIDROGEOLOGÍA	Puntos con niveles de agua	516	*	ud	Norte, este y oeste, suroeste de la cuenca.	Bases de datos de registros históricos de niveles del monitoreo PSA (Plan de seguimiento ambiental)	Regular	La distribución de los pozos con información de nivel no es homogénea a lo largo del Salar de Atacama. Además, en la parte norte, este, oeste y suroeste no se dispone de suficiente información. Además, los registros se presentan en diferentes escalas temporales, por lo tanto, lo anterior dificulta la elaboración de las isopiezas. En la Etapa II se trabajará el análisis de niveles y se determinará el grado de precisión obtenido y se precisará los lugares donde la incertidumbre del modelo es mayor, con más detalle.
	Parámetros hidráulicos	96	*	ud	Norte, noreste, este, oeste y suroeste de la cuenca. Además, del núcleo del salar y la zona de Negrillar.	Información de parámetros hidráulicos de los pozos de CMZ (zona de Negrillar)	Regular	La distribución de los pozos con información de parámetros hidráulicos no es homogénea a lo largo del Salar de Atacama. Por lo tanto, no es posible realizar un análisis integrado de toda la cuenca. Por ello, a nivel de cuenca el grado de precisión es "Regular".
HIDROGEOQUÍMICA	Puntos de agua con hidrogeoquímica	156	*	ud	En el núcleo, norte, suroeste y este del Salar de Atacama. Además, tampoco se dispone de información ni al norte ni en el borde, este y oeste de la cuenca.	Falta la información de la cuarta actualización de SQM y los registros en formato digital de Rockwood (bases de datos)	Anivel de cuenca No aceptable Sector sureste del Salar de Atacama Bueno	La información de hidroquímica más actualizada está concentrada en el sector sureste del Salar de Atacama. De esta forma, a nivel de cuenca no es posible realizar un modelo hidrogeoquímico actualizado. No obstante, se disponen de datos antiguos procedentes de los estudios de Risacher (1993-1996) (principalmente se encuentra en el borde este del salar), que serán comparados con la información disponible actualmente. Cabe destacar que la información disponible del sector sureste, se encuentra toda ella en formato pdf y por lo tanto, se deben construir las bases de datos mediante la transcripción de la información.
ISÓTOPOS	Puntos de agua con isótopos	46	*	ud	En el núcleo, norte, suroeste y este del Salar de Atacama. Además, tampoco se dispone de información ni al norte ni en el borde, este y oeste de la cuenca.	Falta la información de la cuarta actualización de SQM y los registros en formato digital de Rockwood (bases de datos)	Anivel de cuenca No aceptable Sector sureste del Salar de Atacama Bueno	

Tabla 2-3 (Continuación): Valoración de antecedentes según el número de registros, la distribución de éstos y la información disponible.

3. Caracterización hidrológica

En el presente capítulo se detalla la caracterización hidrológica del área de estudio que incluye un análisis hidrográfico, morfológico e hidrológico de las diferentes variables.

3.1 Caracterización hidrográfica

El área de estudio corresponde a la cuenca Salar de Atacama. Esta cuenca se caracteriza por tener al Salar de Atacama en el centro de la misma y a distintas zonas aportantes alrededor. En conjunto el área de estudio presenta una extensión de 17.007 km². En la Figura 3-1 y Figura 3-2 se muestra la ubicación de la cuenca y la red hidrográfica que la representa.

La cuenca Salar de Atacama se divide en una serie de subcuencas cuyos límites han sido redefinidos en el presente trabajo, sobre la base de la topografía. La división en subcuencas se ha realizado mediante el análisis del modelo digital de elevación (MDE) con las herramientas de ArcGis 10.3 (Hydrology, Surface, Zonal Statistics, Extraction y Raster dataset y manejo de algoritmos watershed delimitation). En la Figura 3-2 se presenta el resultado del análisis.

A partir del análisis anterior, se han obtenido 17 subcuencas, las mismas que han sido identificadas por SGA (2015) en el estudio de EIA de Rockwood Lithium, cuya delimitación es similar a la que ha realizado Amphos 21. La división en subcuencas permite discretizar las áreas de recarga del Salar de Atacama, teniendo en cuenta las características hidrológicas particulares en cada una de ellas.

Cabe destacar que de las 17 subcuencas identificadas en la cuenca, 4 definen el área del Salar de Atacama (Figura 3-2) y éstas son las siguientes: 1) núcleo, 2) zona marginal norte, 3) zona marginal sur y 4) zona oeste; mientras que las 13 restantes corresponden a las cuencas aportantes al salar.

Una vez realizada la división del área aportante en subcuencas, estas se agruparon de acuerdo al margen del salar en donde realizan su descarga. Esta división compuesta de subcuencas agrupadas en sectores principales es similar a la adoptada por los estudios realizados por SGA (2015) y DGA/GCF (2010), lo que permite realizar una comparación con estos antecedentes.

La cuenca Salar de Atacama es una cuenca endorreica, donde existen un número reducido de cauces con escurrimiento permanente. La cuenca presenta numerosas quebradas con un régimen de caudales esporádico. Este régimen se explica ya que la parte baja de la cuenca no presenta precipitaciones de manera regular y por tanto, las quebradas y cauces sólo presentan un flujo apreciable luego de que ocurren precipitaciones importantes.

Los principales afluentes al Salar de Atacama son los ríos San Pedro y Vilama, que escurren con dirección sureste. Estos ríos presentan un escurrimiento permanente y se caracterizan por tener un área aportante mayor, si se le compara con el resto de las quebradas que drenan al salar. Los principales tributarios del río San Pedro son el río Grande y el río Salado, mientras el principal tributario del Vilama es el río Puritama. Ambos ríos descargan en el salar en las cercanías de la localidad de San Pedro de Atacama.

Numerosas quebradas alimentan al salar por el este de la cuenca. En general, estas quebradas tienen una marcada orientación de este a oeste, son prácticamente paralelas entre sí y presentan áreas aportantes comparativamente menores que la de los ríos San Pedro y Vilama. Algunas de las quebradas presentan escurrimiento permanente, esto se explica porque funcionan como vertientes alimentadas con aguas subterráneas. Entre las quebradas que poseen escurrimiento permanente se pueden mencionar la quebrada de Zapar, Hamar, Potor, Aguas Blancas, Camar, Socaire, Peine, Talabre, Jerez, Tarjine. El resto de las quebradas son secas y mayoritariamente no poseen nombre.

Respecto de los cauces aportantes al margen oeste del salar, destacan la quebrada del Agua Colorada, que nace en la sierra Almeida y se orienta de sur a norte hasta llegar al salar. En su transcurso conecta con numerosas quebradas paralelas sin nombre ubicadas en la pampa Agua Amarga y la pampa Palo Blanco. En el sector del Llano de la Paciencia destaca la quebrada del Agua Salada, la que sigue un curso paralelo a la Cordillera de Domeyko y se orienta de norte a sur hasta desaparecer. El sector también presenta numerosas quebradas sin nombre las que drenan de oeste a este. Ninguna de estas quebradas presenta escurrimiento permanente, ya que el sector oeste del salar registra precipitaciones totales menores que las del sector este.

El sector del salar cuenta con un núcleo ubicado en su parte central, que se extiende hacia el sur y hacia el oeste. El costado este del salar, denominado Zona Marginal, presenta numerosos sistemas lacustres, entre los que destacan el sistema de vegas Tilopozo y el sistema lacustre Peine, que contienen a las lagunas la Punta y Salada en el sector sur. En la parte media de la zona marginal se encuentran los sistemas lacustres Soncor (que contiene las lagunas Chaxas, Puilar y Barros Negros) y Aguas de Quelana. Finalmente, hacia el sector norte se encuentran las lagunas Baltinache, de Cejas y Tabinquiche. El costado oeste del salar no presenta lagunas.

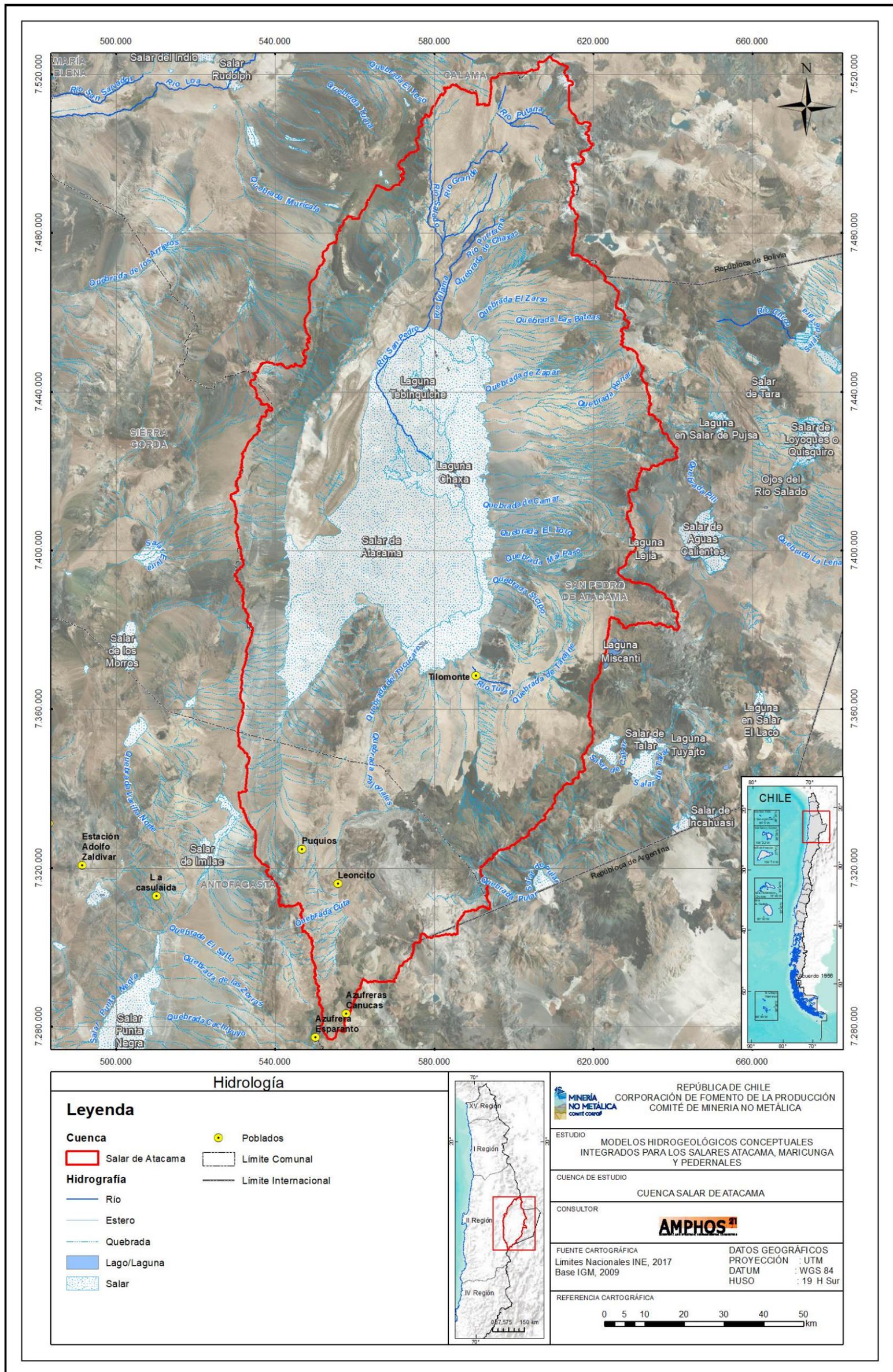


Figura 3-1: Ubicación y red hidrográfica.

Fuente: elaboración propia.

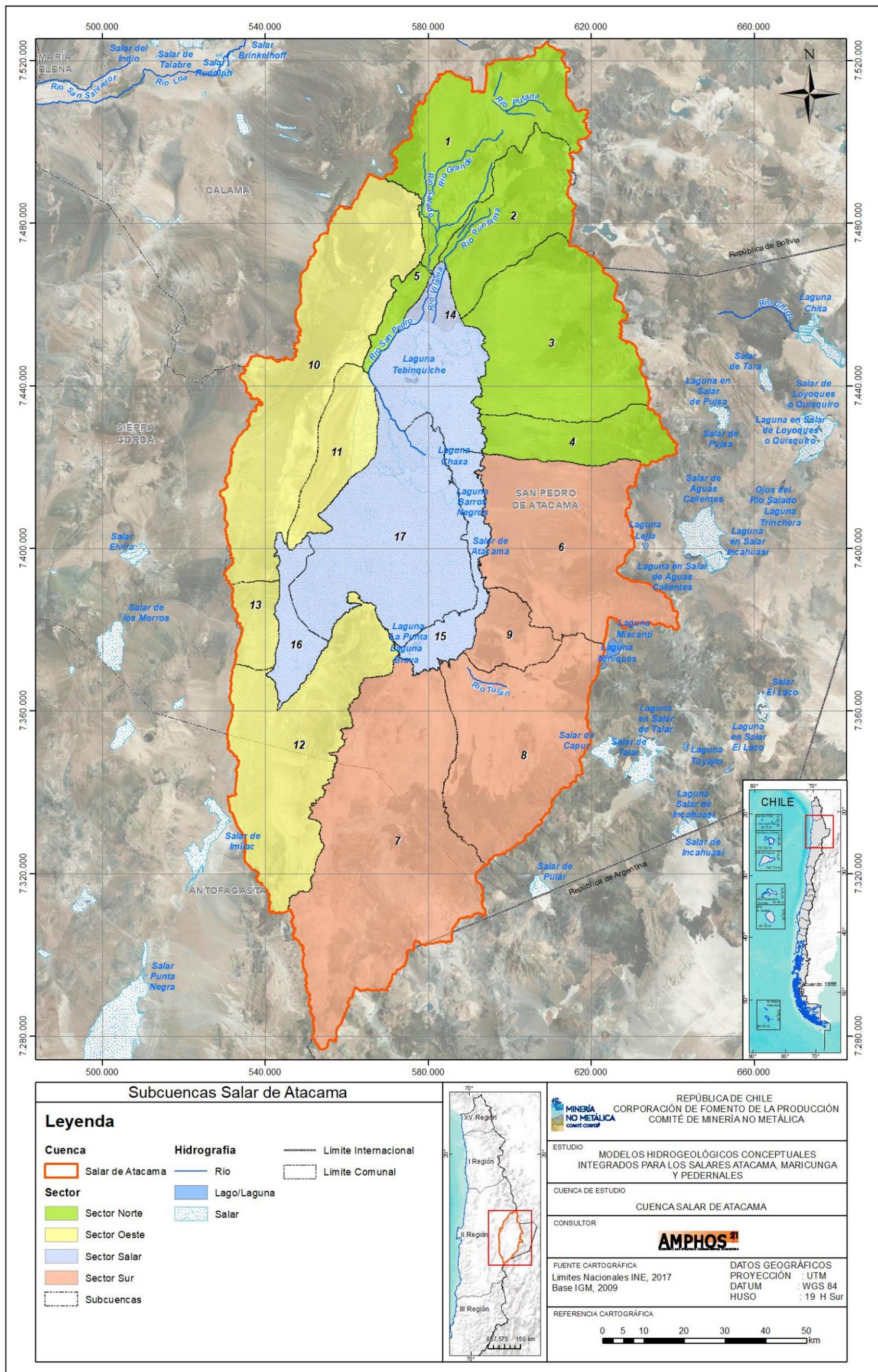


Figura 3-2: Ubicación de las 17 subcuencas definidas para el área de estudio.

Fuente: elaboración propia.

3.2 Caracterización morfológica

La Tabla 3-1 se presenta los parámetros morfológicos de las subcuencas aportantes al Salar de Atacama. Los parámetros morfológicos de las cuencas en estudio, junto con su delimitación se han obtenido a partir del modelo de elevación ASTER DEM con resolución de 30 x 30 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 3-3 muestra las curvas hipsométricas de las tres cuencas principales aportantes al salar.

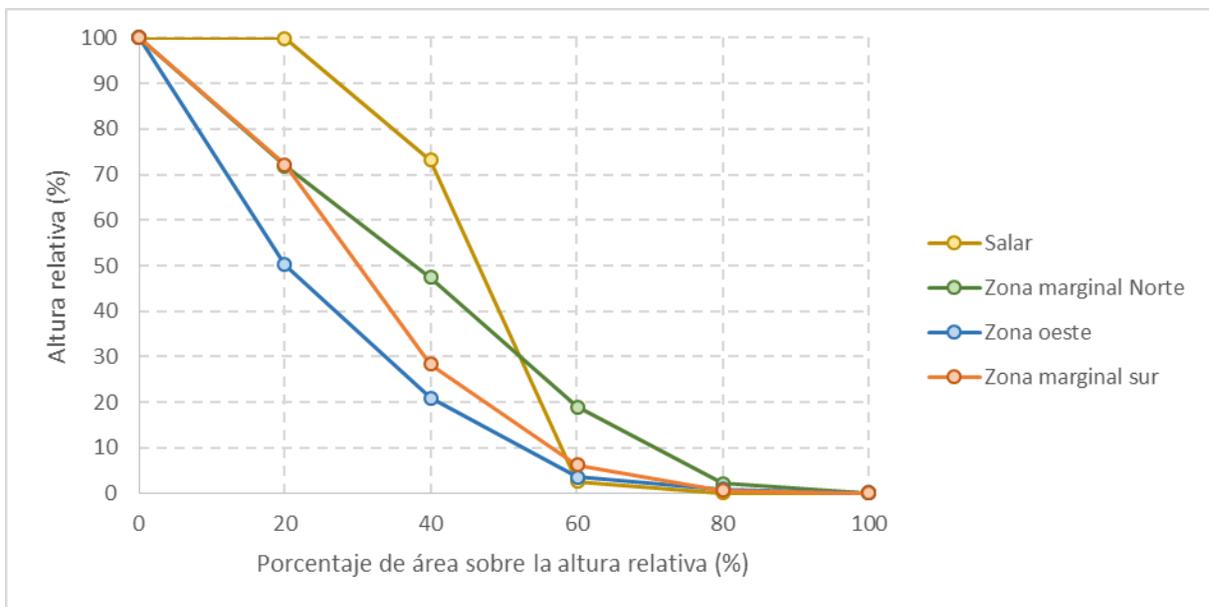


Figura 3-3. Curvas hipsométricas.

Fuente: elaboración propia.

Parámetros morfológicos	Subcuenca																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Área cuenca [km ²]	1196	754	1444	504	137	1502	2584	1444	296	1918	468	1499	214	777	378	275	1618
Atura mínima [m]	2444	2360	2307	2317	2307	2286	2284	2297	2294	2208	2251	2282	2287	2220	2240	2219	2112
Altura máxima [m]	5874	5944	5910	5978	2709	5775	6009	6214	3803	4278	2625	4468	3481	2601	2380	2542	2503
Altura promedio [m]	3916	3695	3619	3584	2439	3499	3496	3580	2791	2716	2383	2967	2654	2332	2302	2347	2310
Pendiente media [%]	21	21	17	20	12	21	18	17	14	14	10	16	15	7	8	9	15
Longitud cauce principal [km]	47	13	36	62	22	38	28	52	47	46	98	20	-	-	-	-	-
Altura mín. cauce principal [m]	2445	2418	2330	2327	2304	2287	2302	2301	2299	2294	2357	2373	-	-	-	-	-
Altura máx. cauce principal [m]	4277	4717	4211	4789	4224	3402	5513	3306	3391	2380	3799	3448	-	-	-	-	-
Altura media cauce principal [m]	3280	3203	3030	3329	3082	2724	3089	2798	2460	2339	2905	2814	-	-	-	-	-
Pendiente media cauce principal [%]	4	18	5	4	9	3	11	2	2	0	1	5	-	-	-	-	-

Tabla 3-1: Parámetros morfológicos principales de las 17 subcuencas.

Fuente: elaboración propia.

3.3 Análisis hidrológico

En este capítulo se presenta una caracterización hidrológica del área de estudio basado en el análisis de las variables precipitación, escorrentía y evaporación. 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, se presenta una relación entre la precipitación media y la ubicación de las estaciones. 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 3-4 presenta la ubicación de las estaciones. Se seleccionaron las estaciones públicas con al menos 20 años de registros, ubicadas al sur de la estación Linzor, próxima al nacimiento del río Toconce. De forma excepcional se agregaron al análisis las estaciones Sierra Gorda y Monturaqui, que no cumplen con el criterio establecido para la extensión del registro. Se consideraron estaciones privadas para caracterizar la precipitación sobre el salar y el sector suroeste. Las estaciones privadas sobre el salar fueron reportadas por SGA (2015) en un EIA para Rockwood Lithium, mientras que las estaciones del sector suroeste pertenecen a la Minera Escondida (MEL) y fueron reportadas por Golder (2017) en el EIA del proyecto Monturaqui.

3.3.1.2 Disponibilidad de estadística

La disponibilidad de la estadística se presenta en la Tabla 3-3. El registro en la mayoría de las estaciones públicas es amplio y con pocos vacíos de información, con excepción de las estaciones Coya Sur, Talabre, San Pedro de Atacama, Monturaqui y Sierra Gorda. Por otro lado, las estaciones privadas cuentan con registros dispares que van de a 3 a 15 años con información. Considerando lo anterior, se puede decir que la precipitación en el sector noreste del área de estudio puede representarse con seguridad, ya que se cuenta con un número importante de estaciones con registros extensos. El sector suroeste presenta menos estaciones y registros más cortos. Así, la estimación de la precipitación en este sector presenta mayor incertidumbre.

Código BNA	Nombre Estación	Coordenada este (WGS84)	Coordenada norte (WGS84)	Elevación m.s.n.m.	Fuente
02104010-K	Chiu-chiu	536.233	7.528.897	2.524	BNA
02105016-4	Linzor	600.705	7.541.410	4.100	
02105017-2	Toconce	585.903	7.537.638	3.310	
02105018-0	Ayquina	570.019	7.536.185	3.031	
02105020-2	Salado Embalse	582.061	7.535.395	3.200	
02105021-0	Caspana	581.373	7.529.526	3.260	
02105022-9	El Tatio	601.521	7.525.807	4.370	
02110013-7	Calama	509.635	7.517.056	2.300	
02112009-K	Coya Sur	435.719	7.523.080	1.250	
02500016-1	Toconao Experimental	602.373	7.434.840	2.500	
02500017-K	Camar	606.068	7.410.874	2.700	
02500019-6	Socaire	613.276	7.390.779	3.251	
02500020-K	Peine	595.138	7.380.680	2.460	
02500021-8	Talabre	613.526	7.421.084	3.300	
02510006-9	San Pedro de Atacama	581.989	7.466.168	2.450	
02510007-7	Río Grande	585.625	7.494.765	3.250	
02660001-4	Monturaqui	557.298	7.308.296	3.430	
02700001-0	Sierra Gorda	467.042	7.468.536	1.616	
02710002-3	Baquadano	414.545	7.419.596	1.032	
02710003-1	Antofagasta	358.522	7.389.632	50	

Tabla 3-2: Estaciones meteorológicas.

Fuente: elaboración propia.

Código BNA	Nombre Estación	Coordenada este (WGS84)	Coordenada norte (WGS84)	Elevación m.s.n.m.	Fuente
-	Planta SCL	569.244	7.384.662	2.300	(1)
-	Chaxas SQM	583.508	7.424.264	2.304	
-	Salar SQM	561.348	7.396.266	2.300	
-	Socompa	557.298	7.308.296	3.600	(2)
-	Tilopozo	585.000	7.370.000	2.325	
-	Cerro Marcelo	490.000	7.320.000	3.290	
-	Laguna Seca	480.000	7.300.000	2.936	
-	Volcán Llullaillaco	510.000	7.270.000	4.312	
-	Salar de Punta Negra	520.000	7.270.000	2.950	

Tabla 3-2 (Continuación): Estaciones meteorológicas.

Fuente: elaboración propia.

(1): SGA (2015).

(2): Golder (2017). La ubicación de las estaciones fue inferida a partir de los planos de ubicación presentados en el antecedente.

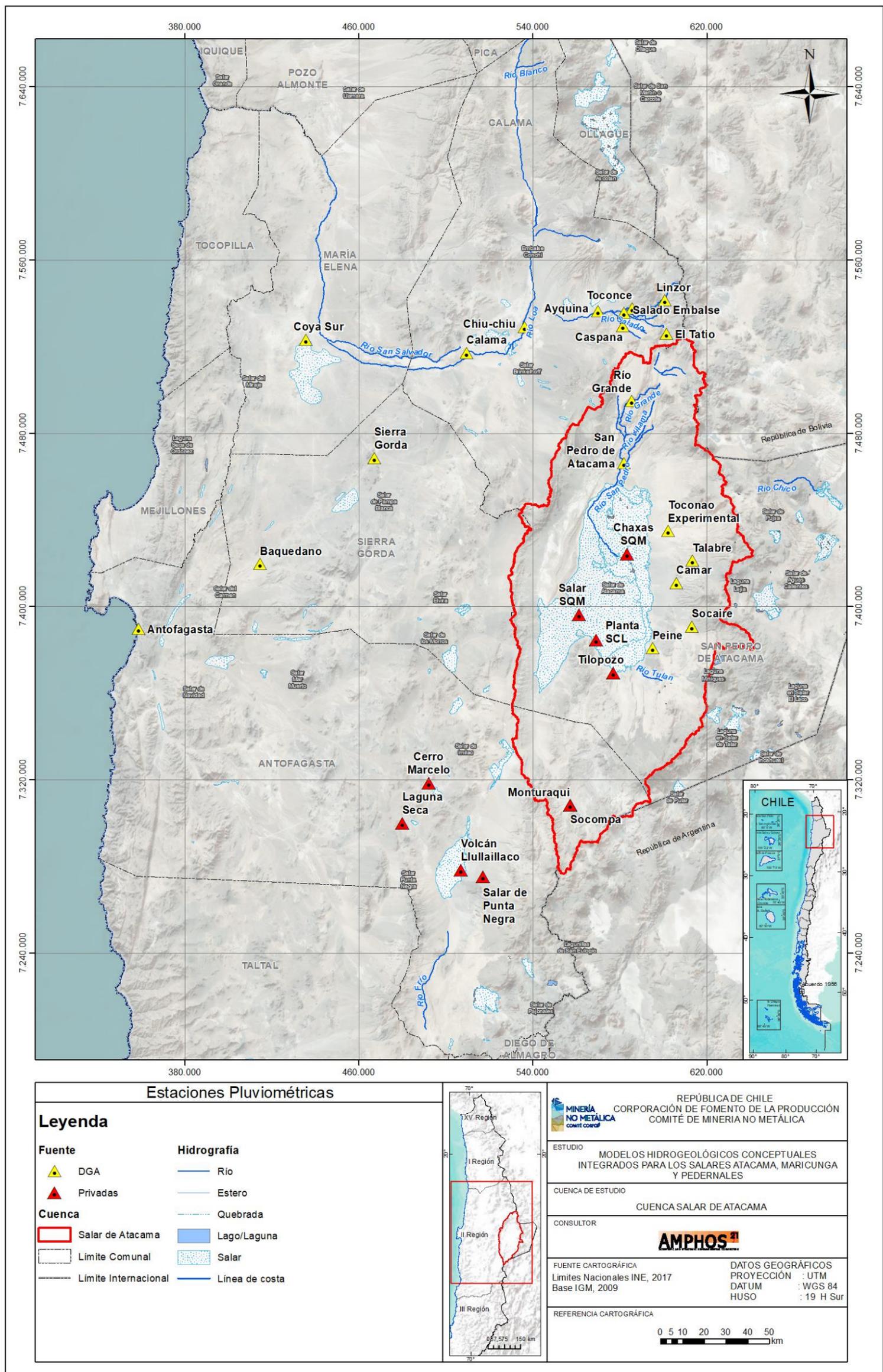


Figura 3-4: Ubicación de las estaciones meteorológicas.

Fuente: elaboración propia.

Nro.	Estación	1971-1980	1981-1990	1991-2000	2001-2010	2011-2016
1	Chiu-chiu					
2	Linzor					
3	Toconce					
4	Ayquina					
5	Salado Embalse					
6	Caspana					
7	El Tatio					
8	Calama					
9	Coya Sur					
10	Toconao Experimental					
11	Camar					
12	Socaire					
13	Peine					
14	Talabre					
15	San Pedro de Atacama					
16	Río Grande					
17	Monturaqui					
18	Sierra Gorda					
19	Baquedano					
20	Antofagasta					
21	Planta SCL					
22	Chaxas SQM					
23	Salar SQM					
24	Socompa					
25	Tilopozo					
26	Cerro Marcelo					
27	Laguna Seca					
28	Volcán Lullillaco					
29	Salar de Punta Negra					

Año con información completa

Año con 7 a 9 meses con información

Año con 10 a 11 meses de información

Año con 1 a 7 meses con información

Tabla 3-3: Disponibilidad de información pluviométrica.

Fuente: elaboración propia.

Nota: La disponibilidad del registro de las estaciones Socompa, Tilopozo, Cerro Marcelo, Laguna Seca, Volcán Lullillaco y Salar de Punta Negra se obtuvo de Golder (2017) y se presenta utilizando la descripción del antecedente citado. Así, azul oscuro significa buena representatividad y azul claro baja representatividad.

3.3.1.3 Estadígrafos y series de tiempo

La Figura 3-5 presenta las series de tiempo de la estación río Grande (3.250 m s.n.m.), representativa de la parte norte de la cuenca del Salar de Atacama y de la estación Peine (2.460 m s.n.m.), ubicada en la zona sur. Se observa que existe una variación cíclica en la precipitación, con periodos extensos de años secos seguidos de años lluviosos. Lo anterior se explica por el origen amazónico de las precipitaciones, que varía en intensidad de acuerdo con los ciclos ENSO (niño-niña) (Houston, 2006). Por otro lado, se observa que los años más lluviosos no coinciden en las series, pese a que ambas estaciones se encuentran en la misma cuenca, separadas por aproximadamente 115 km. Esta variabilidad espacial se explica porque las precipitaciones amazónicas son de tipo convectivo y no frontal.

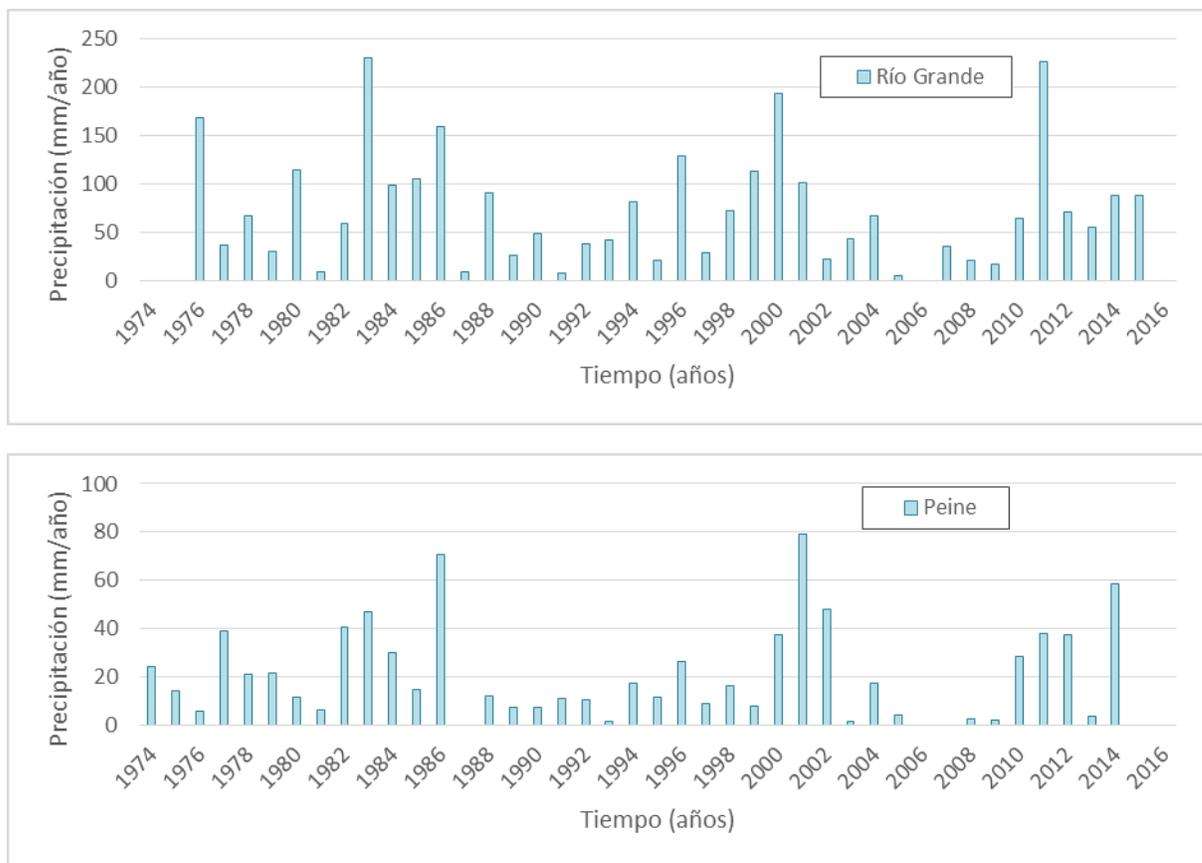


Figura 3-5: Serie de tiempo de precipitación anual (periodo 1974-2016).

Fuente: elaboración propia.

Considerando los dispares periodos de registro en las estaciones privadas, se optó por utilizar los promedios reportados por SGA (2015) y Golder (2017) en donde se presenta la estadística de estas estaciones. Estos promedios se obtuvieron luego de un relleno y corrección de la estadística.

Respecto de los datos en las estaciones públicas Talabre y San Pedro de Atacama, se optó por utilizar los valores de promedio medio anual presentados en el estudio SGA (2015). En el estudio citado, se realizó un relleno basado en correlación mensual y probabilidad de no lluvia. Para la estación San Pedro la correlación se hizo con la estación Ayquina, y para la estación Talabre con la estación Camar.

La estación pública Monturaqui no presenta un registro extenso. Por este motivo, en el estudio de SGA (2015) no fue posible encontrar una correlación aceptable entre la estación Monturaqui con otras estaciones para su relleno. Considerando esto, se optó por utilizar sólo como referencia los registros en esta estación.

Finalmente, para el resto de las estaciones públicas se prefirió utilizar la precipitación media anual obtenida directamente desde la base de datos del BNA, ya que en su mayoría estos promedios se obtuvieron a partir de series con al menos 32 años de registros completos (sólo las estaciones Coya Sur y Sierra Gorda presentan menos de 32 años). Considerando lo anterior, los registros son lo suficientemente extensos como para calcular directamente la precipitación media anual.

La Tabla 3-4 presentan los estadígrafos principales de las series de precipitación anual en las estaciones públicas, así como el promedio corregido en las estaciones privadas.

3.3.2 Distribución espacial de las precipitaciones

Se construyó una relación entre la precipitación media anual y un índice asociado a la ubicación y la altura a la que se ubica la estación. Este índice de ubicación y altura (IUA) se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$IUA = \left(\frac{N - N^*}{300} + \frac{E - E^*}{200} + z \right) * \frac{1}{1.000}$$

Donde N es la coordenada norte de la estación, E es la coordenada este de la estación, z es la altura en donde se ubica la estación y N* y E* permiten trabajar en coordenadas locales. Según la ecuación anterior, a mayor altura se tendrá un índice de ubicación mayor, así también mientras más hacia el noreste este el sector, el índice de ubicación también será mayor. Los valores de N* y E* son 7.000.000 y 350.000 respectivamente. La referencia de todas las coordenadas es WGS-84.

Nombre Estación	Promedio	Des. estándar	Mínimo	Máximo
	(mm/año)	-	(mm/año)	(mm/año)
Chiu-chiu	5	5	0	24
Linzor	162	112	1	412
Toconce	93	78	6	348
Ayquina	40	43	0	190
Salado Embalse	70	69	2	324
Caspana	85	83	5	364
El Tatio	133	108	0	422
Calama	4	4	0	14
Coya Sur	1	2	0	5
Toconao Experimental	33	32	0	101
Camar	35	32	2	125
Socaire	41	41	0	148
Peine	20	20	0	79
Talabre	64	62	0	197
San Pedro de Atacama	36	32	0	114
Río Grande	72	59	0	231
Monturaqui	59	40	21	103
Sierra Gorda	1	2	0	8
Baquedano	2	4	0	18
Antofagasta	5	9	0	37
Planta SCL	13	-	-	-
Chaxas SQM	9	-	-	-
Salar SQM	13	-	-	-
Socompa	44	-	-	-
Tilopozo	22	-	-	-
Cerro Marcelo	17	-	-	-
Laguna Seca	25	-	-	-
Volcán Llullaillaco	54	-	-	-
Salar de Punta Negra	17	-	-	-

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

Fuente: elaboración propia a partir de datos de BNA y de SGA (2015).

Como se puede observar en la Figura 3-6, los datos muestran dos comportamientos diferentes. La precipitación media anual es menor que 10 mm/año en la zona con IUA menores que 4. El sector descrito corresponde a la parte media y baja de la región de Antofagasta y por tanto queda fuera del área de estudio. La curva en este sector se construyó a partir de la precipitación registrada en las estaciones Antofagasta, Baquedano, Sierra Gorda y Coya Sur, todas ellas ubicadas bajo los 2.000 m s.n.m. La segunda parte de la curva da cuenta de la precipitación media anual en la parte alta de la región de Antofagasta, siendo válida en zonas con IUA mayores a 4.

La existencia de dos sectores con diferentes regímenes de precipitación fue descrita por Houston (2006). El autor dividió el norte de Chile en un sector con bajas precipitaciones asociadas a eventos de invierno y una zona de mayores precipitaciones asociada a eventos convectivos que ocurren durante el verano (ver Figura 3-7). Por otro lado, Houston (2006) también describe un incremento no lineal de la precipitación para la zona alta de la cuenca (zona cordillerana), tal como se muestra en la Figura 3-6.

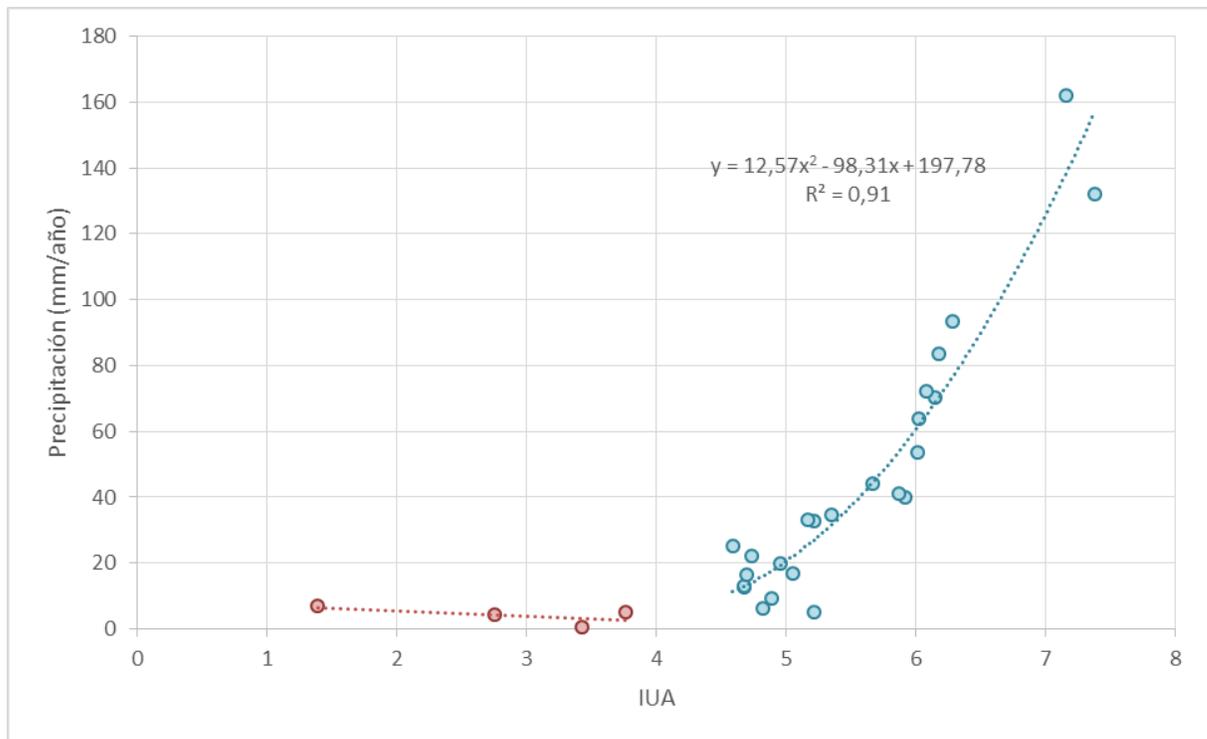


Figura 3-6: Relación de IUA contra precipitación media anual.

Fuente: elaboración propia.

Nota: La ecuación que se muestra, corresponde al ajuste con la zona de mayor precipitación (puntos azules).

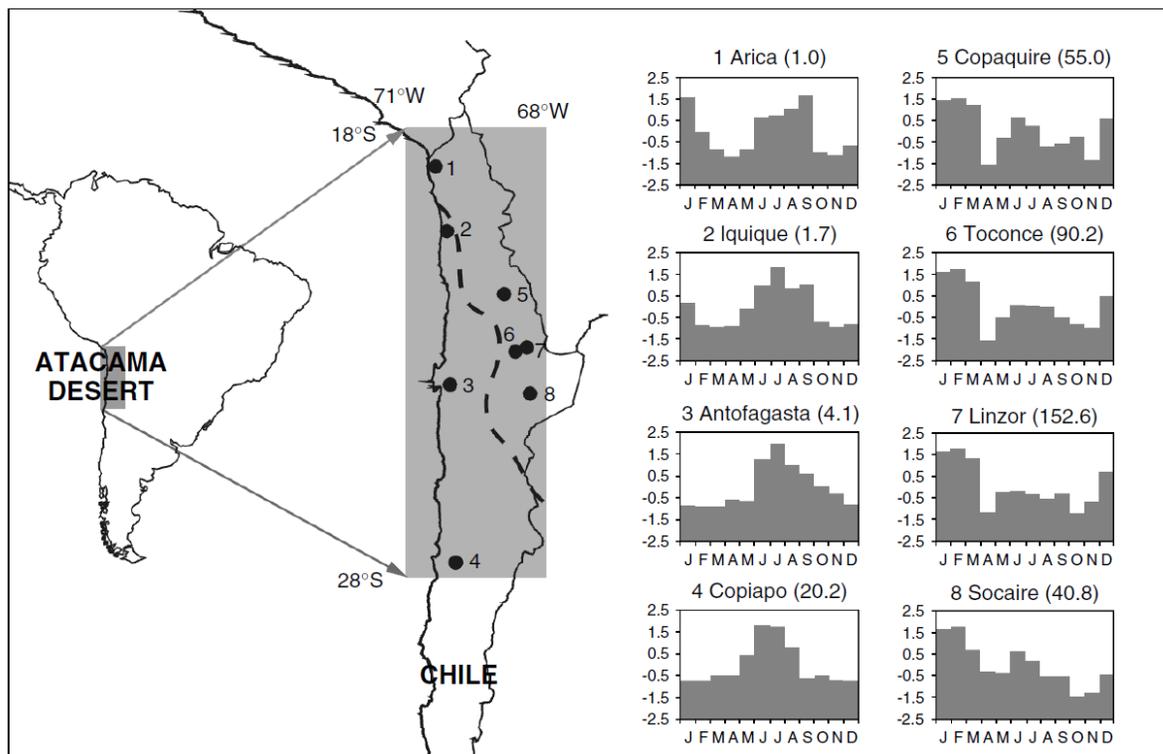


Figura 3-7: Mapa de ubicación del norte de Chile con la los gráficos de frecuencia de precipitación media mensual estandarizada. La precipitación media anual se muestra entre paréntesis.

Fuente: Houston (2006).

Nota: Location map of northern Chile with monthly frequency plots of rainfall for four long-term coastal stations with dominant winter rainfall and four short-term Andean stations with dominant summer rainfall. The dividing line between stations with peak rainfall in summer or winter is shown dashed. Each station is standardized using an LN3 transformation. Mean annual rainfall (mm) given in brackets (Houston, 2006).

Como se ha mostrado, la precipitación en la cuenca Salar de Atacama presenta una serie de particularidades: 1) tiene origen amazónico, 2) mayores precipitaciones durante el verano, 3) régimen cíclico asociado al fenómeno del niño-niña, 4) precipitación de tipo convectiva y 5) incremento no lineal de la precipitación con la altura. A fin de caracterizar la distribución espacial de la precipitación y considerando las particularidades de la precipitación antes descritas, se planteó una relación entre IUA y precipitación media anual. En base a esta relación, se generaron curvas isoyetas sobre las cuencas aportantes al salar, las que se muestran en la Figura 3-8.

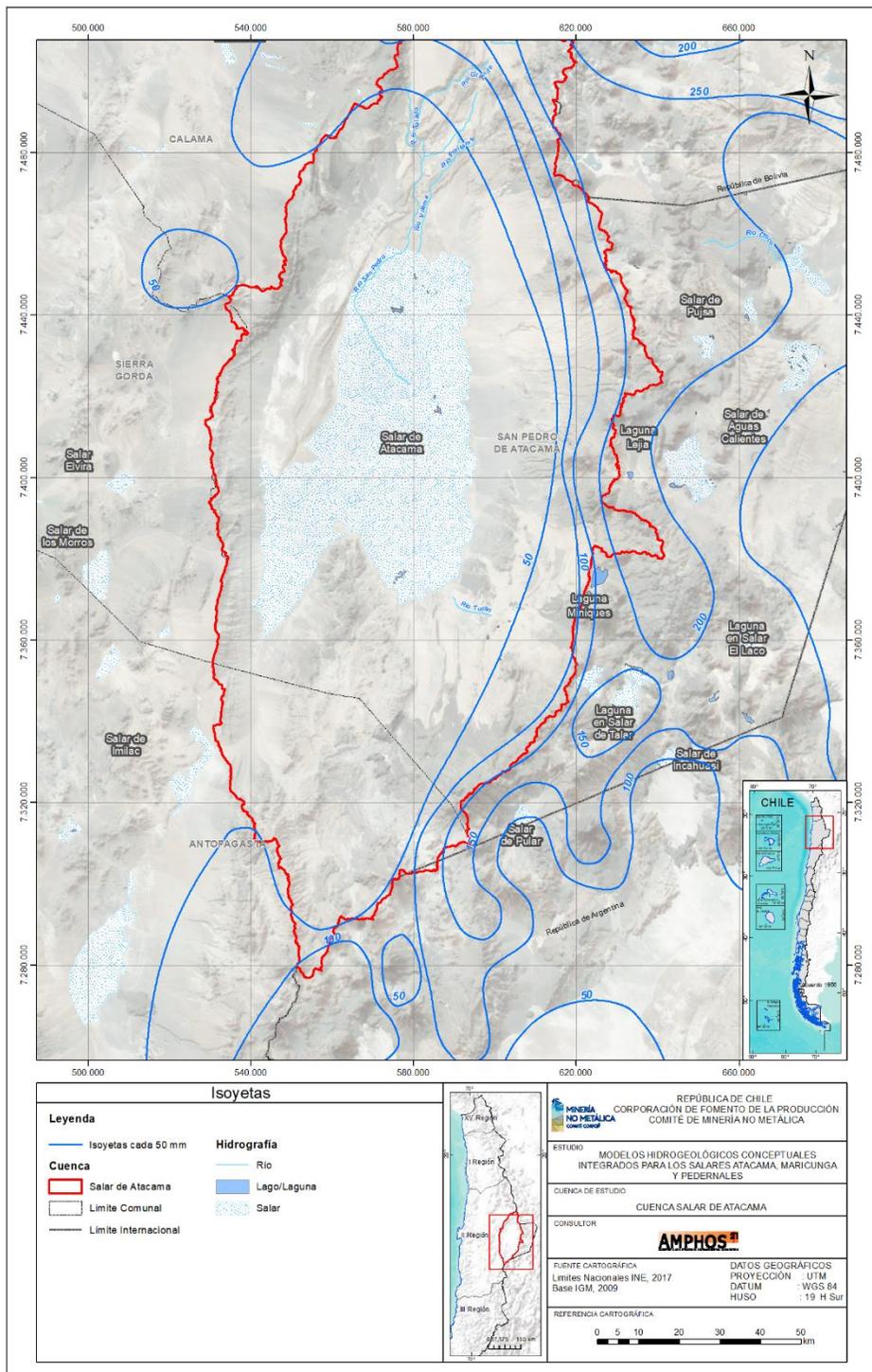


Figura 3-8: Curvas isoyetas de precipitación media anual.

Fuente: Elaboración propia.

3.3.3 Análisis de escorrentía

El análisis de caudales se basó en una recopilación de la estadística fluviométrica generada por 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 3-5. La Figura 3-10 presenta la ubicación de las estaciones. La cuenca del Salar de Atacama presenta una estación fluviométrica que controla el caudal permanente en su cauce principal (río San Pedro). Por otro lado, hay un gran número de estaciones fluviométricas ubicadas en canales. De estas estaciones, destaca por la magnitud de sus caudales la estación canal Vilama en Vilama. Esta estación se ubica en la zona norte del salar. El resto de las estaciones se ubican en el margen este del salar y drenan hacia la zona marginal norte y zona marginal sur.

Código BNA	Nombre estación	Coordenada este (WGS84)	Coordenada norte (WGS84)	Elevación (m s.n.m.)
02500002-1	Canal Aguas Blancas	600.918	7.425.937	2.415
02500005-6	Canal Cuno en Socaire	617.637	7.388.227	3.600
02500006-4	Canal Tilomonte antes represa	592.170	7.367.957	4.000
02500003-K	Canal Tulan en Tilomonte	590.873	7.368.734	2.450
02500004-8	Canal Vilama en Vilama	584.206	7.470.634	2.550
02500001-3	Río Vilama en Vilama	583.780	7.470.975	2.550
02510001-8	Río San Pedro en Cuchabrachi	582.268	7.475.873	2.585

Tabla 3-5: Estaciones fluviométricas.

Fuente: elaboración propia.

3.3.3.4 Aforos en quebradas y vertientes

Dentro del estudio realizado por SGA (2015), se recopiló la estadística de aforos en algunas quebradas y vertientes de la cuenca del Salar de Atacama. Esta estadística tiene una representatividad menor que la entregada por las estaciones fluviométricas, ya que las mediciones no son continuas. Pese a lo anterior, los registros permiten caracterizar los aportes de las numerosas quebradas que escurren en el margen este del salar. Por este motivo, se presentan los principales estadísticos de los caudales aforados en la Tabla 3-7.

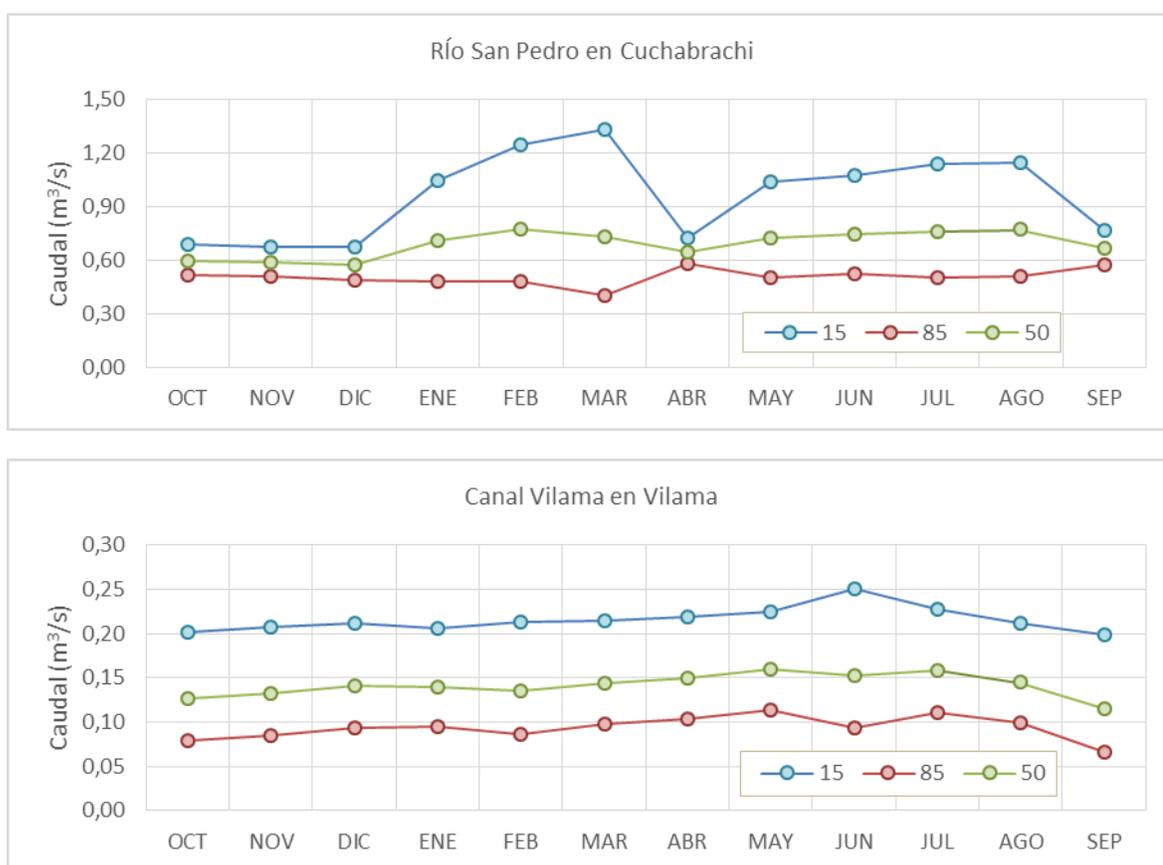


Figura 3-9: Curvas de variación estacional de caudales para distintas probabilidades de excedencia (%).

Fuente: elaboración propia.

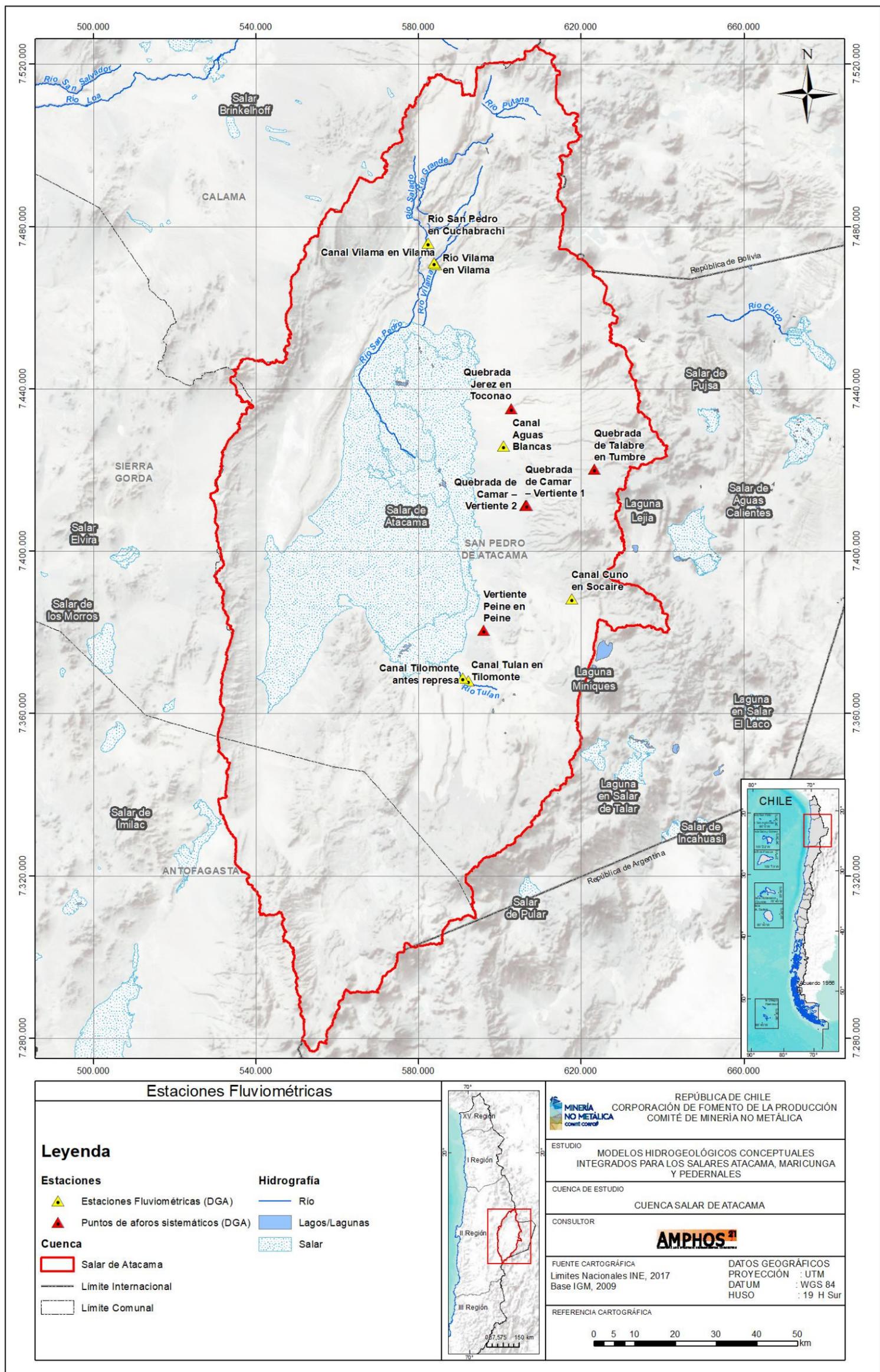


Figura 3-10: Ubicación de estaciones fluviométricas en el área de estudio.

Fuente: elaboración propia.

Código BNA	Nombre estación	Promedio (l/s)	Mínimo (l/s)	Máximo (l/s)
02500011-0	Vertiente Peine en Peine	7,5	1	15
02500009-9	Quebrada de Camar – Vertiente 1	6	1	18
02500010-2	Quebrada de Camar – Vertiente 2	12	2	20
02500008-0	Quebrada de Talabre en Tumbre	12	1	40
02500007-2	Quebrada Jerez en Toconao	60	11	82
-	Quebrada Zapar	7	-	-
-	Quebrada Potor	30	-	-
-	Quebrada Soncor	6	-	-

Tabla 3-7: Caudales aforados en quebradas y vertientes.

Fuente: modificado de SGA (2015).

3.3.4 Evaporación

3.3.4.1 Distribución regional de la evaporación

Se recopiló la curva regional de evaporación media anual en función de la elevación presentada por DGA-DIHA PUC (2009). Esta curva se construyó a partir de información meteorológica disponible en las Regiones XV, I, II y III. En base a dicha información, se determinó la relación presentada en la Figura 3-11. 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.

3.3.4.2 Estaciones con medición de evaporación de tanque

Se recopiló la estadística de evaporación de tanque media mensual en las estaciones meteorológicas públicas ubicadas al sur de la estación Linzor y al norte de la estación Monturaqui. En total se consideraron 15 estaciones públicas, de las cuales 4 se ubican dentro de la cuenca del Salar de Atacama. Por otro lado, se recopiló la estadística reportada por SGA (2015) de mediciones en estaciones privadas ubicadas en el salar. La estación privada Planta SCL cuenta además con mediciones de evaporación de tanque de salmuera que se extrae desde el núcleo del salar.

Código BNA	Nombre Estación	Coordenada este (WGS84)	Coordenada norte (WGS84)	Elevación (m s.n.m.)	Fuente
02104010-K	Chiu-Chiu	537.415	7.529.707	2.524	DGA
02105015-6	Turi	573.367	7.540.311	3.070	
02105016-4	Linzor	600.714	7.541.388	4.100	
02105017-2	Toconce	585.178	7.538.221	3.310	
02105021-0	Caspana	581.126	7.529.664	3.260	
02105022-9	El Tatio	601.585	7.525.730	4.370	
02110013-7	Calama	509.832	7.517.389	2.300	
02112009-K	Coya Sur	435.920	7.523.409	1.250	
02500016-1	Toconao Experimental (*)	602.573	7.435.183	2.500	
02500019-6	Socaire (*)	613.011	7.391.031	3.251	
02500020-K	Peine (*)	596.045	7.380.388	2.460	
02510006-9	San Pedro de Atacama (*)	582.019	7.466.710	2.450	
02660001-4	Monturaqui	557.288	7.307.823	3.430	
02710002-3	Baquedano	414.151	7.419.265	1.032	
02710003-1	Antofagasta	358.510	7.389.614	50	
-	Planta SCL	568.000	7.387.000	2.306	(1)
-	Planta SCL (salmuera)	568.000	7.387.000	2.306	(1)
-	Chaxas SQM	583.000	7.424.000	2.307	(1)
-	Salar SQM	561.000	7.397.000	2.306	(1)

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

Fuente: elaboración propia.

(1): SGA (2015).

(*): Estaciones ubicadas dentro de la cuenca aportante al Salar de Atacama.

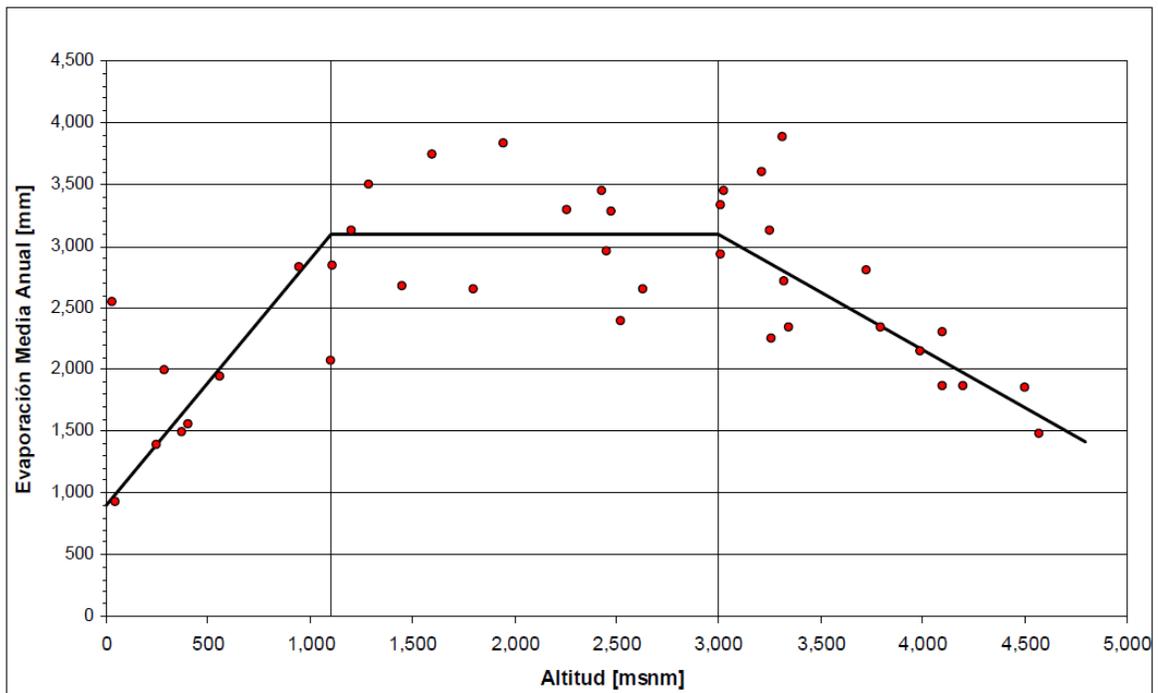


Figura 3-11: Gradiente de la evaporación media anual.

Fuente: DGA-DIHA PUC (2009).

3.3.4.3 Disponibilidad de la estadística

La disponibilidad de la estadística se presenta en la Tabla 3-9. El registro de las estaciones públicas se muestra con una extensión y calidad variables. Las estaciones Turi, el Tatio, Monturaqui, Baquedano y Antofagasta presentan una extensión corta y por tanto se descartan de los próximos análisis, con la excepción de la estación Antofagasta, ya que es la única con registros en la zona costera. Por otro lado, el resto de las estaciones presenta registros más extensos, con al menos 10 años con registros de 12 meses. Considerando esto, el registro en estas estaciones es suficiente para caracterizar la evaporación en la cuenca del Salar de Atacama, ya que esta componente presenta poca variabilidad interanual. Finalmente, el registro en las estaciones privadas se muestra continuo y superior a los 10 años de registro en cada estación, por lo que es posible estimar a partir de estos datos la evaporación de tanque en el salar.

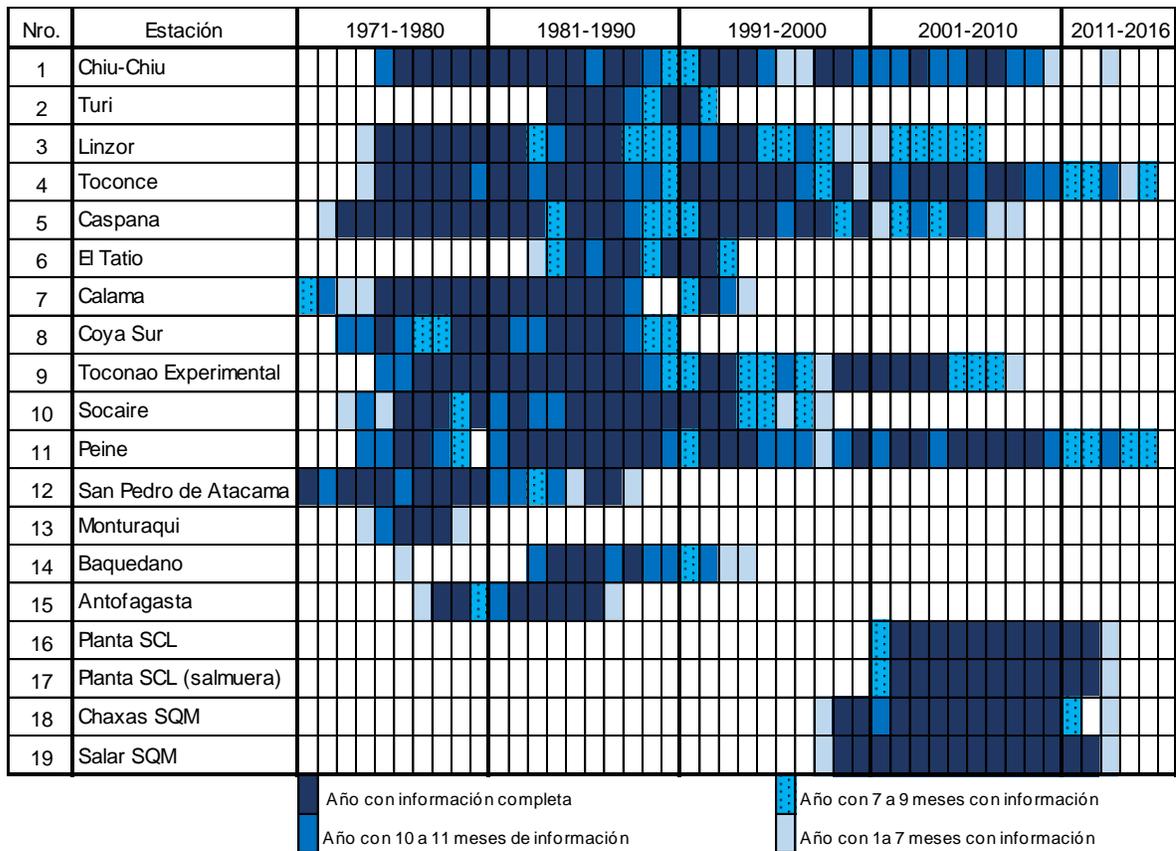


Tabla 3-9: Disponibilidad de información de evaporación de tanque.

Fuente: elaboración propia.

3.3.4.4 Evaporación media

Se calculó la evaporación media mensual en las estaciones consideradas en el estudio, el resultado se muestra en la Figura 3-12, en donde se gráfica la evaporación en cada estación. Se observa claramente la estacionalidad de la evaporación asociada a la incidencia de la radiación solar. Por otro lado, la evaporación en las estaciones de Antofagasta (50 m s.n.m.) y Linzor (4.100 m s.n.m.) son las menores del conjunto de estaciones. Este comportamiento es consistente con la relación regional mostrada en la Figura 3-7 , en donde se aprecia que la evaporación es menor en la parte baja y la parte alta del norte de Chile. Finalmente, la evaporación de la salmuera en la estación Planta SCL es 33% menor aproximadamente que la evaporación de agua fresca medida en la misma estación. Este comportamiento se encuentra descrito en el Balance Hidrológico Nacional de la II región (Peña, 1986), que da cuenta de la disminución en la evaporación asociada a la concentración de la salmuera.

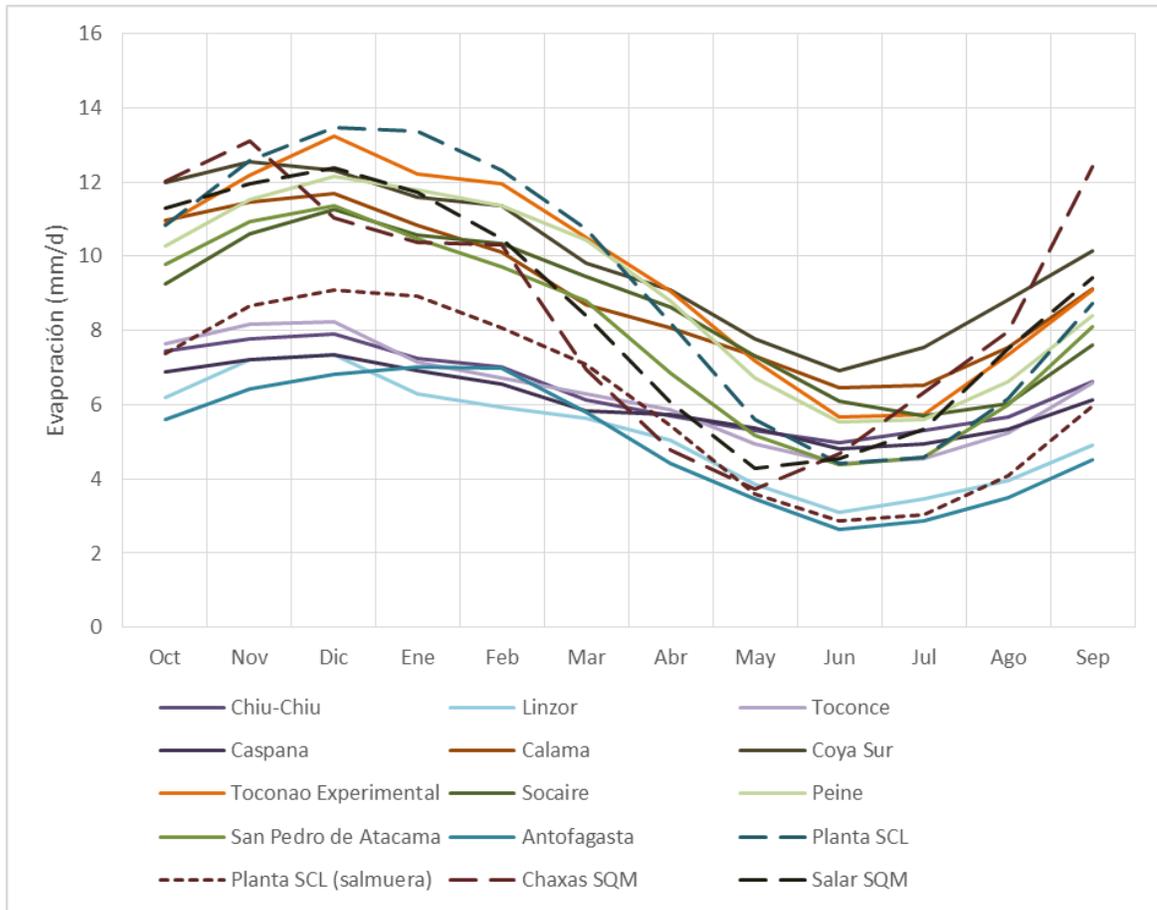


Figura 3-12: Evaporación media mensual en estaciones DGA.

Fuente: elaboración propia.

4. Caracterización geológica

A continuación, se realiza una caracterización geomorfológica y geológica de la Cuenca Salar de Atacama.

4.1 Marco geomorfológico

La Cuenca Salar de Atacama se localiza en la Cordillera Andina, entre las coordenadas 7.275.000-7.525.000 N y las coordenadas 528.700-642.000 E. Tiene una superficie de 17.700 km², con una morfología elipsoidal y con un eje mayor, que coincide con la dirección norte-sur, de aproximadamente 250 km de longitud. La altitud mínima de la cuenca es de 2.100 m s.n.m., mientras que la máxima es superior a 6.200 m s.n.m.

La cuenca está delimitada por morfoestructuras de orientación principalmente norte-sur. Estas se disponen, de oeste a este, en el siguiente orden: Cordillera Domeyko, Llano de la Paciencia, Cordillera de la Sal, Salar de Atacama, Precordillera, Cordillera de los Andes (donde se ubica el arco volcánico actual), el Cordón de Lila al sur (Figura 4-1). A continuación, se describe con detalle cada una de estas morfoestructuras:

- Cordillera Domeyko: forma el margen oeste de la cuenca y se trata de un cordón montañoso de orientación aproximada NNE, cuyo límite oriental es un escarpe que coincide con el sistema de Falla el Bordo. Este cordón montañoso tiene una altura promedio de 3.000 m s.n.m.
- Llano de la Paciencia: depresión con forma elipsoidal de 80 km de largo y 8 km de ancho, La orientación general de esta unidad es NNE, pero hacia el sur de la cuenca discurre principalmente N-S. Se trata de una cuenca endorreica que presenta una altura promedio de 2.300 m s.n.m.
- Cordillera de la Sal: cordón montañoso de orientación NS a NE. Este cordón montañoso se caracteriza por la presencia de grandes pliegues y fallas que generan una estructura anticlinal que presentan una altura promedio de 2.500 m s.n.m.
- Salar de Atacama: depocentro de la cuenca tectónica de forma elíptica y orientación N-S. El salar está constituido por depósitos salinos, que ocupan una superficie de aproximadamente 3.500 km². La altitud media del salar es de 2.300 m s.n.m. El centro del salar se denomina núcleo y la superficie de éste presenta una costra levantada, formada por procesos de evaporación y cristalización de sales en los intersticios del material que cubre la superficie del núcleo, debido a la evaporación de la salmuera subterránea. Algunos autores también denominan al yacimiento evaporítico costra salina. El yacimiento evaporítico

muestra una zonación bien definida, siguiendo el orden de solubilidades de la secuencia de precipitación evaporítica clásica. En el borde este, se da la precipitación de carbonatos, seguida de la de sulfatos hacia el interior del salar, mientras que el núcleo, está formado principalmente por evaporitas cloruradas sódicas.

- Cordillera Occidental: cordón montañoso de orientación N-S que forma el margen este del Salar de Atacama. Tiene una disposición inclinada aproximadamente de 2° a 5°W y alcanza alturas promedio de 3.500 m s.n.m. Aparece cubierta por depósitos piroclásticos y de abanicos aluviales en su base.
- Arco volcánico actual: cordón montañoso de orientación N-S que conforma el borde este de la cuenca de Atacama y que se corresponde con el arco volcánico actual. Presenta una topografía irregular con una altura media de 4.200 m, aunque la cumbre de los volcanes actuales es próxima a 6.000 m s.n.m.
- Cordón de Lila: cordón montañoso de orientación N-S que conforma el sur de la cuenca y limita parte del borde sur del salar. Constituye un bloque tectónico alzado con altura promedio de 3.200 m s.n.m., que hacia el norte descende en altura hasta desaparecer en el Salar de Atacama. Su relieve es abrupto, cortado por numerosas quebradas de orientación NW y NE.

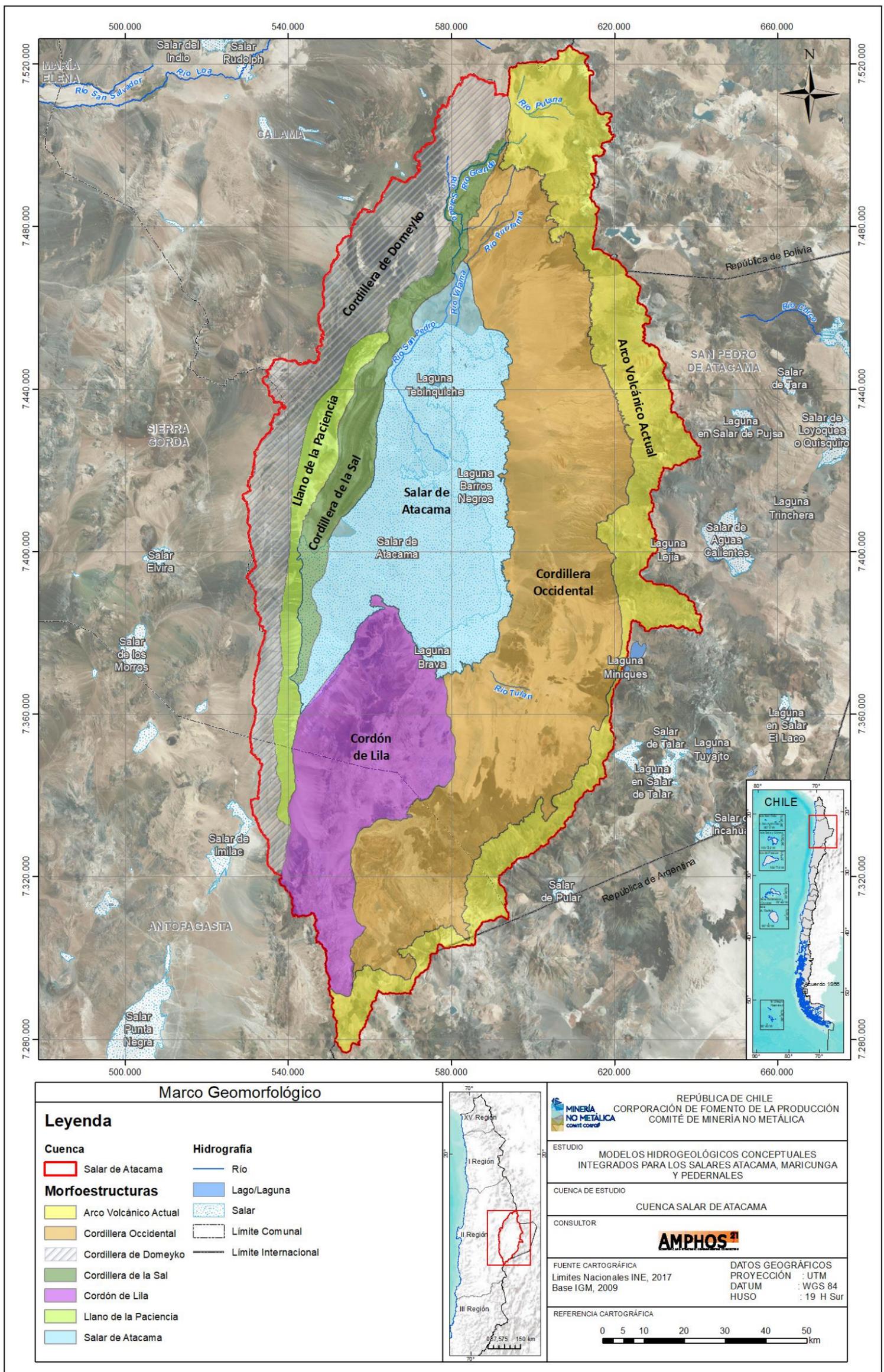


Figura 4-1: Morfoestructuras presentes en la zona de estudio.

4.2 Marco geológico

En el presente capítulo se describe el marco geológico histórico de la cuenca del Salar de Atacama, las características litológicas de los diferentes suelos y rocas que afloran, los dominios estructurales, así como las fallas, pliegues más importantes y columnas estratigráficas representativas.

La cuenca del Salar de Atacama es parte de la Cordillera de los Andes, cuyo origen es la subducción de la placa oceánica de Nazca bajo el continente Sudamericano. La cuenca viene delimitada en su margen oeste por la Cordillera Domeyko y en su margen este por la Cordillera de los Andes (Figura 4-2). Se trata de una cuenca tectónica endorreica, caracterizada por la actividad volcánica y por la generación de grandes depósitos salinos.

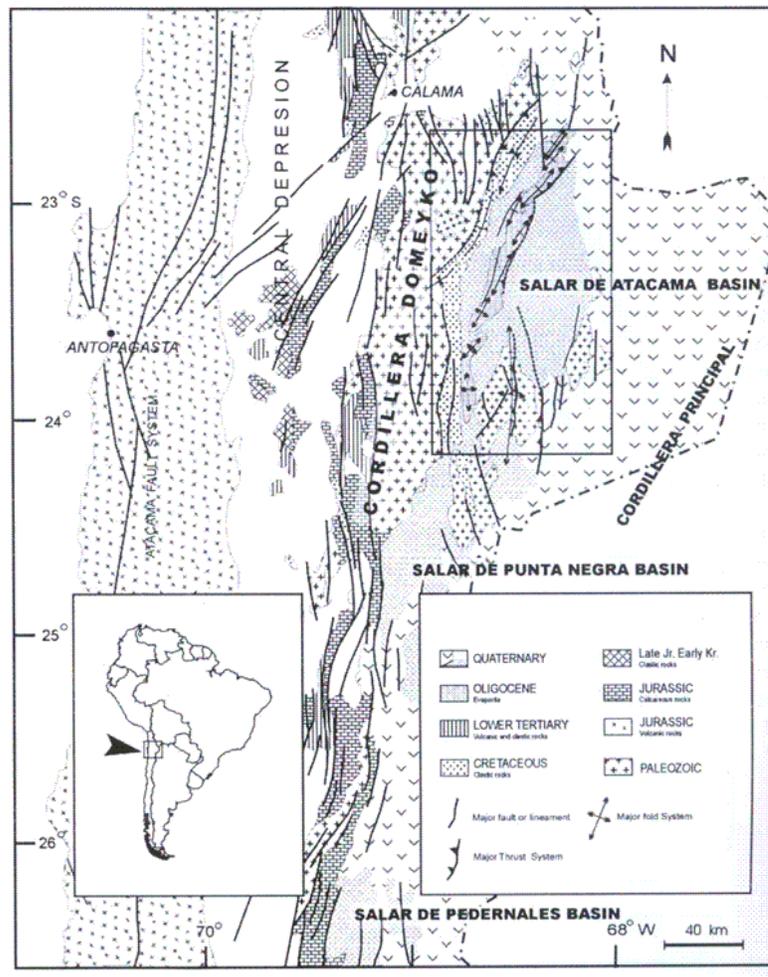


Figura 4-2: Grandes unidades geológicas que delimitan la cuenca del Salar de Atacama.

A continuación, se describen los diferentes eventos que han sucedido para la formación de la cuenca, desde más antiguo hasta la actualidad.

Los materiales más antiguos que afloran en la Cuenca de Atacama se sitúan en el Cordón de Lila y son intrusivos del Paleozoico Inferior. Sobre los intrusivos y de manera discordante se depositó una secuencia sedimentaria marina somera durante el Devónico Superior y el Carbonífero Inferior. Desde el límite Carbonífero-Pérmico se produce otro evento intrusivo en el Cordón de Lilia que está asociado a una primera fase tectónica compresiva que genera la deformación y metamorfismo de los materiales antes descritos. Todas estas formaciones rocosas, corresponden a un prisma de acreción formado desde el Paleozoico hasta el Triásico, en el borde del supercontinente Gondwana y un arco magmático, ambos ligados a subducción (Mpodozis y Ramos, 1990, A_REF.028).

Desde finales del Pérmico hasta el Triásico se produce una segunda etapa de deformación, asociada a un volcanismo intenso y a eventos intrusivos. Producto de esta deformación se produce el levantamiento y erosión del arco magmático que genera secuencias sedimentarias, intercaladas con otras volcánicas, ambas de gran potencia. Estos materiales se depositan inicialmente en un ambiente lacustre y evolucionan a un ambiente continental.

A partir del Triásico Superior se produce una nueva etapa de plegamiento y una fuerte subsidencia que genera una regresión marina, favoreciendo inicialmente la generación de grandes espesores de rocas volcánicas, con intercalaciones de rocas sedimentarias y posteriormente potentes secuencias sedimentarias de ambiente transicional. Asociado a este periodo de tiempo se han datado intrusiones graníticas.

Durante el Jurásico Superior al Cretácico Medio se inicia el ciclo tectónico andino, que dura hasta la actualidad y produce un cambio en la dirección y ángulo de subducción y la aceleración de la misma.

Durante el Cretácico Medio se produce una etapa compresiva que genera el plegamiento de los materiales y que se denomina Orogenia Peruana (Steinmann, 1929).

Entre el Cretácico Superior y el Paleoceno se produce un evento intrusivo, principalmente de tipo ácido, que va asociado a la generación de fallas inversas y pliegues. Adicionalmente, en el límite Paleoceno-Eoceno se vuelve a generar un ciclo volcánico y erosivo.

En eventos posteriores, en el límite Eoceno-Oligoceno comienza la Orogenia Incaica (Steinmann, 1929), que genera los rasgos morfoestructurales que caracterizan la cuenca del Salar de Atacama: Cordilera Domeyko, Cordón del Lila, Cordillera Occidental y Arco volcánico actual.

Posteriormente, entre el Oligoceno Superior y el Mioceno Inferior los procesos que dominan la cuenca son erosivos, generando grandes secuencias continentales de tipo piedemonte y de cuencas salobres. Estas secuencias, durante el Mioceno Medio-Superior, sufrieron un proceso de plegamiento y alzamiento mediante fallas inversas, y dieron como resultado la Cordillera de la Sal y

el Llano de la Paciencia. De manera coetánea, a estos episodios tectónicos, se produjeron depósitos salinos y evaporitas, que son tan característicos de esta cuenca, así como depósitos lacustres. Esta fase compresiva, es seguida por una fase distensiva durante el Plioceno, caracterizada por sistemas de fallas normales de dirección N-S, NW-SE y NE-SW, que controla la distribución de los volcanes, principalmente en el borde este del salar y la formación de estructuras tipo graben, mayoritariamente en el sur del salar.

Asociados a la última etapa descrita y hasta el Pleistoceno se producen eventos volcánicos que generan depósitos de gran extensión de materiales piroclásticos (ignimbritas), que se intercalan con los depósitos salinos y evaporitas, y cuerpos volcánicos. Sobre algunos de estos conjuntos volcánicos se produce una fuerte erosión que da lugar a depósitos morrénicos y periglaciares, que se distribuyen sobre los 4.000 m s.n.m.

Desde el Mioceno hasta el Holoceno, se desarrollan depósitos no consolidados, que se distribuyen principalmente en la base de las grandes morfoestructuras, depósitos y costras salinas en el Salar de Atacama y se termina la configuración actual de la red de drenaje, con excavación de profundas quebradas. Todos estos procesos se desarrollan mientras continúa la actividad volcánica.

4.3 Unidades geológicas

En este capítulo, se hace una pequeña descripción de las unidades geológicas que afloran en la cuenca del Salar de Atacama, diferenciando las unidades geológicas que constituyen depósitos no consolidados, rocas estratificadas y rocas intrusivas.

Las hojas geológicas que se han consultado son las siguientes:

- Hoja de Calama (Manirovic y Lahsen, 1984, A_REF.068)
- Hoja de Toconao (Manirovic y Lahsen, 1984, A_REF.069).
- Hoja de Antofagasta B (Boric, Díaz y Makshev, 1987, A_REF.090).

En la Figura 4-3 se presentan las cartas geológicas anteriores digitalizadas para el presente proyecto y en la Figura 4-4 la leyenda.

Para facilitar la descripción y la visualización de las unidades geológicas que ha incluido una letra, delante del código, que indica la hoja geológica a la que pertenece. Así, para la hoja de Calama se utilizará el prefijo (C), para la hoja de Toconao (T) y para la hoja de Antofagasta B (A).

4.3.1 Depósitos No Consolidados

Los depósitos no consolidados, dentro de la cuenca del Salar de Atacama, corresponden a depósitos detríticos, principalmente de origen fluvial, los cuales conforman extensos piedemontes (depósitos aterrazados) y llanuras (depósitos aluviales) y, en forma secundaria, de origen volcánico (piroclastos), glacial (morrenas), eólicos (dunas) y lacustres. Se localizan bordeando el Salar de Atacama, en las quebradas y en las áreas deprimidas.

Estos depósitos son datados desde el Mioceno hasta el Holoceno y dentro de ellos podemos distinguir las siguientes unidades:

- (C) MPIt, (T) TQt : depósito aterrazado. Presenta un espesor máximo de 20 m. Se data del Mioceno Superior al Plioceno.
- (C) Ql, (T) Qlc: depósitos lacustres, formados en cuencas intermontana, con marcado control estructural. Se datan del Pleistoceno Superior al Holoceno.
- (C) Qp, (T) Qp: depósitos piroclásticos formados por gravas y arenas finas con matriz arcillosa e intercalaciones de cenizas, lapilli, bloques y escorias.
- (C) Qm, (T) Qm: depósitos morrénicos tanto de morrenas laterales, como terminales y sedimentos periglaciares. Se datan del Pleistoceno Superior.
- (C) Qal, (T) Qal: depósitos aluviales de potencias de varios metros.
- (C) Qe, (T) Qe: depósitos eólicos formados por dunas que se generaron por vientos de dirección, principalmente, oeste a noroeste.
- (T) Qc: depósitos coluviales generados por gelifración en las faldas de los volcanes.
- (T) Qla: depósitos laháricos.

En la Hoja de Antofagasta, los depósitos no consolidados corresponden a (A) TQal y son sedimentos aluviales, coluviales y eólicos formados desde el Mioceno al Holoceno.

4.3.2 Rocas Estratificadas

Las rocas estratificadas de la cuenca Salar de Atacama, abarcan desde el Devónico hasta el Holoceno, un periodo superior a 380 millones de años. A continuación, se enumeran y se describen de más antiguas a más modernas.

Fm. Lila: (T) Pzl, (A) Dcs

La Fm. Lila está constituida por una secuencia sedimentaria y metasedimentaria formadas por areniscas, lutitas, metarenitas, pizarras con intercalaciones de calizas, conglomerados y chert. También se han encontrado intercalaciones de andesitas fuertemente alteradas.

El ambiente de formación corresponde a un ambiente marino, de aguas someras, bajo el tren de las olas. La edad de esta formación está comprendida entre el Devónico y el Carbonífero Inferior.

Esta formación aflora en el Cordón de Lila, al sur del Salar de Atacama, presentando un espesor próximo a los 2.000 m. Se dispone de manera discordante sobre las rocas del Paleozoico Inferior.

Fm. Cas: (T) PzTrc, (A) Ctv

La Fm. Cas es una secuencia fundamentalmente volcánica formada por andesitas y dacitas, brechas volcánicas y tobas. Esta formación data del Pérmico al Triásico.

Esta formación aflora en la zona central de la Cordillera Occidental, desde la Quebrada de Aguas Blancas hasta la Pampa Tinajas. La distribución de los afloramientos es predominantemente N-S y presenta un espesor máximo de 250 m.

Fm. Peine: (T) PzTrp(a,b,c), (A) Ctv

La Fm. Peine es una secuencia de rocas sedimentarias y rocas volcánicas de composición andesítica. La edad de esta formación comprende desde el Paleozoico Superior al Triásico. Se diferencian 3 unidades:

- Miembro Inferior: andesitas y brechas andesíticas. Espesor máximo 170 m. Presentan alteración de sericita, calcita, clorita, hematita y opacos que indican un metamorfismo de carga de bajo grado.
- Miembro Medio: alternancia de lutitas y areniscas. Espesor máximo 200 m.
- Miembro Superior: tobas con alteración sericítica, con areniscas y conglomerados en su base. Potencia máxima 260 m.

El ambiente de formación de esta secuencia es continental. Esta unidad se puede correlacionar estratigráficamente con los Estratos El Bordo, que afloran en la Cordillera Domeyko.

En el área de estudio esta formación aflora en la cresta del Cordón del Lila.

Estratos el Bordo: (C) PzTreb, (T) PzTreb

Los Estratos el Bordo es una secuencia sedimentaria formada por areniscas y lutitas con intercalaciones de tobas y andesitas. En estos estratos se ha encontrado fauna y flora fósil, a partir de los cuáles ha sido posible datar esta formación entre el Paleozoico superior (sin determinar) y el Pérmico. El ambiente de formación es continental en lagos restringidos, bajo un clima templado-tropical.

La unidad Estratos el Bordo se presenta en pequeños afloramientos en el borde W de la cuenca. Concretamente aflora en la Cordillera Domeyko, entre la Quebrada Agua Salada y la Quebrada de los Guanacos. Presenta un espesor máximo de 200 m.

Fm. Tuina: (C) Pt

Se trata de una secuencia continental formada por rocas volcánicas y sedimentarias, afectadas por intenso fallamiento y plegamiento. Se distinguen 3 miembros:

-Miembro inferior: secuencia volcánica compuesta por andesitas y brechas de composición andesítica que presentan alteración por epidota.

-Miembro medio: secuencia estratificada de ambiente continental que presenta un espesor entre 110 y 140 m. Está formado principalmente por areniscas, lutitas y tobas.

-Miembro superior: secuencia volcánica formada por andesitas con intercalaciones de dacitas, tobas y areniscas.

En el área de estudio aparece en un pequeño afloramiento en el borde W de la cuenca de la Hoja de Calama, en la Cordillera Domeyko y también, al norte de la Quebrada Agua Salada. El espesor máximo de esta unidad es de 2.500 m.

Las Fm. Peine, Estratos el Bordo, la Fm. Tuina y la Fm. Cas son correlacionables estratigráficamente.

Fm. Agua Dulce: (T) TrJad

La Fm. Agua Dulce es una secuencia volcánica formada por andesitas, brechas andesíticas, tobas y conglomerados, que sobreyace en discordancia angular sobre los Estratos el Bordo. Se depositó en un ambiente continental y de volcanismo activo, con breves periodos de deposición sedimentaria.

Esta unidad aflora en la Cordillera de Domeyko, más concretamente, en el Cerro Quimal y al sur de Loma Amarilla, presentando un espesor máximo de 1.600 m. Se data del Triásico Superior a Jurásico Inferior.

Fm. Cerros Negros: (T) TrJcn, (A) Tvs

La Fm. Cerros Negros es una secuencia volcánica de composición andesítica, con escasas intercalaciones de areniscas y lutitas arenosas. Las rocas volcánicas presentan alteración (sericitización) que corresponde aun metamorfismo de contacto.

En el área de estudio esta formación aflora en la parte norte del Cordón de Lila y al sureste del Salar de Atacama en la franja de la Precordillera, con un espesor de 220 m. Se dispone en discordancia angular sobre la Fm. Peine y se data del Triásico al Jurásico Inferior.

Fm. Purilactis: (C) KP, (T) JKp, (A) Kss y (A) Tiv

La Fm. Purilactis es una secuencia sedimentaria cuyo espesor máximo alcanza los 4.000 m disminuyendo hasta los 250 m hacia el este. Esta formación se ve afectado por pliegues y fallas a nivel regional. En dicha formación se distinguen 3 miembros:

-Miembro inferior: secuencia de ambiente de transición (continental-marino) y clima semiárido-árido, formada por areniscas, lutitas y lutitas yesíferas.

-Miembro medio: secuencia continental formada por areniscas, lutitas con intercalaciones de yesos y halitas y conglomerados.

-Miembro superior: secuencia continental formada por conglomerados, areniscas y lutitas con intercalaciones andesíticas.

Tanto el Miembro medio, como el superior se generaron en ambientes continentales de tipo aluvial y lacustre, en un clima seco-semiárido, con lluvias esporádicas y torrenciales. Los aportes de estos sedimentos provienen del oeste y noroeste.

Estas rocas afloran a lo largo de la toda la Cordillera Domeyko, formando el Borde W de la cuenca del Salar de Atacama. Se dispone sobre las Estratos El Bordo y la Fm. Tuina en discordancia angular. Se data desde el Jurásico Superior al Cretácico.

Esta unidad se puede correlacionar, por el periodo en que se formó, con la unidad Tiv de la Hoja de Antofagasta, que se data en el Cretácico Superior al Eoceno; la cual está formada por rocas volcánicas y subvolcánica: lavas, tobas, aglomerados, brechas y pórfidos dacíticos y riolíticos con alguna intercalación sedimentaria.

Mpodozis, en 2005, redefine la Fm. Purilactis, llamándola Grupo Purilactis e integrando dentro de este a las formaciones Tonel, Barros de Arana y Totola, asignándole a todo el grupo una edad Cretácico al Paleoceno.

Estratos Queque: (T) Tq, (A) Tis

Los Estratos Queque son una secuencia sedimentaria formada por areniscas, conglomerados y limolitas, en una cuenca continental, con corrientes de agua esporádicas.

En el área de estudio esta formación aflora en la Cordillera Occidental, entre las quebradas Hécar y Lánquir, con un espesor variable entre 500 y 1.500 m.

Esta unidad es correlacionable estratigráficamente con la Fm. Purilactis.

Fm. Cinchado: (T) Tic

La Fm. Cinchado es una secuencia continental compuesta por conglomerados, ignimbritas y brechas andesíticas.

En el área de estudio, esta formación aflora a en la zona central de la Cordillera Domeyko, en discordancia angular sobre la Fm. Purilactis, con un espesor entre 800 y 400 m. La edad de esta unidad es el Eoceno.

Fm. Tambores: (C) Tt, (T) Tt, (A) TSc

La Fm. Tambores es una secuencia continental, de tipo aluvial-piedemonte con esporádicas corrientes fluviales. Representan los depósitos generados por el alzamiento y erosión que se produjo durante el Terciario medio, distinguiéndose paleocorrientes desde el W. Se trata de paraconglomerados y areniscas mal consolidadas y en parte cementadas por calcita o sal. La edad de esta unidad va desde el Oligoceno al Mioceno.

Esta formación aflora a lo largo de la toda la Cordillera Domeyko, formando el Borde W de la cuenca del Salar de Atacama, con espesor variable entre 500 y 280 m. Se dispone sobre la Fm. Purilactis en discordancia angular.

Se puede correlacionar con la Fm. San Pedro y sobreyace en discordancia angular a las Ignimbritas.

Fm. San Pedro: (C) Tsp, (T) Tsp

La Fm. San Pedro es una secuencia sedimentaria de origen continental, formada por arcillas yesíferas, areniscas, conglomerados y potentes mantos de sal y yeso. Esta formación data desde el Oligoceno al Mioceno Inferior disponiéndose discordante sobre los materiales del Cenozoico inferior.

En el área de estudio, esta formación constituye a la Cordillera de la Sal y presenta una disposición aproximada NS que hacia el norte cambia a NE. Se trata de un sinclinal, delimitado por fallas. Constituye el margen W del salar y aflora en el extremo norte de la Cordillera de la Sal y el extremo NW del Llano de la Paciencia. Presenta un espesor de 2.100 m.

Se formó en una cuenca salobre con aportes detríticos en forma de avalanchas, en un ambiente oxidante, en similares condiciones a las del salar actual. Se cree que la mayor parte de los sedimentos provienen de la erosión de la Fm. Purilactis.

Mpodozis, en 2005, define al Grupo Paciencia incluyendo en él la Fm. San Pedro y la Fm. Tambores, ambas coetáneas y datadas en el Oligoceno-Mioceno Inferior.

Fm. El Campamento: (C) Plpp (T) MsQec

La Fm. Campamento es una secuencia continental formada por tobas lenticulares, con sal y yeso, y paraconglomerados (compuestos por abundantes clastos de yeso, matriz limosa y yeso pulverulento).

Esta formación aflora en los núcleos de los sinclinales de la zona central de la Cordillera de la Sal, con un espesor de unos 15 m, que se dispone de manera discordante sobre la Fm. San Pedro. Se data del Mioceno Superior al cuaternario.

Ignimbritas: (C) Msc, (C) Msa, (C) Mss, (C) Msyb, (C) Msp, (C) Mst, (C) Plp, (C) Plpg, (C) PIQc, (C) Qca, (C) Qt, (C) Qc, (T) MsPlp, (T) MsPlt, (T) MPlab, (T) Pla, (T) Pltc, (T) Plp, (T) Pc, (T) Qt., (A) TQv.

En el área de estudio las ignimbritas son un conjunto de rocas piroclásticas formadas mayoritariamente por tobas soldadas de composición andesítica, dacítica y riolítica, que se disponen formando extensas mesetas inclinadas entre 3 y 5° al oeste, de forma general, de manera discordante sobre formaciones más antiguas de la Cordillera Occidental y el Arco volcánico actual y bajo los depósitos de los sedimentos del salar. En ocasiones, pueden llegar a alcanzar la Cordillera Domeyko (oeste del salar), pero en esos casos, el espesor es pequeño. Las ignimbritas rellenan, también, antiguas quebradas y depresiones o están adosadas a relieves positivos. El espesor de estos depósitos varía desde decenas de metros, alcanzando en ocasiones el centenar de metros.

Las ignimbritas están relacionadas con episodios volcánicos, de tipo explosivo, intensos que se produjeron durante el Mioceno, el Plioceno y el Pleistoceno, en la Cordillera Occidental y en el Arco volcánico actual.

Volcanes: (C) Mv, (C) PIQv(1,2), (C) Qv(1,2), (T) Msv, (T) Plpi(a,b), (T) Plv, (T) Plpv, (T) Ptv, (T) PiPv, (T) Qv, (A)TQv

En el sector de la Cordillera de los Andes se distribuyen numerosos centros volcánicos, que han dado lugar a estrato-volcanes andesíticos y dacíticos, domos y lava-domos dacíticos y en menor cantidad riolíticos. Se disponen en una cadena de dirección N-S, principalmente, y ésta es intersectada por otras cadenas volcánicas de disposición NW-SE. Estos materiales volcánicos se disponen discordantes sobre la Formación San Pedro y se intercalan con las ignimbritas. Se han diferenciado 4 conjuntos:

- Conjunto de Volcanes I: Edificios volcánicos fuertemente erosionados que corresponden al Mioceno Inferior-Mioceno Superior.
- Conjunto de Volcanes II: Edificios volcánicos moderadamente erosionados, afectados por erosión glacial que corresponden al Plioceno-Pleistoceno Inferior.
- Conjunto de Volcanes III: Edificios volcánicos poco erosionados y desarrollados, en parte, después de la última glaciación, que corresponden al Pleistoceno-Holoceno.

En la Hoja de Antofagasta, la unidad (A) TQv se puede correlacionar con las unidades de ignimbritas y de volcanes. Esta unidad se data del Mioceno al Holoceno y está compuesta por rocas volcánicas, principalmente, que se correlacionan con la unidad Volcanes de las Hojas de Calama y Toconao, y en menor medida con ignimbritas soldadas, que se correlacionan con la unidad Ignimbrita de las Hojas de Calama y Toconao. Su disposición es la Cordillera Occidental y el Arco volcánico actual. En este caso las rocas volcánicas son de composición andesítica, basáltica, dacítica y riolítica.

Fm. El Tambo: (T) TQet)

La Fm. Tambo es una secuencia sedimentaria de calizas y calizas arenosas que rellenan paleocanales. Se data del Plioceno-Pleistoceno. Su ambiente deposicional coincide con aguas subterráneas, ricas en carbonato cálcico, mezcladas, en forma esporádica, con aguas superficiales, que arrastraron materiales terrígenos.

En el área de estudio, esta formación aflora al SE del Salar de Atacama, en la Cordillera Occidental. Se disponen en discordancia erosiva sobre las ignimbritas del Mioceno, con un espesor máximo de 10 m.

Fm. Vilama: (C) Qvi, (T) MsQv)

La Fm. Vilama Se trata de una secuencia sedimentaria formada por areniscas y limolitas y conglomerados, con intercalaciones de tobas y niveles calcáreos. Se data en el Pleistoceno y se dispone de manera discordante sobre las formaciones más antiguas. Estos depósitos se han generado en un ambiente lacustre de aguas poco profundas y tranquilas, próximas a un área con actividad volcánica.

Esta formación se distribuye en el extremo norte de la Cordillera de la Sal, en la vertiente oriental de la Cordillera Domeyko y en el extremo W de la Cordillera Occidental.

Depósitos salinos: (C) Qs, (T) Qcl, (T) Qs, (T) Qtcl, (T) Qsl, (T) Qcls, (T) Ql)

Esta unidad está formada por depósitos salinos que forman parte del relleno sedimentario de cuencas endorreicas y constituyen salares. Se describen principalmente en la Hoja de Toconao. Se datan en el Holoceno.

Estos depósitos forman la cubierta evaporítica y se dividen en función de su aspecto físico, composición química y mineralógica, entendiéndose que los límites entre cada subunidad son transicionales. Esta costra, limita con los depósitos detríticos del borde del salar, mediante cambios laterales de facies. Las diferentes subunidades son:

- Ql: limos salinos indiferenciados. Se ubican en los márgenes de los salares, formando extensos depósitos de limos y arcillas, con alto contenido salado.
- Qcls: costra salina de cloruros y sulfatos. Están formadas, principalmente, por halita y yeso. Aspecto pulverulento.
- Qsl: costra salina de sulfatos con limos.
- Qs: costra salina de sulfatos. Esta subunidad está formada principalmente por yeso y presenta superficies lisas. Aspecto pulverulento y granular.
- Qtcl: costra salina de transición a cloruros.

- Qcl: costra salina de cloruros. Esta subunidad forma el centro del salar y presenta superficies rugosas, donde se desarrollan montículos de hasta 70 cm de altura. Esta costra es dura, con intenso fracturamiento.

4.3.3 Rocas Intrusivas

En este apartado se incluyen tanto las rocas plutónicas como subvolcánicas. Las unidades plutónicas se distribuyen casi exclusivamente en la Cordillera Domeyko y en el Cordón de Lila, mientras que las subvolcánicas sólo se reconocen en la Cordillera de los Andes. En la Cordillera Domeyko, los plutones son principalmente de composición granodiorítica y granítica e intruyen a las formaciones mesozoicas; mientras que, en el Cordón de Lila, las rocas intrusivas son de composición granítica, granodiorítica y tonalítica y subyacen a las formaciones paleozoicas y mesozoicas, éstas a su vez son intruídas por plutones terciarios graníticos, granodioríticos, dioríticos y por pórfidos graníticos. Asociados a estos intrusivos, existen zonas de alteración hidrotermal.

Para una mejor comprensión se diferencian las unidades según su datación.

Paleozoico: (C) Tgd, (T) Pzt, (T) Pzig, (A) Osg.

- Granitos del Paleozoico Inferior del Cordón del Lila (T) Pzig, (A) Osg: En el flanco oriental del Cordón de Lila, afloran dos cuerpos intrusivos graníticos, separados entre si por una falla de dirección NNW. El intrusivo al norte de la falla es un granito de feldespato alcalino con alteración hidrotermal sericítica, mientras que el intrusivo al sur de la falla es un granito de feldespato potásico con alteración hidrotermal tipo clorita. A estos intrusivos se les data entre el Ordovícico y el Silúrico.
- Tonalitas del Cordón de Lila (T) Pzt, (A) Osg: En el flanco occidental del Cordón de Lila un extenso batolito tonalítico, formando un cuerpo alargado de dirección NNE, que presenta alteración hidrotermal de tipo clorita-actinolita-epidota. Se data del Carbonífero Superior - Pérmico Inferior.
- Intrusivo (A) Ktg: Intrusivo formado por granitos, granodioritas y tonalitas, que aflora en dos cuerpos al sur del Cordón de Lila. Se data del Triásico Superior al Jurásico Inferior.
- Pórfido Granodiorítico de Camar: (T) Tgd: Pórfidos de composición granodiorítica con alteración hidrotermal de tipo sericítica. Afloran en pequeños cuerpos en la Cordillera Occidental, cerca de la Quebrada Camar y Soncar. Estos cuerpos intruyen a la Fm. Cas. Se datan del Pérmico-Triásico.

Cretácico

- Granitoides Cretácios (T) Kgd, (T) Kg, (T) Kmc, (A) CTg: Intrusivo formado por granitos, granodioritas, tonalitas y dioritas cuarcíferas, que forma el flanco suroccidental y el norte del

Cordón de Lila, con una disposición NNE. También aflora en pequeños cuerpos en la Cordillera Occidental. Según la Hoja de Toconao se data en el Cretácico, mientras que la Hoja de Antofagasta lo data en el Carbonífero Superior al Triásico Medio.

Cretácico-Terciarios

- Granodiorita Santa Rosa (C) KTgds: Afloramiento de pequeño tamaño formado por granodiorita que se encuentra en la Cordillera Domeyko, en la parte NW de la zona de estudio, y que intruye a la Fm. Purilactis y la Fm. Tuina.
- Lamprófiros Purilactis (C) KTip: Stock y filones centimétricos de hasta 20 m, con dirección NS y NNE que afloran en la Cordillera Domeyko, en la parte N del área de estudio y cerca de la Quebrada Los Condores. Estas rocas intruyen a la Fm. Purilactis.
- Pórfidos Graníticos Cretácico-Terciarios de la Cordillera de Domeyko (T) Kg, (A) Osg: Son pórfidos de composición granítica, riódacítica, cuarcífera, riolítica y granítica alcalina. Afloran en la Cordillera de Domeyko y en el flanco oriental del Cordón de Lila. Estas rocas intruyen a la Fm. Peine, al Grupo Caracoles y a la Fm. Purilactis.

Mio-Pliocenos (T) MPlab, (T) Mpld, (T) MPlap

Durante el Mioceno-Plioceno, dentro del área de estudio, más concretamente en la parte central de la Cordillera de los Andes, se desarrollaron unos cuerpos subvolcánicos de textura porfídica y composiciones desde riolíticas a andesíticas. Estos cuerpos intruyen a la unidad Volcanes I. Se distinguen según su composición en: Pórfidos dacíticos (MPld), Pórfidos andesíticos de piroxeno y/u hornblenda (MPlap) y Pórfidos andesíticos de biotita y hornblenda (MPlab).

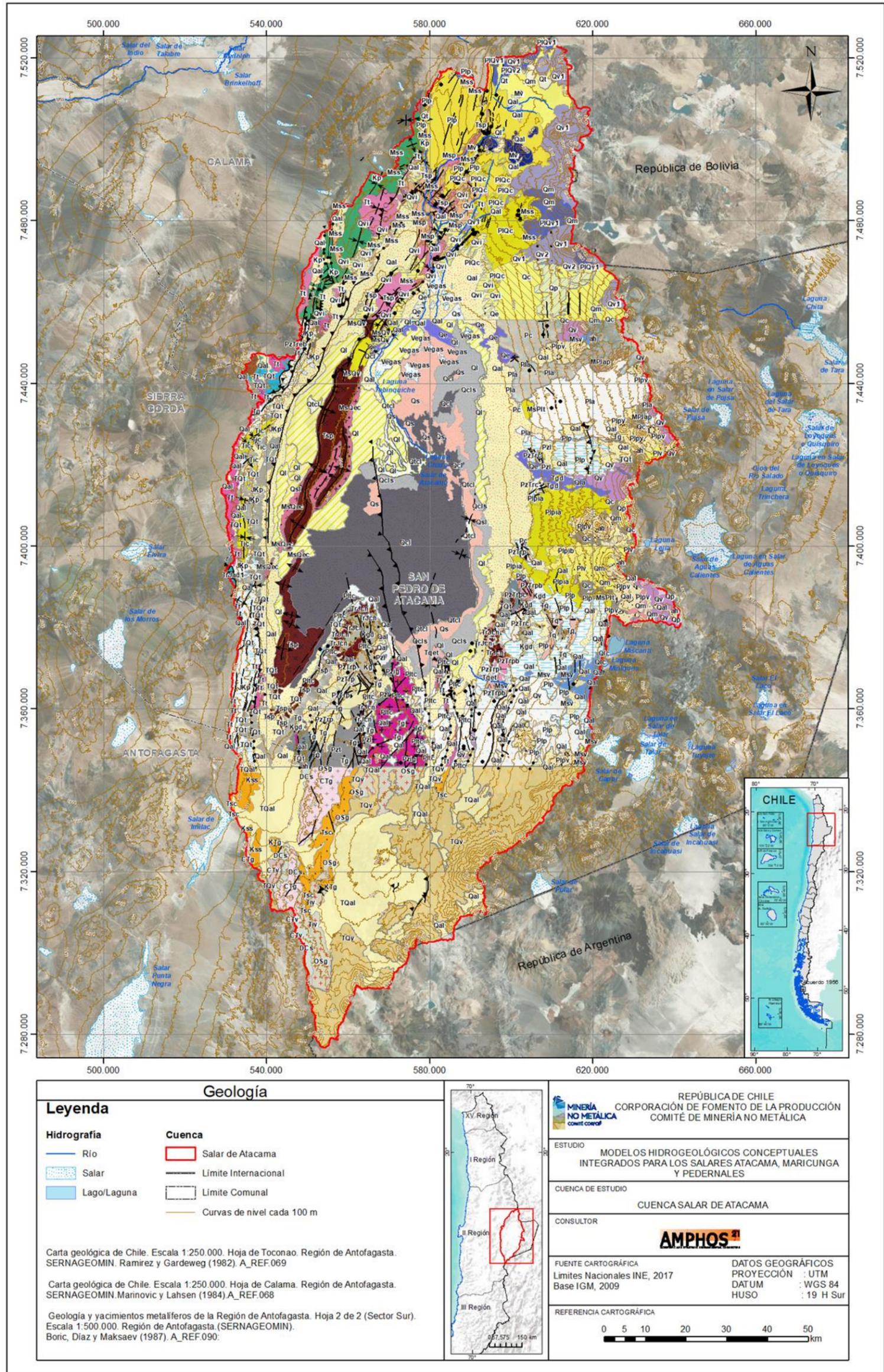


Figura 4-3: Geología cuenca Salar de Atacama.

Fuente: elaboración propia a partir de referencias citadas.

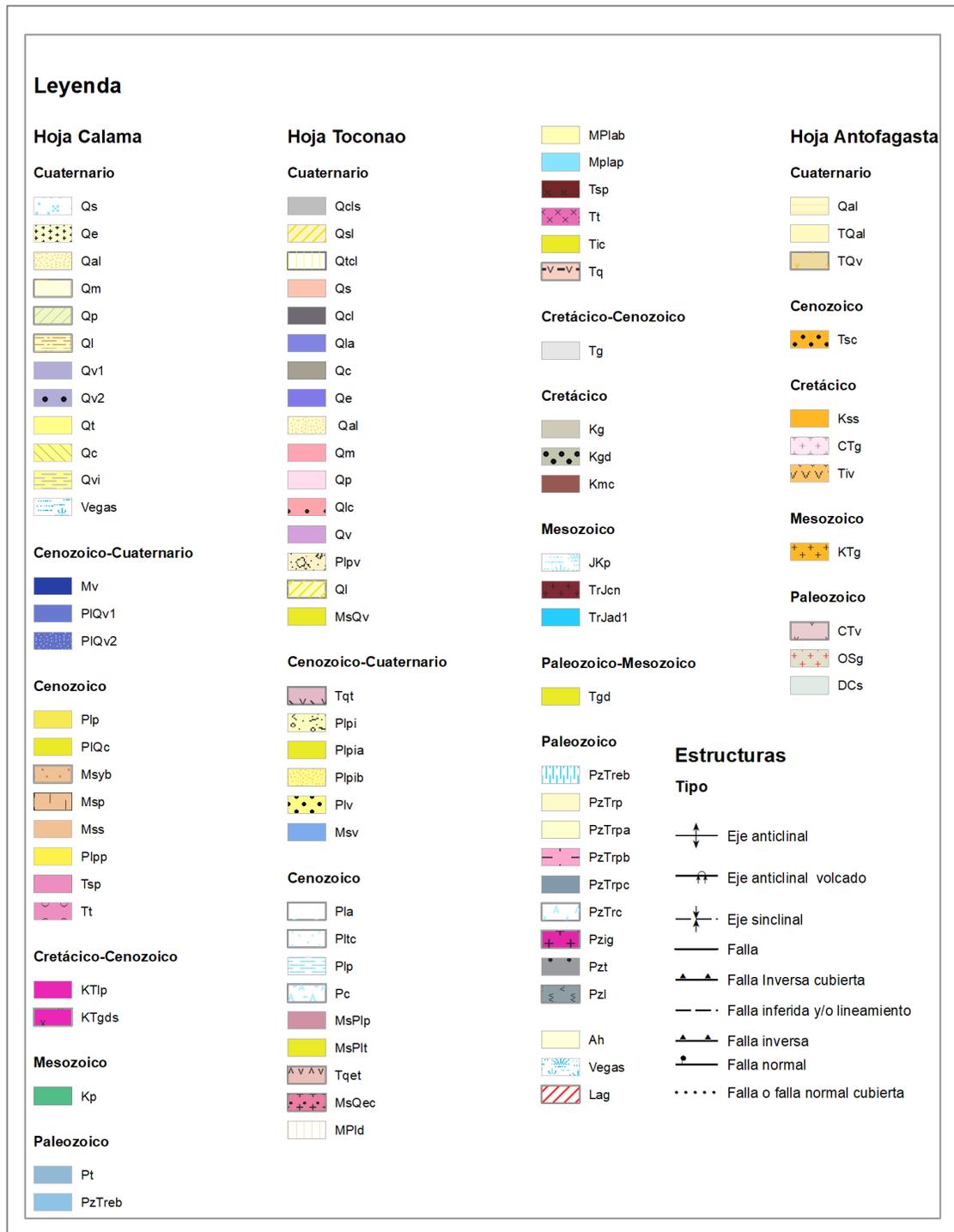


Figura 4-4: Leyenda del mapa geológico de Cuenca Salar de Atacama (Figura 4-3).

Fuente: elaboración propia a partir de referencias citadas.

4.4 Geología Estructural

Los elementos estructurales que se observan en la Cuenca del Salar de Atacama se distribuyen, de oeste a este y, por tanto, de más antiguo a más moderno: la Cordillera Domeyko (límite oeste de la cuenca), el Llano de la Paciencia (cuenca endorreica), el Salar de Atacama (cuenca endorreica), la Cordillera Occidental (dominada por los conos de estrato-volcanes y las planicies de las ignimbritas) y el Arco volcánico actual. En la Figura 4-5 se observan las principales estructuras de la cuenca.

Se diferencian siete dominios estructurales:

Cordillera de Domeyko: limitada por fallas inversas de magnitud regional y manteo al oeste en su flanco oriental. Bordeando el núcleo plutónico de la Cordillera de Domeyko se encuentra, al oeste, rocas marinas Jurásicas y al este, una franja continua de rocas de la Fm. Purilactis, deformadas en pliegues complejos, que guardan relación con el fallamiento inverso. Presenta un paisaje de tipo “band lands”, con quebradas de rumbo aproximado E-W, que cortan las estructuras principales, de rumbo aproximado NS.

Las fallas más importantes que se han podido reconocer en este dominio son:

- Falla Barros Arana: falla inversa de 22 km de largo, rumbo N-S a NE y manteo subvertical que pone en contacto la Fm. Purilactis sobre la Fm. Tambores. Presenta un escarpe que puede llegar a alcanzar 300 m.
- Falla Tonel: falla inversa de 30 km de longitud, rumbo N-S a NE y manteo 60° a 70°E. Hacia el sur se prolonga con la falla Sierra de la Escalera.
- Falla de Quebrada los Condores: falla inversa de 15 km, rumbo N-S y mateo entre 60° y 70°E. Afecta a la Fm. Purilactis.
- Falla Punta Blanca: falla inversa, con rumbo NE a NNE y manteo al NW. Pone en contacto la Fm. San Pedro con Grupo San Bartolo.
- Sistema de Falla Llano de la Paciencia: Se trata de un sistema de fallas, de dirección aproximada NNE que limita la Cordillera Domeyko en su margen oriental y que durante el límite Eoceno-Oligoceno provoca el alzamiento de la Cordillera Domeyko. Dentro de este sistema, se ha reconocido la Falla Llano de la Paciencia que se trata de una falla inversa con 8 km de longitud, con rumbo NNE y manteo 15°W. Pone en contacto la Fm. Tambores con el Grupo Purilactis.
- Falla El Bordo: falla inversa, de rumbo NE y buzamiento 30°W y corrida sinuosa de 11 km. Pone en contacto la Fm. Agua Dulce (bloque occidental) con la Fm. Purilactis (bloque oriental) originando pliegues de arrastre en el bloque oriental.

- Falla del Cerro Negro: falla inversa, con un suave manteo al oeste y una longitud de 9 km. Pone en contacto la Fm. Agua Dulce (bloque occidental) con la Fm. Purilactis (bloque oriental) originando pliegues de arrastre en el bloque oriental.
- Falla Sierra de la Escalera: falla inversa, con dirección variable entre N10°E (parte norte) y NE (hacia el sur), con mateo entre 40° y 50° al E. Esta falla afecta a la Fm. Purilactis, haciendo que el bloque oriental ascienda sobre el occidental.
- Falla del Cerro Cerrillos: falla inversa de alto ángulo, con longitud superior a 42 km, con un salto próximo a los 300m y cuyo bloque occidental sube sobre el oriental. Esta falla pone en contacto la Fm. Purilactis sobre la Fm. Tambores.

A lo largo de la Cordillera Domeyko se observan numerosos anticlinales y sinclinales:

- Sinclinal de los Cerros Purilactis: 40 km de longitud y 13 km de ancho, con plano axial inclinado al oeste y de rumbo variable NE a N-S. Afecta a la Fm. Purilactis.
- Sinclinal de Cerro Totola: 6 km de longitud, cuyo plano axial, está moderadamente inclinado hacia el este, su flanco W manteea 30°E y el E manteea 80°W.
- Anticlinal de Cerro Oscuro: 4 km de longitud, cuyo plano axial tiene una dirección NE y cuyos flancos manteean entre 70° y 60°.
- Sinclinal de Cerro Pichungo: 15 Km de longitud, eje N-S, cuyo flanco E manteea 30°W y en el flanco W manteea 70°E.
- Al Sur del Cerro Pichungo existe un sector con numerosos pliegues tipo Chevron, cuyos ejes son N-S.

Cordillera de la Sal: este sector se caracteriza por complejos sistemas de anticlinales y sinclinales, dispuestos en echelon, de rumbo N-S, que afectan a la Fm. San Pedro. Los anticlinales, generalmente corresponden a zonas elevadas y los sinclinales a depresiones. En la parte norte de la Cordillera de la Sal se pueden diferenciar fallas normales de dirección NE y, en menor medida, fallas normales de dirección NW.

- Anticlinal Cuesta del Carmen: anticlinal de 5 km de longitud, con un plano axial inclinado al E y un rumbo NE-SW. Afecta a la Fm. San Pedro.
- Anticlinal del Cerro Catedral: 15km de longitud y 4,5 km de ancho, con plano axial inclinado al W y rumbo NE. El flanco oriental buza 40° al W. Al NE del Anticlinal del Cerro Catedral se sitúa un anticlinal simétrico, con el eje N-S, de 20 km de longitud y ancho de 5 km.
- En el borde occidental de la Cordillera de la Sal y hacia el sur de la misma, se desarrollan 4 anticlinales idénticos, tipo echelon, con planos axiales inclinados al W y rumbos N-S a NNE.

Cordón de Lila: es una de las grandes morfoestructuras formado por rocas paleozoicas y triásicas, que delimita por el sur y suroeste el Salar de Atacama, que probablemente esté delimitado tanto al este, como al oeste por fallas.

- Sistema de Falla inversa N-S, con mateo de $45^{\circ}W$, que separa los granitoides del paleozoico, la Fm. Lila, la Fm. Peine y Estratos de Cerros Negros (bloque occidental), de los granitoides del Paleozoico Inferior y de la Fm. Lila y Fm. San Pedro (bloque oriental). El bloque occidental cabalga sobre el bloque oriental. La edad de esta falla correspondería al Mioceno. Tucúcaro?
- Sistema de fallas normales, con rumbo NNE, con longitudes máximas de 12 km y que afectan a la falla inversa, mencionada en el párrafo anterior. La edad de este sistema de fallas corresponde al Plioceno.

Graben de Tilocálar: sistema de fallas normales, subverticales y de rumbo N-S y unos 20 km de extensión, que limitan un graben de dirección N-S, que se ve limitado al este por fallas normales con fuertes manteos al W y salto vertical próximo a los 200 m y al oeste por falla normales, con fuerte manteo al este y saltos variables entre 30 y 100 m. Estas fallas afectan a la Fm. Tambores y a las Ignimbritas, así que se datan posteriores al Plioceno.

Cordillera Occidental: se han diferenciado las siguientes fallas:

- Falla Machuca y Falla Barrial: conjunto de fallas normales de rumbo NNE y manteo vertical, que forman el Graben de Pampa Barrial. Entre los bloques hay una diferencia de altura de 300 m.
- Falla de Aguada Pinosa: falla inversa de 6 km, de rumbo NE y manteo al SE, que pone en contacto al Fm. Cas (bloque elevado) con la Fm. Peine.
- Falla del Cerro Carcaqui: falla inversa de 6 km, de rumbo $N50^{\circ}W$ y manteo $54^{\circ}E$, que pone en contacto granodiorita de y Estratos de Queque.
- Falla de Talabre: falla inversa, con rumbo N-S, con un salto vertical entre 10-15 m. Esta falla afecta a ignimbritas del Plioceno.
- Falla de la Quebrada Nacimiento: lineamiento regional, que dio origen a la laguna Miscanti y Miñiques. Se trata de una falla inversa, de rumbo N-S, de 15 km y un salto estimado de 150 m. Aparece cubierta por coladas del Plio-Pleistoceno.

En el sector de Peine-Socaire se observan lineamientos WNW y al este y noreste de Toconao, existen lineamientos de rumbo NE.

Arco volcánico actual: el lineamiento relacionado con la falla de la Quebrada Nacimiento. Este lineamiento tiene un rumbo N80°E y una extensión mayor a 120 km. Con relación a esta estructura se sitúan numerosos centros volcánicos. También se han reconocido lineamiento de rumbo NE, de menor entidad. Ambos grupos de lineamientos son cortados por otras estructuras de rumbo N70°W. La mayor concentración de estos lineamientos se produce desde el Mioceno Superior y coincide con un intenso volcanismo, que produjo las unidades de ignimbritas y de unidades de conjuntos volcánicos.

Tanto en la Cordillera Occidental, como en el Arco volcánico actual, se observan pliegues, anticlinales y sinclinales, con rumbos NS, principalmente amplios que afectan tanto a formaciones del cretácico, a la Fm. San Pedro y a las unidades de ignimbritas del Mioceno superior.

Salar de Atacama: se trata de una planicie cubierta por capas salinas que dificultan el reconocimiento de estructuras. Se diferencian los siguientes sistemas:

- Sistema de Falla Cabeza de Perro: Zona Sur del Salar.
- Sistema Falla Peine: N-S. Falla inversa.
- Sistema de Falla Caballo: falla inversa con alto ángulo de vergencia, se observa en el Cordón de Lila y continúa por el Salar de Atacama.
- Sistema falla Salar: falla inversa que atraviesa el Salar de Atacama por su centro.
- Sistema de falla Tilopozo: falla inversa de dirección NNE-SSW con buzamiento hacia el N.

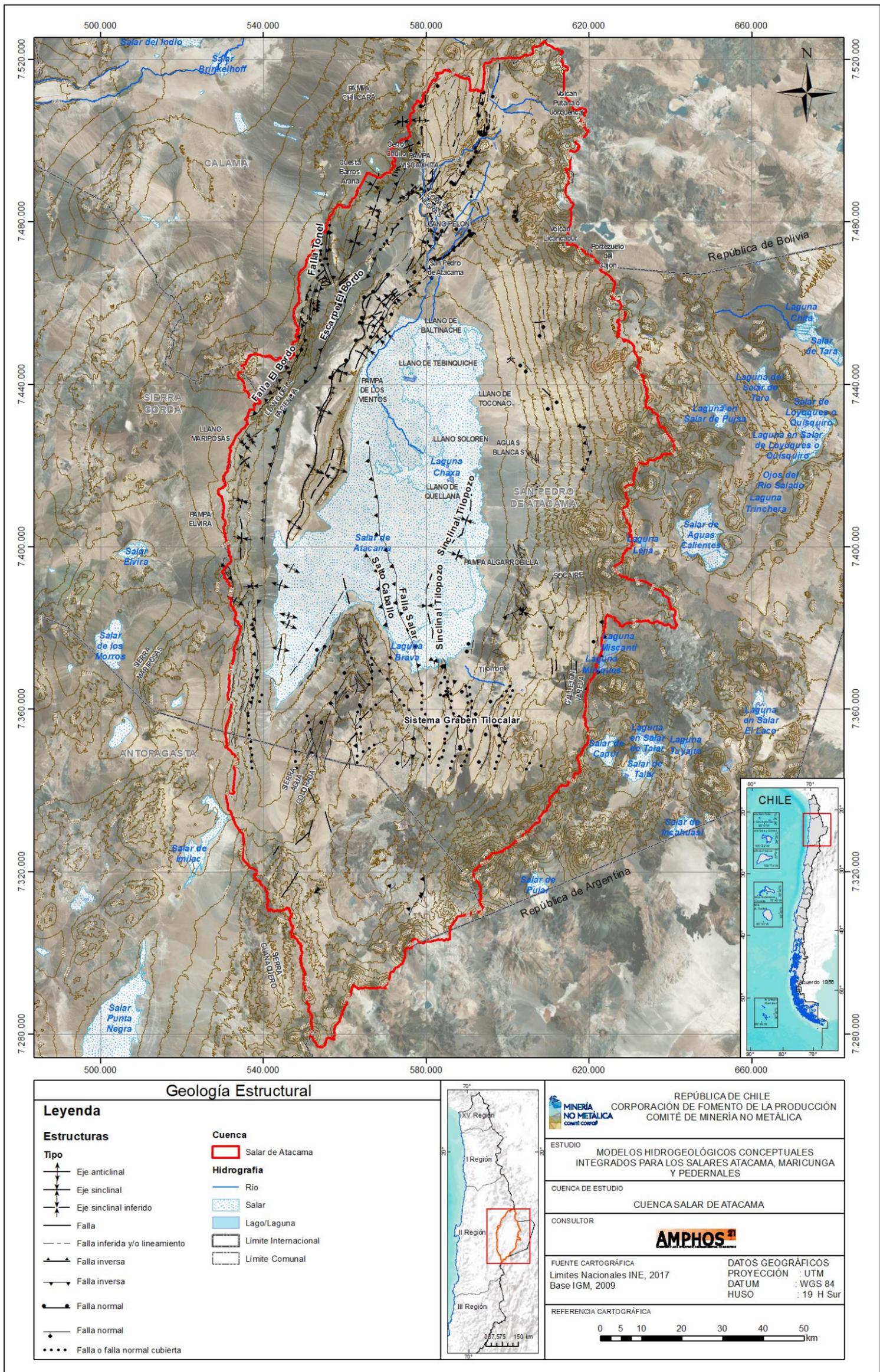


Figura 4-5: Geología estructural.

Fuente: elaboración propia a partir de referencias citadas en texto.

4.5 Columnas Litológicas

En este capítulo se describe y analiza un conjunto de columnas litológicas seleccionadas de pozos y/o sondajes que están ubicados cerca a los bordes del Salar de Atacama y en el centro del mismo (Figura 4-6). Los siguientes sectores estudiados son:

Borde oeste del Salar de Atacama:

Para este sector se han estudiado las columnas estratigráficas de los siguientes pozos: S6 y S9 (Anexo II).

La estratigrafía de estos pozos indica que los primeros 17 m existe un nivel de limo y arena muy fina con un contenido en halita del 40% (sólo se reconoce en el S9). Bajo este nivel y hasta los 303 m de profundidad, según el alcance del registro proporcionado por el pozo S6, se encuentran limos y arena muy fina con un contenido en sales próximo al 10%. Las sales son predominantemente ClNa, pero también se describen intercalaciones menores a 2 m de yeso.

Borde sureste del Salar de Atacama:

Para este sector se han estudiado las columnas estratigráficas de los siguientes pozos: P-05, TE-08 y P-5 (Anexo II).

Según las columnas litológicas de los tres pozos, se puede observar la gran variabilidad de unidades geológicas existen en este sector. Así el pozo más cercano al salar, P-05, se perforó inicialmente en 10 metros de costra de halita y en profundidad en depósitos salinos formados por arcillas carbonatadas con intercalaciones de carbonatos y halita. El pozo TE-08 fue perforado los 48 m más superficiales en ignimbritas pasando en profundidad a una secuencia continental compuesta por gravas areno-limosas con variable grado de compactación. Más al sur se ubica el pozo P-5 cuyos primeros 18 m fueron perforados en depósitos no consolidados, bajo los que se encuentra una capa de ignimbritas hasta los 68 m de profundidad y desde esa profundidad y hasta los 300 m se perforó una secuencia sedimentaria formada principalmente por gravilla y arena. Esto nos indica que hacia el sur del borde suroeste de la cuenca, a partir de los 2.280 m s.n.m., nos encontramos la secuencia sedimentaria continental datada del Mioceno.

Borde este del Salar de Atacama:

Para este sector se han estudiado las columnas estratigráficas de los siguientes pozos: Mulla1, Carma2 y Socaire1.

Correlacionando las columnas estratigráficas de los pozos, se puede observar que desde la superficie (aproximadamente 2.400 m s.n.m.) hasta los 2.300 m s.n.m. existe un nivel formado por materiales detríticos gruesos no consolidados que gradan hasta los 2.250 m s.n.m. a un nivel

detrítico limo-arenoso con intercalaciones de ignimbritas. Bajo las ignimbritas se desarrolla una secuencia detrítica formada por arena con gravas que en profundidad se transforma en limos arenosos. La base de este último nivel alcanza en el pozo Camar2 una cota de 2.050 m s.n.m., acuniándose hacia el sur y detectándose a los 2.260 m s.n.m. en el pozo Socaire1. Bajo este nivel detrítico se reconoció una unidad volcánica.

Norte del Salar de Atacama:

Para este sector se ha estudiado la columna del siguiente pozo con derechos constituidos: Pozo Coyo (expediente: ND-0202-2382).

Este pozo fue perforado en una secuencia detrítica que se inicia con arenas finas y grada a gravas con arenas hasta 2.350 m s.n.m. aproximadamente, que es la máxima profundidad que alcanza el pozo.

Centro-norte del Salar de Atacama:

Para este sector se han estudiado las columnas estratigráficas de los siguientes sondajes: Toconao1, Toconao1A.

Estos dos sondajes fueron realizados en la década de 1950 por CHOC-ENAP, para investigación petrolera y alcanzan los 5.425 m de profundidad. Si tenemos en cuenta la interpretación realizada por R. Arcos en 1990, el centro del salar está formado por 975 m (1.325 m s.n.m.) de sal con intercalaciones de niveles limolíticos e ignimbríticos, que sobreyacen a la Fm. San Pedro (Mioceno). Esta última formación tiene una potencia de 615 m (711 m s.n.m.) y sobreyace en discordancia angular a la Fm. Purilactis (Cretácico-Paleoceno) cuyo espesor detectado fue de 2.175 m (-1.470 m s.n.m). Infrayaciendo a la Fm. Purilactis se perforó la Fm. Cas-Fm. Peine (Carbonífero-Pérmico) hasta el final del sondaje (-3.125 m s.n.m.).

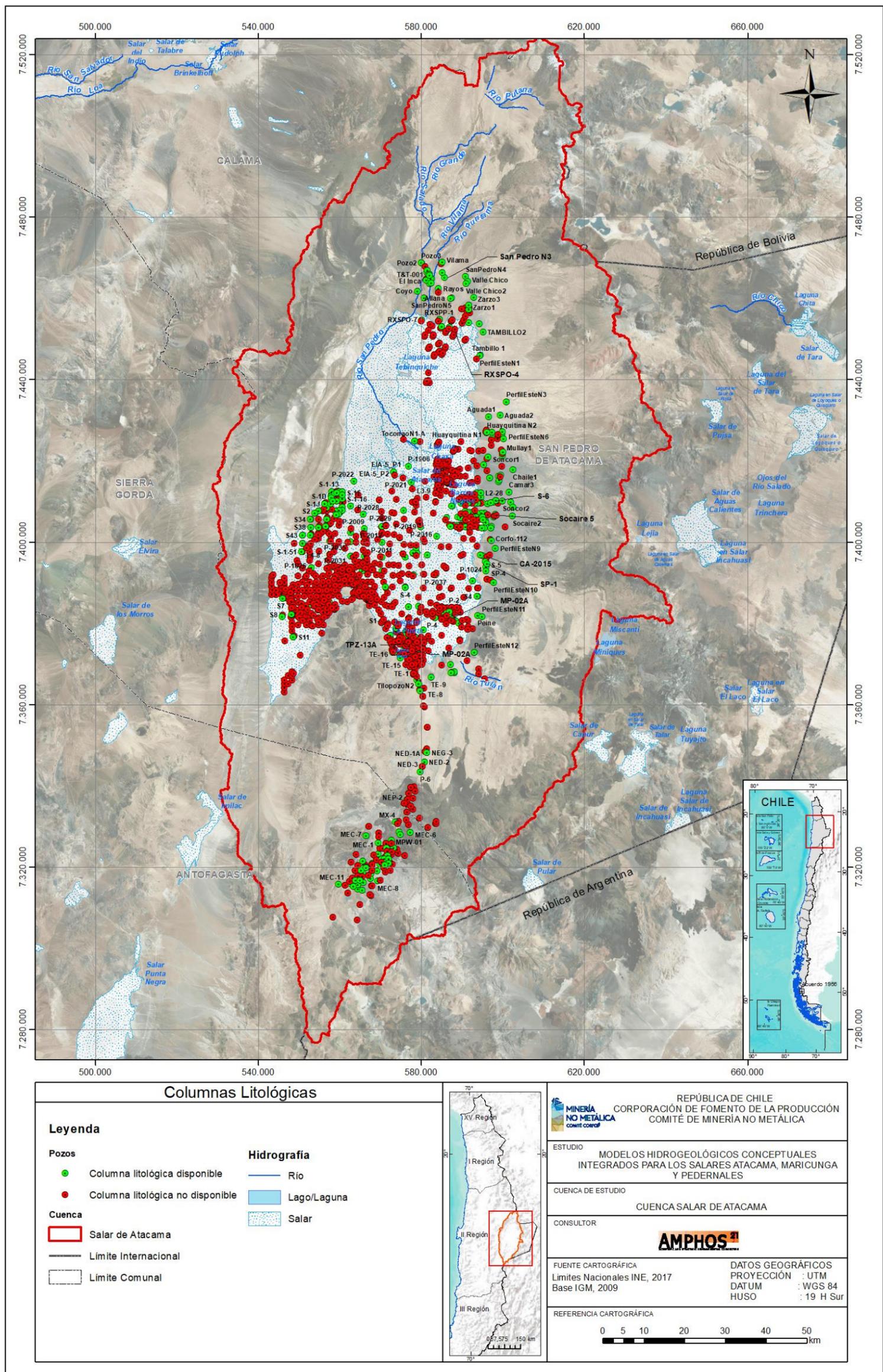


Figura 4-6: Ubicación de las columnas litológicas existentes en el área de estudio.

5. Caracterización hidrogeológica

En el presente capítulo se detallan las características hidrogeológicas de la cuenca de estudio a partir de parámetros hidráulicos de antecedentes, descripción de las unidades hidrogeológicas e identificación de acuíferos. La información hidrogeológica se ha integrado en un mapa hidrogeológico elaborado por Amphos 21 para el actual proyecto.

5.1 Parámetros hidráulicos

Los parámetros hidráulicos, obtenidos mediante ensayos de bombeo o ensayos de tipo *slug test* u otras mediciones puntuales (*packer*), como la transmisividad, la permeabilidad y el coeficiente de almacenamiento, se utilizan para estimar el potencial hidráulico de las unidades geológicas y de los acuíferos que constituyen.

En primer lugar, se especifican los antecedentes utilizados para realizar el análisis y en segundo lugar, se describen los valores de parámetros hidráulicos recopilados de los antecedentes consultados y la distribución espacial de los mismos.

5.1.1 Información disponible

Los datos utilizados para llevar a cabo el análisis de los parámetros hidráulicos de las unidades geológicas corresponden a tres fuentes principales:

- SGA. *Solución en Gestión Ambiental (2015). Adenda 5. Anexo I. Estudio Hidrogeológico y modelo numérico sector sur del Salar de Atacama. EIA Proyecto modificaciones y mejoramiento del sistema de pozas de evaporación dólar en el Salar de Atacama. Rockwood Lithium.*

En el anterior informe, SGA ha realizado una recopilación de datos de otras fuentes (Pramar Ambiental, 2006; SLM NX Uno de Peine, 2012; GAC, 2009, etc.), principalmente permeabilidad y coeficiente de almacenamiento y además, ha integrado nueva información generada durante el proyecto. Los datos se distribuyen principalmente en el núcleo del Salar de Atacama y provienen de la interpretación de ensayos de bombeo, *slug test* y otras mediciones puntuales (*packer*). La información recopilada por SGA (2015) se presenta en el Anexo III-2 y en la BBDD de parámetros hidráulicos (Anexo I)

- Golder Associates. (2017). *Anexo IV.1 Modelo Hidrogeológico. Modelo Hidrogeológico conceptual y Numérico para el Acuífero de Monturaqui-Negrillar-Tilopozo. EIA Proyecto Monturaqui. Minera Escondida.*

Golder presenta datos de permeabilidad y transmisividad a lo largo del acuífero Monturaqui-Negrillar-Tilopozo (MNT), registros obtenidos mediante ensayos de bombeo y *slug test*,

obtenidos por Minera Escondida Ltda. (MEL) durante el desarrollo de la operación en el sector.

- *Expedientes de derechos de agua publicados en www.dga.cl.*

Los expedientes de derechos de agua de la cuenca presentan registros de permeabilidad y caudales específicos.

Todos los registros se han recopilado e integrado en una base de datos que se presenta en el Anexo I. Además, los valores de permeabilidad y caudal específico, se han proyectado en un SIG.

En la Figura 5-1 se presenta la distribución de los puntos con información de parámetros hidráulicos cuyo origen de la información corresponde a las fuentes anteriormente citadas.

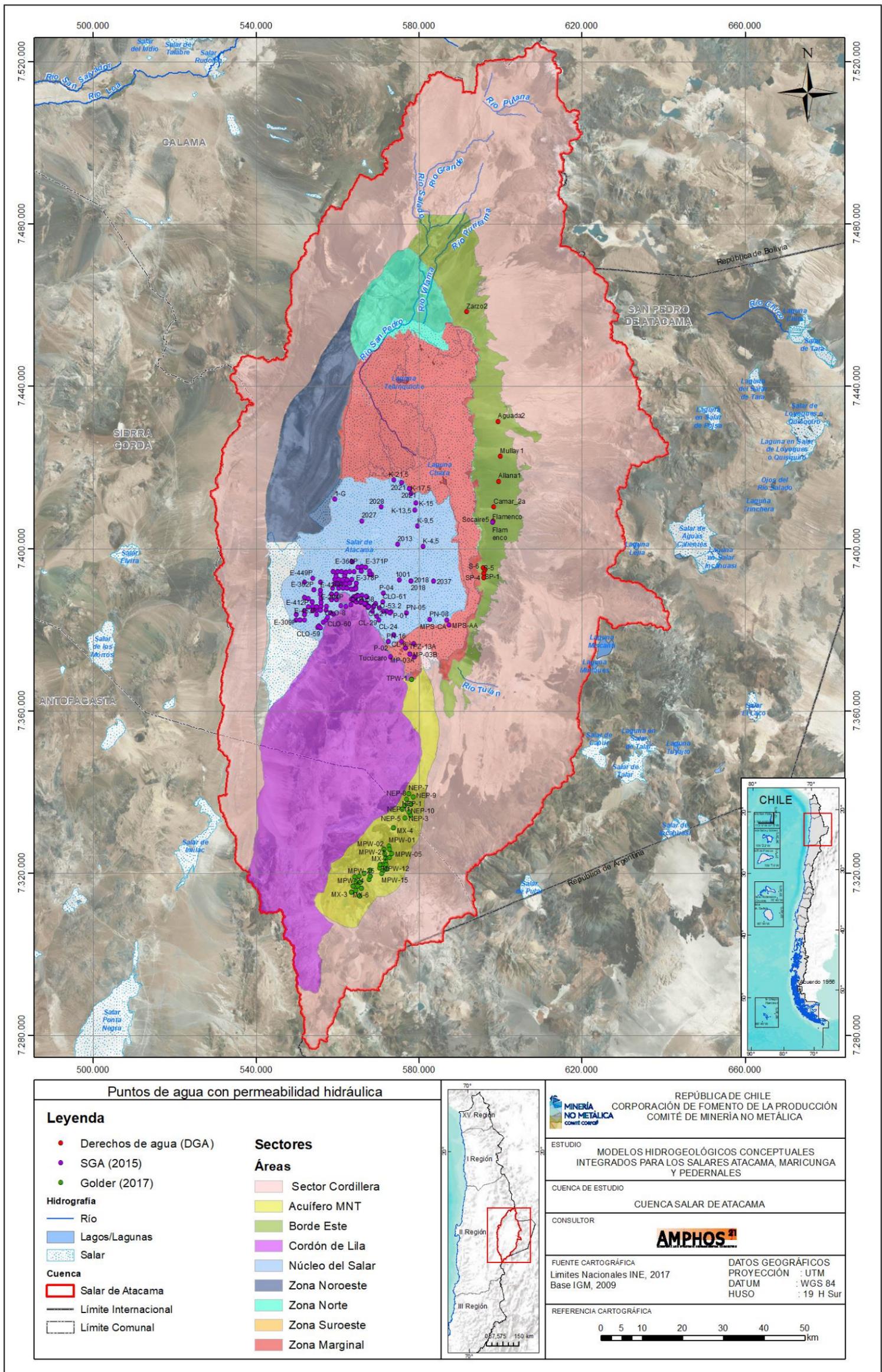


Figura 5-1: Puntos de agua con información de permeabilidad hidráulica.

Fuente: elaboración propia a partir de antecedentes.

5.1.2 Caudales específicos

El caudal específico (q) de un pozo, que se obtiene mediante un ensayo de bombeo a partir del caudal bombeado (Q) y el descenso (s) producido producto del bombeo ($q = Q/s$), puede ser un indicador de la productividad del acuífero, teniendo en cuenta que dicho valor depende en parte, de la eficiencia del pozo.

En la Tabla 5-1 se ha extraído el caudal específico de las pruebas de bombeo disponibles en los antecedentes y se ha asociado la unidad geológica en superficie donde se encuentra el pozo.

A partir del análisis de los registros que se presentan en la Tabla 5-1 se extrae que la zona de mayor productividad se encuentra en los depósitos salinos de la parte superficial del núcleo del salar (Qcl), con caudales específicos promedio de 300 l/s/m y en el sector sur de la zona marginal (30 l/s/m).

Los depósitos aluviales (Qal) presentan una mayor productividad en el borde este, con 12 l/s/m en promedio, que en el sector de San Pedro de Atacama (al norte del salar), donde el caudal específico se reduce a 1 l/s/m, debido posiblemente a que dichos depósitos en el borde este presentan un mayor desarrollo, en referencia a extensión y superficie.

El acuífero de MNT presenta valores de 1,5 l/s/m, del mismo orden que los pozos que se encuentran en las vegas del norte del Salar de Atacama.

En la Tabla 5-1 se puede observar la distribución espacial del caudal específico.

Unidad geológica	Sectores	Pozo	X_WGS84	Y_WGS84	q (l/s/m)	Profundidad del pozo
Qal. Depósitos aluviales	Borde este (de norte a sur)	CA-2015	596.136	7.396.452	5,1	110
		JMB-1	591.024	7.457.014	14,1	201
		Mullay1	599.895	7.422.671	6,9	157
		Peine	593.752	7.381.845	0,5	40
		S-6	595.719	7.395.209	8,1	52
		Promedio de q en Qal				6,9
	San Pedro de Atacama	Ricardo Vilca	581.393	7.466.424	1,2	51
		Vilama	585.1	7.468.870	1,3	150
		Coyo	579.053	7.461.677	1,4	42
		Alto Atacama	580.093	7.468.673	0,5	68
		Pozo2	579.995	7.468.736	0	80
		Pozo3	580.017	7.468.759	0,1	65
		Promedio de q Qal				0,7

Tabla 5-1: Caudales específicos en pozos ubicados en la cuenca Salar de Atacama.

Unidad geológica	Sectores	Pozo	X_WGS84	Y_WGS84	q (l/s/m)	Profundidad del pozo
Vegas	San Pedro de Atacama	El Inca	581.147	7.464.402	1,2	77
		Kimal	581.741	7.465.945	0,6	69
		La Aldea	582.273	7.464.906	1,6	60
		Rayos	584.201	7.462.371	4,8	45
		Sin nombre1	581.465	7.466.876	0,5	53
		T&T-001	581.674	7.465.943	2	40
		Tenantai	581.994	7.465.914	0,3	75
		Tocopilla	582.027	7.465.715	0,5	78
		Promedio q en zonas de Vegas				
Qcl. Depósitos salinos. Costra de cloruros	Núcleo	CL-6	572.417	7.376.989	6,8	
		CL-21	567.589	7.385.565	1	
		PN-05	576.891	7.384.048	1169,2	30
		PN-08	582.638	7.382.424	3,2	30
		PN-14	573.767	7.378.720	321,1	50
		Promedio q en Qcl				
Qcls. Depósitos salinos. Costra de sulfatos	Zona Marginal sur	PN-16	575.656	7.377.001	20	30
		Tilopozo	577.715	7.369.511	59	
		Zanja Tucúcaro	573.065	7.372.977	13,4	
		Promedio q en Qcls				
TQal. Depósitos aterrazados	Borde Sur (Acuífero de Monturaqui-Negrillar-Tilopozo)	M-16	567.915	7.319.222	0,9	218
		M-17	567.654	7.318.391	1,1	189
		M-21	569.012	7.321.680	0,6	210
		MPW-04	571.418	7.324.707	1,4	300
		MPW-08	571.682	7.322.770	1,3	300
		MPW-10	570.938	7.322.022	0,7	300
		MPW-11	571.921	7.322.055	0,9	300
		MPW-13	571.987	7.320.960	0,6	300
		MPW-14	571.096	7.320.554	0,5	300
		MPW-15	570.785	7.319.912	0,5	302
		MPW-19	563.802	7.316.711	2,7	300
		MPW-20	564.919	7.316.747	3,1	300
		MPW-21	571.697	7.323.730	1	245
		MPW-23A	564.393	7.315.653	3,6	310
		MPW-24	566.417	7.319.800	1,9	300
		MPW-25	564.155	7.319.038	3,7	310
		MX-1	565.422	7.314.285	0,6	292
		MX-3	563.279	7.315.250	0,6	258
		MX-6	565.79	7.316.215	4,9	216
		MX-7	570.368	7.322.031	0,9	231
		M-14	571.3	7.325.836	0,8	219
		MPW-01	572.602	7.326.612	1,4	300
MPW-05	573.229	7.324.756	1	300		
MX-4	573.632	7.331.072	0,9	201		
Promedio q en TQal					1,5	

Tabla 5-1 (Continuación): Caudales específicos en pozos ubicados en la cuenca Salar de Atacama.

Fuente: elaboración propia.

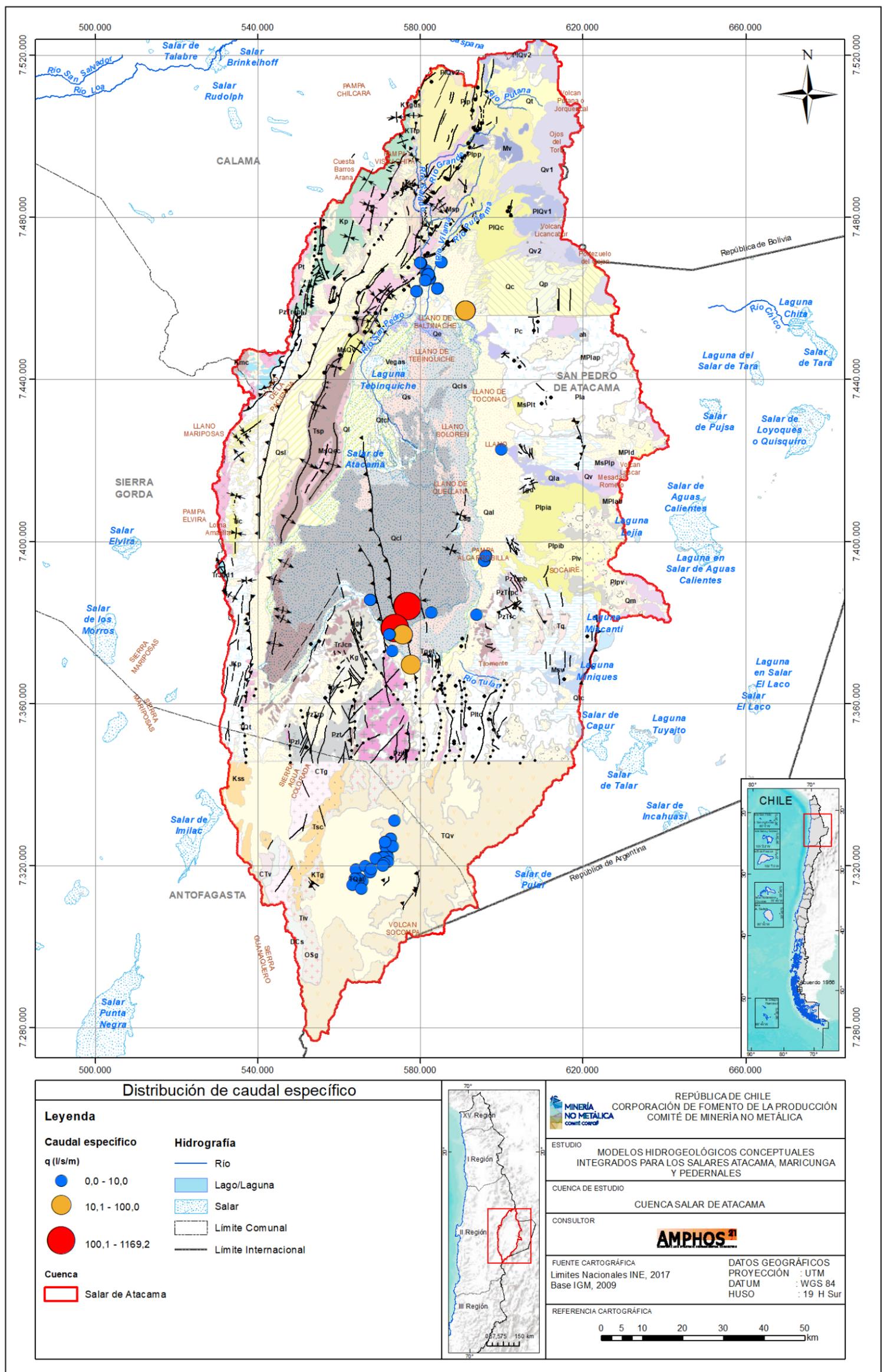


Figura 5-2: Distribución espacial del caudal específico en el área de estudio.

Fuente: elaboración propia.

5.1.3 Permeabilidad y Transmisividad

La transmisividad (T) hace referencia a la capacidad del acuífero para transmitir agua a través de su espesor saturado (b) y está directamente relacionada con la conductividad hidráulica (K). La K indica la capacidad de un fluido, en función de su viscosidad y peso específico, para desplazarse a través de los espacios interconectados de los materiales (poros). De esta forma, la K depende tanto de las características del fluido como de las propiedades del medio que atraviesa.

La Tabla 5-2 muestra valores de conductividad hidráulica teóricos definidos por Amphos 21, 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 conductividad hidráulica	Unidad hidrogeológica	Calificación acuífero
10 ⁴	Muy alta	UH-3	Acuíferos buenos a moderados
10 ³		UH-3	
10 ²		UH 3	
10 ¹	Alta	UH-1 y UH-3	
		UH-1 y UH-3	
1	Media	UH-1, UH-2, UH-4	
		UH-2 y UH-4	
10 ⁻¹	Baja	UH-4	Acuíferos pobres
10 ⁻²		UH-4	
10 ⁻³		UH-4 y UH-5	
	UH-5		
10 ⁻⁴	Muy baja	UH-5	No acuífero
10 ⁻⁵		UH-5 y UH-6	
10 ⁻⁶		UH-6	
		UH-6	

Tabla 5-2: Correlación entre conductividad hidráulica y unidades hidrogeológicas.

Fuente: elaboración propia. Realizado a partir de Custodio & Llamas, 2001 y Struckmeier & Margat, 1995.

En la Tabla 5-3 se muestra la permeabilidad promedio por unidad geológica, obtenida a partir de los pozos de agua con información de permeabilidad (Figura 5-6), que se emplazan en cada unidad. Además, se ha diferenciado la permeabilidad correspondiente a menos y más de 50 m de profundidad con respecto a la superficie, dato disponible en la información recopilada por SGA (2015). Cabe tener en cuenta que el promedio de la permeabilidad se ha realizado, tanto para los valores

obtenidos mediante pruebas de bombeo y *slug test* u otras mediciones puntuales (*packer*), entre las cuáles se observan diferencias significativas entre los resultados obtenidos, debido posiblemente a que es necesario obtener un mayor número de pruebas de tipo puntual para caracterizar la permeabilidad del acuífero.

Unidad geológica		Sectores	Profundidad de la prueba (m)	Promedio K (m/d)	Tipo de prueba
Qal	Depósitos aluviales	Borde este	< 50	57	Prueba bombeo
Qcl	Depósitos salinos. Costra de cloruro	Núcleo	< 50	2.087	Prueba bombeo
			> 50	3	Prueba bombeo
			< 50	394	Slug test o packer
Qcls	Depósitos salinos. Costra de cloruros y sulfatos	Zona Marginal sur	< 50	5.837	Prueba bombeo
			> 50	16	Prueba bombeo
Qs	Depósitos salinos. Costra de sulfatos		< 50	31	Slug test o packer

Tabla 5-3: Permeabilidades promedio para cada unidad geológica definida.

En los depósitos salinos de la zona marginal y el núcleo, las permeabilidades son elevadas, de > 2.000 m/d (Permeabilidad Muy Alta) hasta los 50 m de profundidad, mientras que a mayor profundidad la permeabilidad se reduce drásticamente, hasta valores menores de 16 m/d (Permeabilidad Media) (valores obtenidos mediante pruebas de bombeo). Los resultados de los *slug test*, ensayos puntuales de permeabilidad, muestran una menor permeabilidad que los que se obtienen mediante pruebas de bombeo, en los primeros 50 m de profundidad. Teniendo cuenta lo anterior se puede observar que en el núcleo y la zona marginal el sistema hidrogeológico es heterogéneo.

El acuífero de Monturaqui- Negrillar-Tilopozo (MNT) (Golder, 2017), presenta una permeabilidad media de 19 m/d (Permeabilidad Media) y una transmisividad de 1.540 m²/d, según los datos presentados por Golder (2017) (Tabla 5-4). La geología corresponde a la unidad geológica "TQal" definida por Boric, Díaz y Maksaev (1987) (Figura 4-3), que corresponde, en términos generales, a gravas, arenas, limos y cenizas volcánicas de depósitos de piedemonte y de corrientes de barro erosionadas.

Tipo de prueba	Sector	N° de pruebas	T (m ² /d)			K (m/d)		
			Mín.	Máx.	Promedio	Mín.	Máx.	Promedio
Prueba de bombeo	Monturaqui	45	26	1.340	683	0,15	7,9	4
	Roca volcánica	3	30	632	331	0,18	3,7	2
	Negrillar	14	136	6.531	3.333	0,54	33,7	17
	Callejón	3	150	3.500	1.825	6	100	53
Valores promedio Acuífero MNT			1.543			19		

Tabla 5-4: Permeabilidades y transmisividades del acuífero de MNT.

Fuente: modificado de Golder (2017).

La distribución espacial de la conductividad hidráulica (K), que se presenta en la Figura 5-3, muestra que el acuífero MNT tiene una permeabilidad homogénea e inferior a 20 m/d en la parte centro y sur del acuífero, mientras que hacia el norte, aumenta levemente y está comprendida entre 20 y 30 m/d. En la zona marginal, las permeabilidades se incrementan hasta 100 m/d en el pozo TPW-1.

Los valores de permeabilidad en el núcleo del salar, a menos de 50 m de profundidad (Figura 5-3) con respecto la superficie, denotan la existencia de dos zonas de permeabilidad distinta, cuyo límite que separa ambas partes coincide, en parte, con el Sistema de Falla Salar (SFS). De esta forma, el bloque este de SFS (bloque hundido) tiene una permeabilidad mayoritariamente superior a 1.000 m/d y de hasta 10⁴ y 10⁵ m/d (Permeabilidad Muy Alta), mientras que en el bloque oeste (bloque elevado) los valores están comprendidos principalmente entre 0,04 m/d y 100 m/d (Permeabilidad entre Baja y Media), con datos de K puntuales de más de 100 m/d y hasta 800 m/d.

La permeabilidad a más de 50 m de profundidad se caracteriza por estar comprendida entre Media y Muy Baja (entre 5 m/d y 10⁻³ m/d) en el núcleo (Figura 5-4). Dichos valores son representativos mayoritariamente del bloque oeste, que es donde se dispone de datos, pero los valores podrían ser extrapolados al bloque este, atendiendo a que generalmente disminuye la permeabilidad y la porosidad con la profundidad.

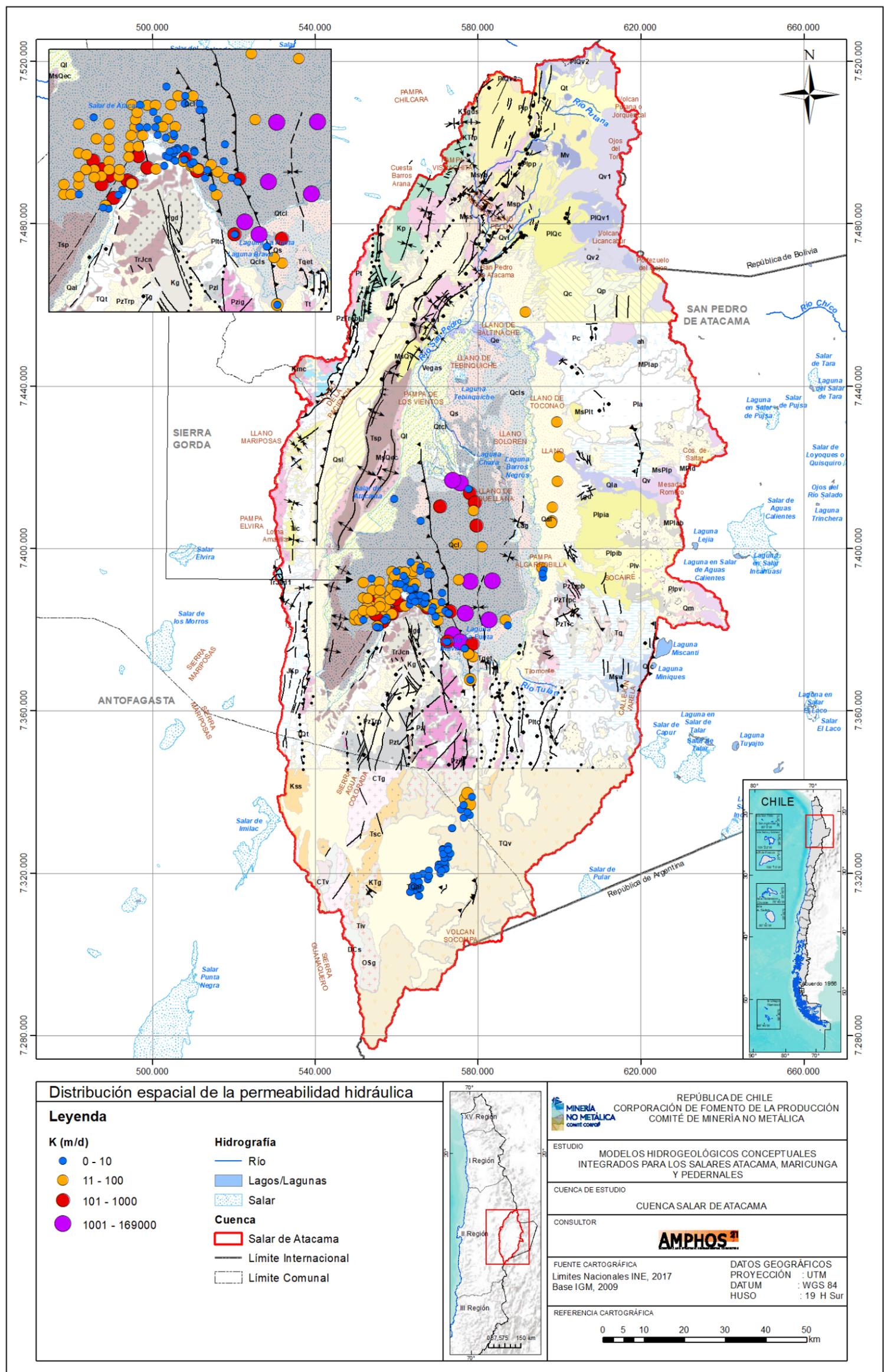


Figura 5-3: Distribución espacial de la permeabilidad hidráulica en el área de estudio. En el núcleo se presentan los valores obtenidos a menos de 50 m de profundidad con respecto la superficie, según los datos recopilados por SGA (2015).

Fuente: elaboración propia a partir de datos de terceros (SGA, 2015; Golder, 2017; derechos de agua (DGA)).

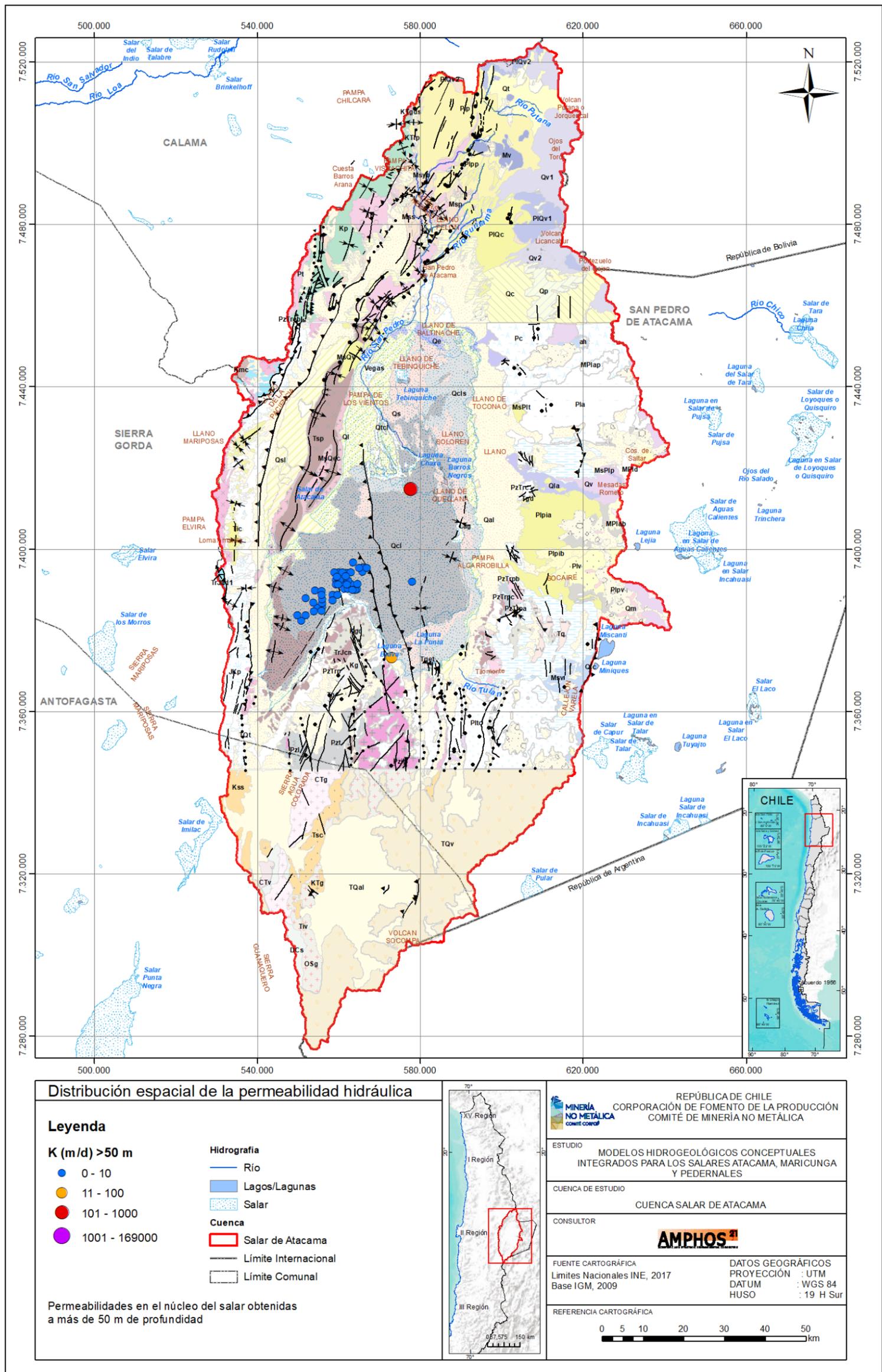


Figura 5-4: Distribución espacial de la permeabilidad hidráulica en el área de estudio. En el núcleo se presentan los valores obtenidos a más de 50 m de profundidad con respecto la superficie, según los datos recopilados por SGA (2015).

Fuente: elaboración propia a partir de datos de terceros (SGA, 2015; Golder, 2017; derechos de agua (DGA)).

5.1.4 Coeficiente de almacenamiento

El coeficiente de almacenamiento (S) se refiere a la capacidad de un acuífero para almacenar o liberar agua. 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 (10^{-2}) y 0,30 (10^{-1}), mientras que, para acuíferos confinados normalmente son inferiores a 0,005 (10^{-3}).

El coeficiente de almacenamiento correspondiente al núcleo del salar está comprendido, mayoritariamente, entre 10^{-1} y 10^{-3} , mientras que el acuífero MNT presenta valores del orden de 10^{-1} . De esta forma, según los datos disponibles de los antecedentes, el acuífero MNT y el núcleo constituyen acuíferos, principalmente libres, aunque con menor frecuencia, se observan coeficientes inferiores a 0,005.

Sin embargo, el coeficiente de almacenamiento en el borde este presenta valores entre 10^{-2} y 10^{-4} , que indica que en algunos sectores el acuífero que se explota puede encontrarse confinado.

En la Figura 5-5 se observa la distribución del coeficiente de almacenamiento y los valores asociados. Además, en el Anexo I (BBDD Parámetros hidráulicos) pueden consultarse los datos disponibles.

La variabilidad observada en los valores de permeabilidad y de coeficiente de almacenamiento (tendencias de acuífero libre y confinado en puntos cercanos), tanto en el bloque este como en el bloque oeste de la SFS, denota que el núcleo del salar es heterogéneo y presenta características particulares, mientras que, en el acuífero del borde este, existe un acuífero libre y otro confinado.

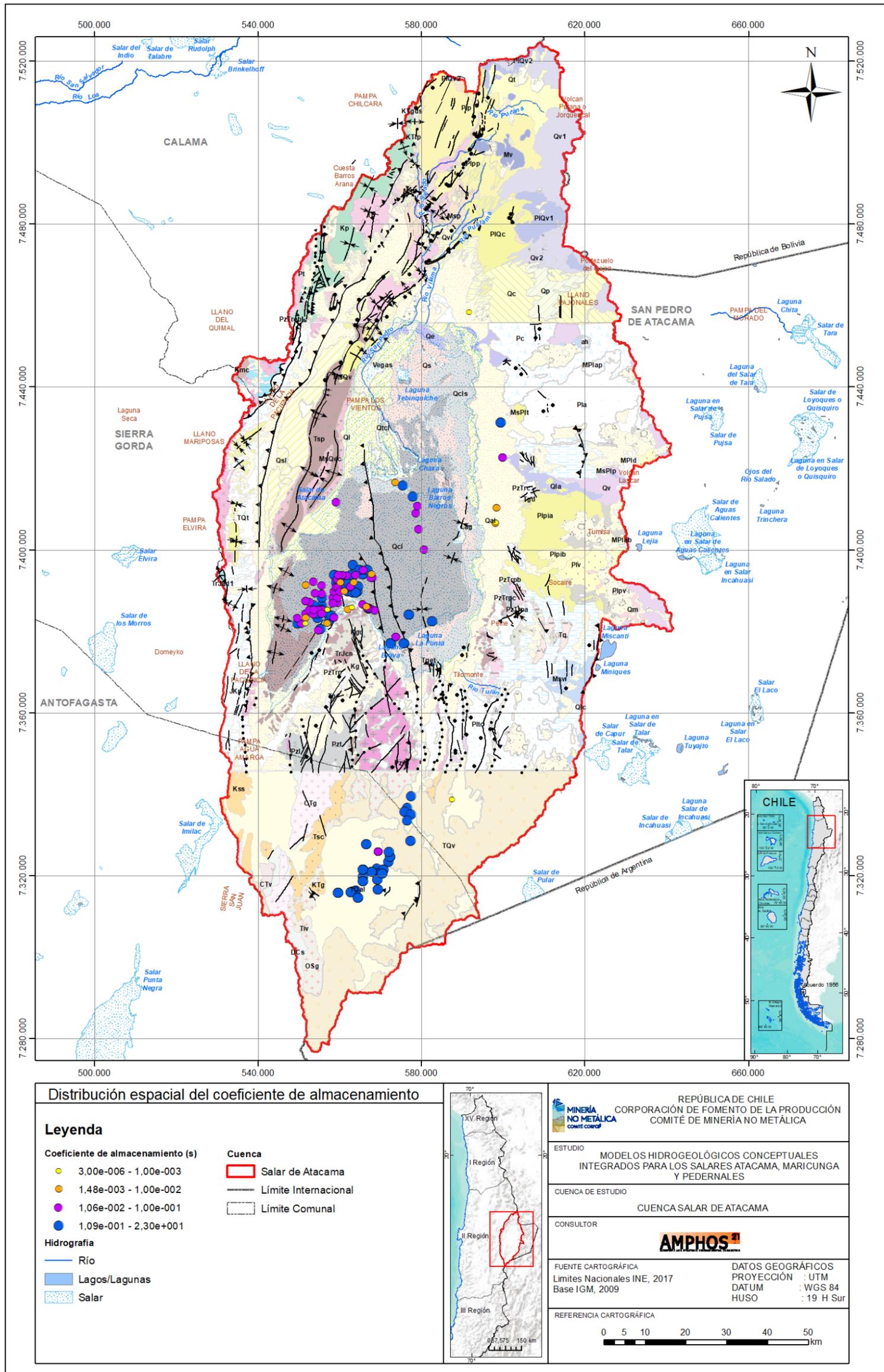


Figura 5-5: Distribución espacial del coeficiente de almacenamiento en el área de estudio.

Fuente: elaboración propia a partir de datos de terceros (SGA, 2015; Golder, 2017; derechos de agua (DGA)).

5.2 Unidades hidrogeológicas

Las Unidades Hidrogeológicas (UH) se han definido siguiendo la guía para la elaboración de mapas hidrogeológicos de Struckmeier & Margat (1995), publicada por el “International Association of Hydrogeologist”. La clasificación de las UH en los mapas hidrogeológicos publicados por SERNAGEOMIN también se basa en la metodología que se presenta en dicha guía.

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

Cabe destacar que el espesor y la extensión de las unidades geológicas se ha estudiado mediante sondajes y perfiles geofísicos (ver Anexo II).

A continuación, se presenta un breve resumen de las características de cada UH definida en la cuenca, mientras que en la Figura 5-6 se muestra de forma esquemática las relaciones que presentan entre ellas. Dicha clasificación da información sobre la ocurrencia de agua subterránea en la formación geológica y el posible régimen de flujo asociado.

- **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 por fallas y/o diaclasas. Constituyen unidades de espesor significativo y extensión relativamente importante y además, son altamente productivos (presentan valores

elevados de transmisividad). Generalmente, están formados por rocas fracturadas. Se pueden considerar como unidades de alta importancia hidrogeológica.

- **UH 4:** conforman acuíferos fisurados o kársticos, cuyo flujo subterráneo se transmite principalmente por 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.

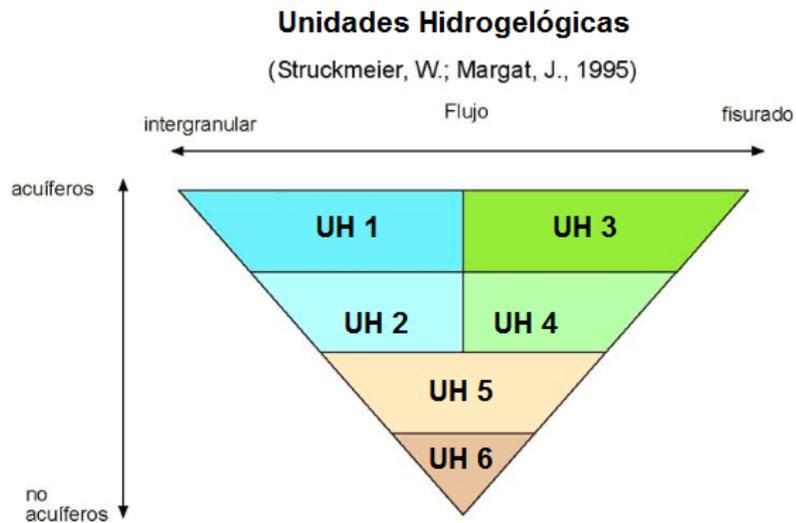


Figura 5-6: Clasificación de las Unidades Hidrogeológicas en la cuenca.

Fuente: elaboración propia a partir de Struckmeier y Margat (1995).

A partir de lo anteriormente descrito se ha elaborado un mapa hidrogeológico que se presenta en la Figura 5-9. A continuación, se describen con detalle las unidades hidrogeológicas identificadas en la cuenca de estudio.

5.2.1 Unidad Hidrogeológica 1 (UH 1)

Los depósitos aluviales del borde este, norte y sur del Salar de Atacama (Qal) constituyen la UH 1. Dichos depósitos están formados principalmente por gravas y arenas con intercalaciones de arcillas, limos y arenas. Entre estos materiales también existen capas de cenizas y/o ignimbritas intercaladas.

Concretamente, en el borde norte del salar, el espesor de las gravas y las arenas es del orden de 20 m (pozo Vilama, Anexo II), aunque puede llegar a ser de hasta 80 m (pozo San Pedro 3, Anexo II). Bajo los materiales anteriores, se encuentra una capa de ignimbritas, cenizas y arcillas de entre 40 y 100 m de espesor y a continuación, nuevamente arenas y gravas limpias, de al menos 20 m de potencia, detectadas en el pozo San Pedro 3 (Anexo II).

En referencia a lo anterior, es posible diferenciar dos acuíferos, uno más superficial de espesor máximo conocido de 80 m, de carácter libre, -aunque puede estar confinado por una arcilla en la parte superior en algunos casos (pozo RXSPO-4, Anexo II)-, y otro confinado por una capa de 100 m de espesor de ignimbritas y arcillas, aunque el espesor puede ser variable espacialmente. Las ignimbritas y las arcillas constituyen una UH 5, según Struckmeier y Margat (1995) (Figura 5-6).

Según el análisis de antecedentes y los datos recopilados, la permeabilidad de la UH 1 en este sector es Media y el coeficiente de almacenamiento es del orden de 10^{-4} , probablemente más característico del acuífero UH 1 profundo.

En la Tabla 5-5 se observan las pruebas hidráulicas disponibles, representativas de la UH 1. En el mapa del Anexo II se puede observar la ubicación de los pozos con parámetros hidráulicos.

Pozo	X WGS84	Y WGS84	Profundidad del pozo	Tipo de ensayo	T (m ² /d)	K (m/d)	Coficiente de Almacenamiento	Método de interpretación antecedentes	Fuente de los datos
Vilama	585100	7468870	150 m	PPBB*	309	-	-	Theis y Jacob	Expediente derecho de agua VPC-0202-5014
Zarzo1	591800	7458688	220 m	PPBB	960	43	0,0005	Walton	A_REF.047; A_REF.093-5_Apéndice H
					1.137	63	-	Jacob	

*PPBB: Prueba de bombeo

Tabla 5-5: Parámetros hidráulicos del acuífero UH 1 en el borde norte del Salar de Atacama.

Fuente: elaboración propia a partir de antecedentes.

En el borde este del salar, la UH 1 constituye un afloramiento extenso de depósitos aluviales (Figura 4-3) y de espesor significativo. Lo anterior se observa en el corte geológico extraído de Dalannais (1979) (Figura 5-7 y Figura 5-8) y en las columnas estratigráficas (Anexo II, columnas estratigráficas y mapa de pozos con columnas).

En este sector existe un acuífero superficial de tipo libre, formado por gravas y arenas con intercalaciones de arcilla y otro profundo, de arenas finas, limos, arcillas, cenizas, entre otros, confinado por una capa de ignimbritas, cenizas y tobas, éstas últimas de entre 5 y hasta 50 m de espesor.

El espesor del acuífero superficial puede ser de más de 100 m, mientras que se desconoce la potencia del acuífero profundo debido a que no se tiene constancia de pozos profundos cuya perforación haya llegado hasta el basamento. El techo del acuífero profundo se encuentra a 150 m de profundidad aproximadamente en el pozo Camar 2 y hacia el sur, está más próximo a la superficie del terreno (a 80 m de profundidad).

Según la información de antecedentes (Tabla 5-7), la permeabilidad más probable del acuífero libre, está comprendida entre 7 y 66 m/d, mientras que la transmisividad promedio es del orden de 1.000 m²/d.

Los depósitos aluviales del borde sur del salar asociados a la UH 1, tienen un espesor variable de entre 8 m (pozo Perfil Este N°14, Anexo II) y 52,5 m (pozo TE-1, Anexo II). Según los registros disponibles el espesor máximo se encuentra cerca del contacto con el núcleo de evaporitas (TE-1), mientras que el mínimo se ha registrado aguas arriba, próximo a los afloramientos de ignimbritas.

En el pozo TPW-1 (próximo al TE-1) se realizaron tres pruebas de bombeo (Golder, 2017) y se obtuvo una permeabilidad entre 6 y 100 m/d (Tabla 5-6). Cabe destacar que dicho pozo se encuentra perforado tanto en los aluviales como en los depósitos salinos, éstos últimos subyacen a los primeros y la permeabilidad, por lo tanto, es representativa de ambos materiales.

Pozo de bombeo	Pozo de observación	Coordenadas pozo bombeo		Profundidad pozo	Tipo de ensayo	T (m ² /d)	K (m/d)	Fuente de los datos
		X WGS84	Y WGS84					
TPW-1	Sin pozo de observación	578113	7367626	38 m	PPBB	150	6	A_REF.092
					Recuperación	2500	100	A_REF.092
	TM-1				PPBB	3500	50	A_REF.092

*PPBB: Prueba de bombeo; Recuperación: ensayo de recuperación.

Tabla 5-6: Parámetros hidráulicos del acuífero UH 1 en el sector borde sur del Salar de Atacama.

Fuente: elaboración propia a partir de antecedentes.

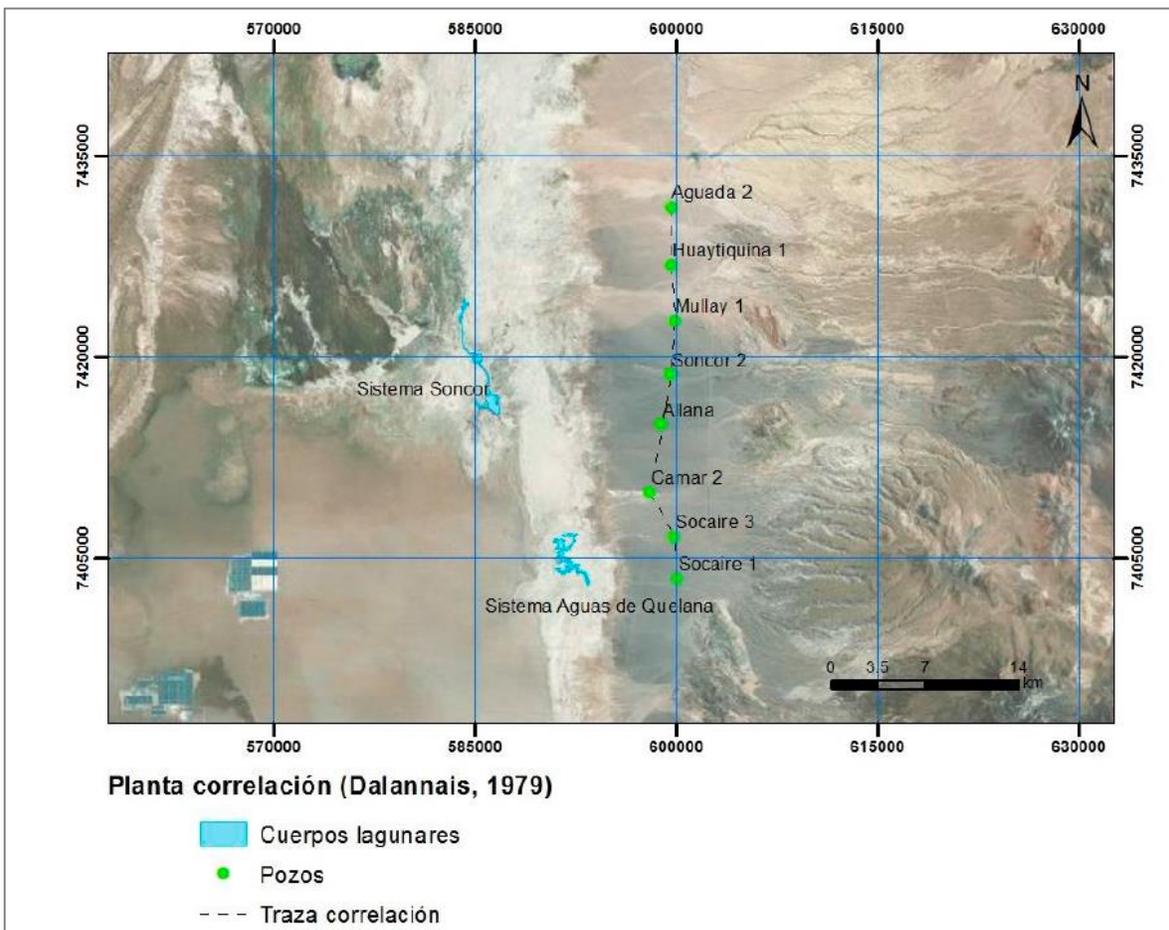


Figura 5-7: Mapa de ubicación del perfil de Dalannais (1979).

Fuente: SGA (2016).

Pozo de bombeo	Pozo de observación	Coordenadas pozo bombeo		Profundidad pozo	T (m ² /d)	K (m/d)	Coeficiente de Almacenamiento	Método de interpretación (antecedentes)	Fuente de los datos según BBDD Antecedentes
		X WGS84	Y WGS84						
Aguada2	Aguada2 OBS	599370	7431230	117	1.376 – 1.413	23	0,000314-0,14	Boulton	A_REF.047; A_REF.093-5_Apéndice H; ND-0202-2727
	Aguada2 OBS				3.954	66	0,034	Recuperación Theis	A_REF.047; A_REF.093-5_Apéndice H; ND-0202-2727
	Aguada2 OBS				2.220	37		Jacob	A_REF.047; A_REF.093-5_Apéndice H; ND-0202-2727
Allana1	No aplica	599471	7416489	175	1.265	15		Jacob	A_REF.047; A_REF.093-5_Apéndice H
CA-2015	Sin información o sin pozo de observación	596136	7396452	110	583			Theis-Jacob	Expediente derecho de agua VPC-0202-5012
					887			Cooper-Jacob	Expediente derecho de agua VPC-0202-5012
					241			Neuman	Expediente derecho de agua VPC-0202-5012
					775			Recuperación de Theis	Expediente derecho de agua VPC-0202-5012
Camar2	Sin información o sin pozo de observación	598261	7410191	357	1.350	18	0,0014	Jacob	A_REF.047; A_REF.093-5_Apéndice H
					2.315	30		Recuperación Theis	A_REF.047; A_REF.093-5_Apéndice H
					930	12	0,0022	Walton	A_REF.047; A_REF.093-5_Apéndice H
					905	12		Recuperación Theis	A_REF.047; A_REF.093-5_Apéndice H
S-6	S-6b	595719	7395209	52	878	29		Cooper-Jacob	Expediente derecho de agua ND-0202-1887
	S-6b	595719	7395209		605	20		Theis-Jacob	Expediente derecho de agua ND-0202-1887
Socaire5	Sin información o sin pozo de observación	598168	7406773	90	984	15		Berkaloff	A_REF.047; A_REF.093-5_Apéndice H
		598168	7406773		1.325 – 1.514	21	0,00053-0,0012	Boulton	A_REF.047; A_REF.093-5_Apéndice H
		598168	7406773		935	14		Jacob	A_REF.047; A_REF.093-5_Apéndice H
SP-1	SP-1B / SP-1C	596124	7394656	?	404	9			A_REF.091. Adenda II; A_REF.093-5_Apéndice H; ND-0202-2217
SP-4	SP-4B / SP-4C	595917	7392816	56	300	7		Theis	A_REF.091. Adenda II; A_REF.093-5_Apéndice H; ND-0202-2216
	SP-4B / SP-4C	595917	7392816		374	8		Cooper-Jacob	A_REF.091. Adenda II; A_REF.093-5_Apéndice H; ND-0202-2216

Tabla 5-7: Parámetros hidráulicos del acuífero UH 1 en el sector del borde este del Salar de Atacama, obtenidas mediante pruebas de bombeo.

Fuente: elaboración propia a partir de antecedentes.

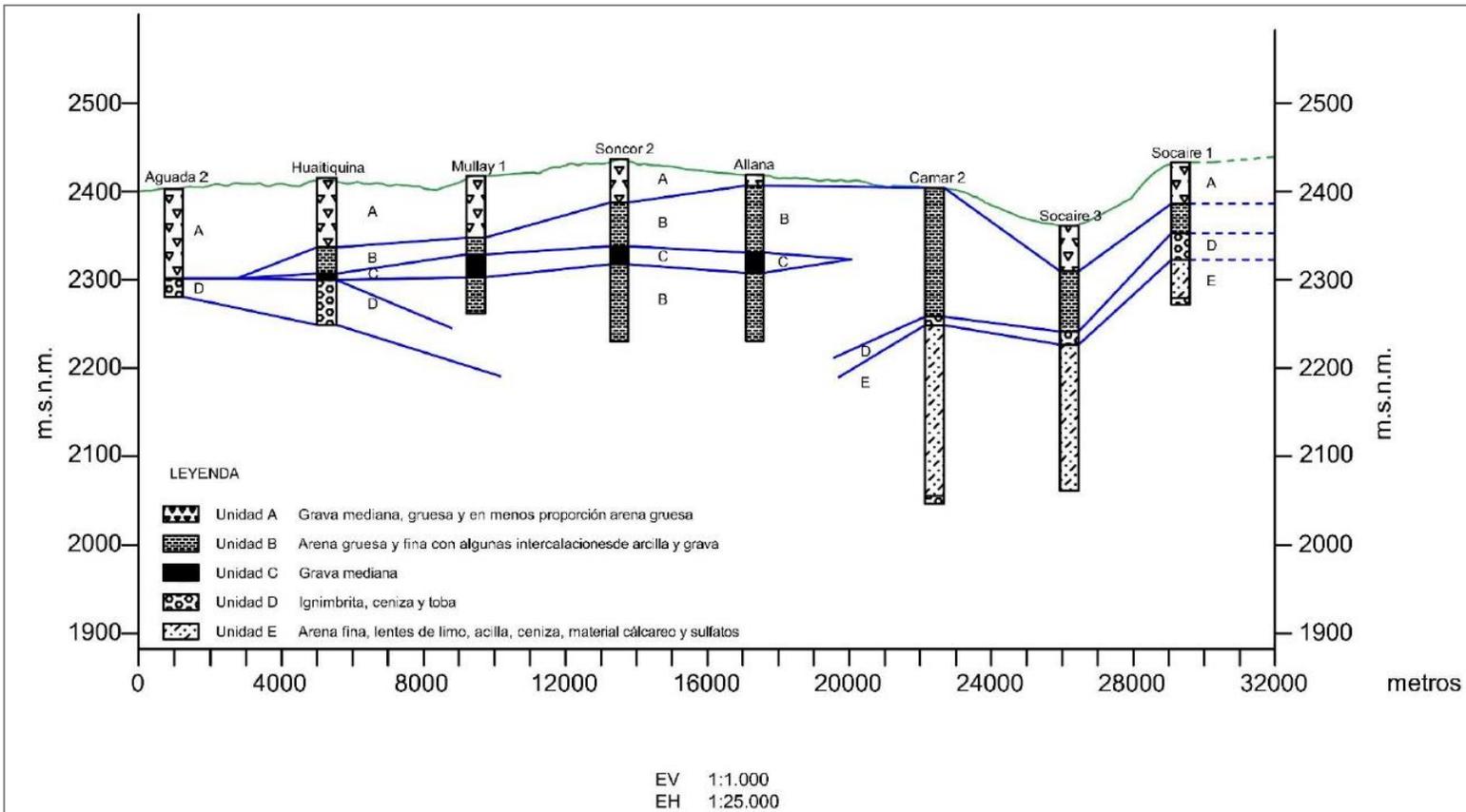


Figura 5-8: Perfil geológico del borde este, a partir de las columnas estratigráficas de pozos.

Fuente: extraído de SGA (2016), modificado de Dalannais (1976).

5.2.2 Unidad Hidrogeológica 2 (UH 2)

La Unidad Hidrogeológica 2 está constituida por las siguientes unidades geológicas que están comprendidas entre las edades del Mioceno hasta el Holoceno.

- Depósitos aterrazados (MPIt, TQt).
- Depósitos lacustres (Ql, Qlc).
- Depósitos piroclásticos (Qp).
- Depósitos morrénicos (Qm).
- Depósitos eólicos (Qe).
- Depósitos coluviales (Qc).
- Secuencia evaporítica (Qs, Qtcl, Qsl, Qcls).

En el mapa geológico de la Hoja de Antofagasta estos depósitos están asociados a los códigos Qal, TQal y Ql. Las zonas de vegas de San Pedro de Atacama también se incluyen en la UH 2.

Los seis primeros depósitos (aterrazados, lacustres, piroclásticos, morrénicos, eólicos y coluviales) pueden formar acuíferos de permeabilidad baja-moderada, discontinuos y locales (por la textura, composición y origen del depósito), mientras que las secuencias evaporíticas que constituyen el núcleo del salar presentan una mayor continuidad lateral y espesor.

A continuación se detallan las características de la UH 2 en la cuenca Salar de Atacama:

- Los depósitos lacustres, eólicos y evaporíticos son los que se encuentran en el Salar de Atacama y el resto se distribuyen a lo largo de la cuenca en afloramientos aislados y poco significativos, ubicados en las zonas montañosas o al pie de los escarpes, como es el caso de los depósitos coluviales. No existen registros de permeabilidad en estos depósitos, pero se estima que esté comprendida entre Baja y Media, según la composición y estratigrafía característica de estos materiales.
- Los depósitos evaporíticos del sector occidental del núcleo del salar (costra salina de cloruros, Qcl) hasta los 50 m de profundidad constituye principalmente una UH 2, aunque es una unidad heterogénea y en algunos sectores tiene un comportamiento más similar a una UH 4, cuyo flujo se debería principalmente a las fracturas teniendo en cuenta los valores de permeabilidad que se han registrado, de hasta 380 m/d (Figura 5-9).

Además, conforma un acuífero libre constituido principalmente por halita porosa. La distribución en profundidad de la porosidad indica que entre los 10 y 20 metros de

profundidad la porosidad efectiva es 6,3% y a más de 20 m disminuye hasta 3,4%, Conama (2003).

Los registros de permeabilidad provenientes de los antecedentes indican que la permeabilidad hidráulica hasta los primeros 50 m de profundidad se caracteriza por ser del orden de 20 m/d en promedio y un coeficiente de almacenamiento que está comprendido entre 0,001 y 0,59.

En la Tabla 5-8 se muestran los parámetros hidráulicos obtenidos a menos de 50 m de profundidad, para cada pozo que se ubica en la UH 2 del sector occidental del núcleo.

Pozos	X (WGS84)	Y (WGS84)	K (m/d)	Coefficiente de almacenamiento	Fuente de los datos
E-330P	563436	7396637		0,586	EIA SQM Adenda 2
E-315P	561675	7393286	0,04	0,269	EIA SQM Adenda 2
E-314P	560866	7391247	0,06	0,554	EIA SQM Adenda 2
EXP-1	567143	7387997	0,08		ACA 1989
E-338P	563362	7389899	0,21	0,317	EIA SQM Adenda 2
CLO-53.1	572026	7384518	0,22		Quintadrill 2014
CLO-53.2	572021	7384528	0,22		Quintadrill 2014
EXP-2	565861	7388442	0,56		ACA 1989
EXP-3	563842	7388019	0,84		ACA 1989
CL-27	567043	7388162	0,85		AC 1996
ALTERN-6	564360	7388173	1,47		ACA 1989
EXP-5	564900	7388289	1,56		ACA 1989
E-318P	562246	7392257	1,67	0,045	EIA SQM Adenda 2
ALTERN-8	564836	7388483	2,51		ACA 1989
EXP-4	564431	7387832	2,51		ACA 1989
E-253P	567815	7393530	2,58	0,021	EIA SQM Adenda 2
CL-28	568539	7384505	2,59		AC 1996
CL-26	564419	7387956	2,94		AC 1996
POZO-J	555012	7380604	3,20	0,035	GCF 2001
CLO-61	571040	7386741	3,36		Quintadrill 2014
CAO-6	568807	7385550	4,23	0,053	Quintadrill 2014
E-365P	565805	7394402	4,43	0,031	EIA SQM Adenda 2
E-370P	565916	7395397	4,45	0,018	EIA SQM Adenda 2
CLO-59	555720	7380455	4,57		Quintadrill 2014
E-327P	567815	7394363	4,67	0,008	EIA SQM Adenda 2
E-350P	559840	7391268	4,82	0,021	EIA SQM Adenda 2
E-251P	568323	7393537	5,43	0,035	EIA SQM Adenda 2
E-337P	562229	7390205	6,44	0,028	EIA SQM Adenda 2
H-1	564350	7390400	6,48		AC 1996
E-359P	559890	7394237	6,51	0,014	EIA SQM Adenda 2
1-G	559316	7412125	6,82	0,069	EIA SLM NX-1 Adenda 3
E-311P	551789	7382338	7,20	0,001	EIA SQM Adenda 2
CL-29	569513	7383212	7,43		AC 1996
E-449P	553783	7392587	8,80	0,055	EIA SQM Adenda 2

Tabla 5-8: Parámetros hidráulicos del acuífero UH 2 en el sector occidental del núcleo del salar, obtenidas mediante pruebas de bombeo, representativas de menos de 50 m de profundidad.

Fuente: modificado de SGA (2015).

Pozos	X (WGS84)	Y (WGS84)	K (m/d)	Coefficiente de almacenamiento	Fuente de los datos
E-449P	553783	7392587	8,80	0,055	EIA SQM Adenda 2
E-316P	561925	7391277	9,44	0,314	EIA SQM Adenda 2
E-349P	564464	7390101	9,88	0,009	EIA SQM Adenda 2
E-287P	553811	7384595	10,10	0,035	EIA SQM Adenda 2
CL-16	567648	7385680	10,30		Kunas z 1979
E-361P	561916	7394137	10,40	0,056	EIA SQM Adenda 2
TRENCH	569310	7386317	10,40		AC 1996
CAO-4.2	567121	7386011	10,70	0,042	Quintadrill 2014
E-461P	559657	7388658	11,50	0,040	EIA SQM Adenda 2
E-357P	559545	7393192	12,90	0,031	EIA SQM Adenda 2
E-459P	558438	7387333	13,00	0,022	EIA SQM Adenda 2
E-353P	559309	7392280	13,40	0,071	EIA SQM Adenda 2
E-286P	551820	7384679	14,40	0,066	EIA SQM Adenda 2
E-369P	564946	7395385	17,30	0,030	EIA SQM Adenda 2
E-426P	555795	7389657	18,70	0,074	EIA SQM Adenda 2
E-463P	552812	7387616	18,70	0,065	EIA SQM Adenda 2
E-295P	551828	7387814	18,90	0,062	EIA SQM Adenda 2
CAO-1.1	555336	7380891	19,10	0,016	Quintadrill 2014
E-293P	555837	7385646	19,40	0,082	EIA SQM Adenda 2
E-334P	558763	7390126	19,80	0,048	EIA SQM Adenda 2
E-378P	564544	7391352	21,80	0,001	EIA SQM Adenda 2
E-371P	566915	7395387	22,40	0,009	EIA SQM Adenda 2
E-435P	555786	7391679	23,00	0,011	EIA SQM Adenda 2
E-283P	551783	7383619	23,50	0,003	EIA SQM Adenda 2
E-446P	554765	7384772	24,50	0,141	EIA SQM Adenda 2
E-294	555824	7386693	25,80	0,349	EIA SQM Adenda 2
E-309P	550794	7382350	25,90	0,070	EIA SQM Adenda 2
E-443P	558492	7388649	25,90	0,065	EIA SQM Adenda 2
E-351P	562905	7391350	26,80	0,005	EIA SQM Adenda 2
E-290P	552764	7385623	28,80	0,041	EIA SQM Adenda 2
E-433P	551770	7391660	28,80	0,004	EIA SQM Adenda 2
E-348P	563998	7389876	31,90	0,014	EIA SQM Adenda 2
E-363P	563995	7394247	33,10	0,014	EIA SQM Adenda 2
E-340P	558817	7394237	36,00	0,014	EIA SQM Adenda 2
E-447P	557168	7385650	38,90	0,001	EIA SQM Adenda 2
E-302P	554148	7389748	40,30	0,035	EIA SQM Adenda 2
E-339P	559272	7391284	40,40	0,008	EIA SQM Adenda 2
CL-25	570215	7385308	40,60		AC 1996
CAO-4.1	567116	7385996	40,90	0,152	Quintadrill 2014
E-360P	560856	7394197	42,40	0,024	EIA SQM Adenda 2
E-465P	549816	7383640	44,60	0,022	EIA SQM Adenda 2
CAO-1.2	555350	7380878	45,20	0,249	Quintadrill 2014
E-291P	553840	7385661	56,20	0,021	EIA SQM Adenda 2
E-385P	563526	7392380	62,30	0,010	EIA SQM Adenda 2
CL-24	570065	7382266	63,10		AC 1996
CL-23	571159	7384550	76,0		AC 1996
E-422P	549801	7382324	79,2	0,340	EIA SQM Adenda 2
E-390P	555779	7388649	80,6	0,212	EIA SQM Adenda 2
E-454P	557148	7384744	82,1	0,234	EIA SQM Adenda 2

Tabla 5-8 (Continuación): Parámetros hidráulicos del acuífero UH 2 en el sector occidental del núcleo del salar, obtenidas mediante pruebas de bombeo, representativas de menos de 50 m de profundidad.

Fuente: modificado de SGA (2015).

Cabe destacar que a más de 50 m de profundidad la permeabilidad se reduce dos órdenes de magnitud y en promedio se obtienen valores de 0,4 m/d, mientras que el coeficiente de almacenamiento es de entre 0,0026 y 0,86 (Tabla 5-9), valores característicos de un acuífero libre.

Pozos	X (WGS84)	Y (WGS84)	K (m/d)	Coefficiente de almacenamiento	Fuente de los datos
E-295P	551828	7387814	0,01	0,003	EIA SQM Adenda 2
E-316P	561925	7391277	0,02	0,068	EIA SQM Adenda 2
E-350P	559840	7391268	0,02	0,016	EIA SQM Adenda 2
E-465P	549816	7383640	0,02		EIA SQM Adenda 2
E-287P	553811	7384595	0,03		EIA SQM Adenda 2
E-453P	555782	7384740	0,03		EIA SQM Adenda 2
E-338P	563362	7389899	0,04	0,101	EIA SQM Adenda 2
E-339P	559272	7391284	0,04	0,049	EIA SQM Adenda 2
E-378P	564544	7391352	0,05	0,319	EIA SQM Adenda 2
E-390P	555779	7388649	0,10		EIA SQM Adenda 2
E-315P	561675	7393286	0,10	0,195	EIA SQM Adenda 2
E-298P	555820	7387648	0,10		EIA SQM Adenda 2
E-354P	560243	7392290	0,11	0,010	EIA SQM Adenda 2
E-357P	559545	7393192	0,11	0,083	EIA SQM Adenda 2
E-461P	559657	7388658	0,11		EIA SQM Adenda 2
E-369P	564946	7395385	0,12	0,244	EIA SQM Adenda 2
E-459P	558438	7387333	0,13		EIA SQM Adenda 2
E-426P	555795	7389657	0,14		EIA SQM Adenda 2
E-330P	563436	7396637	0,14	0,024	EIA SQM Adenda 2
E-318P	562246	7392257	0,16	0,312	EIA SQM Adenda 2
E-337P	562229	7390205	0,16	0,558	EIA SQM Adenda 2
E-353P	559309	7392280	0,16	0,620	EIA SQM Adenda 2
E-360P	560856	7394197	0,16	0,078	EIA SQM Adenda 2
E-294P	555812	7386659	0,17		EIA SQM Adenda 2
E-348P	563998	7389876	0,17	0,204	EIA SQM Adenda 2
E-412P	553717	7386766	0,18		EIA SQM Adenda 2
E-443P	558492	7388649	0,20		EIA SQM Adenda 2
E-340P	558817	7394237	0,21	0,204	EIA SQM Adenda 2
E-371P	566915	7395387	0,26	0,406	EIA SQM Adenda 2
E-362P	562916	7394207	0,30	0,175	EIA SQM Adenda 2
E-309P	550794	7382350	0,31		EIA SQM Adenda 2
E-349P	564464	7390101	0,35	0,407	EIA SQM Adenda 2
E-292P	554854	7385623	0,38		EIA SQM Adenda 2
E-302P	554148	7389748	0,38		EIA SQM Adenda 2
E-365P	565805	7394402	0,39	0,756	EIA SQM Adenda 2
E-293P	555837	7385646	0,70	0,320	EIA SQM Adenda 2
E-370P	565916	7395397	0,72	0,137	EIA SQM Adenda 2
E-283P	551783	7383619	0,75		EIA SQM Adenda 2
E-359P	559890	7394237	0,80		EIA SQM Adenda 2
E-314P	560866	7391247	0,94	0,519	EIA SQM Adenda 2
E-355P	561215	7392277	0,98	0,859	EIA SQM Adenda 2
E-361P	561916	7394137	3,32		EIA SQM Adenda 2
E-351P	562905	7391350	5,18	0,106	EIA SQM Adenda 2

Tabla 5-9: Parámetros hidráulicos del acuífero UH 2 en el sector occidental del núcleo del salar, obtenidas mediante pruebas de bombeo, representativas de más de 50 m de profundidad.

Fuente: modificado de SGA (2015).

- En el sector sur de la Zona Marginal del salar (Figura 5-1), que está representada en superficie por las costras salinas de transición a cloruros, sulfatos y limos salinos, tienen una permeabilidad variable, de entre 0,3 m/d (pozos TPZ-13A y MPS-AA) y 70 m/d (MP-02A), datos correspondientes a menos de 50 m de profundidad (ensayos de slug test o packer y pruebas de bombeo). En general se observa que el acuífero es heterogéneo y presenta zonas de mayor permeabilidad en asociación a fracturas o fallas. Dichas características son propias de un acuífero UH 3 (12.500 m/d de permeabilidad).
- El acuífero de Monturaqui-Negrillar-Tilopozo (MNT) constituye una UH 2 y está formado principalmente por una alternancia de gravas pobremente estratificadas con lentes de arena gruesa, clastos exclusivamente volcánicos neógenos, con niveles arenosos, ignimbritas y depósitos piroclásticos (Estratos de Quebrada Salín y Estratos de Tilocalar, en el Anexo II se puede observar el mapa geológico de detalle de esta zona proveniente de Golder, 2017. Entre estos materiales se encuentra la Ignimbrita Tucúcaro alternada. Las permeabilidades asociadas a la UH 2 del acuífero MNT es de 19 m/d y el coeficiente de almacenamiento del orden de 10^{-1} según los registros presentados por Golder (2017) (Tabla 5-4).

5.2.3 Unidad Hidrogeológica 3 (UH 3)

El sector oriental del núcleo del Salar de Atacama (Qcl), correspondiente al bloque hundido del Sistema de Falla Salar (SFS) y parte de la Zona marginal del sur del núcleo (Qcls, Qs y Qtcls), corresponde a un acuífero UH 3, cuyo flujo subterráneo se produce principalmente a través de discontinuidades (fracturas, fallas, estratificación) que han sufrido procesos de disolución. La permeabilidad obtenida en este sector es Muy Alta y difiere significativamente de las obtenidas en el sector occidental del núcleo (clasificado como un acuífero UH 2, con sectores UH 4). El rango de permeabilidad, según la disponibilidad de datos de antecedentes, está comprendido entre 40 m/d y 169.000 m/d, en promedio 20.000 m/d (Tabla 5-10), según los parámetros obtenidos en pruebas de bombeo.

La variabilidad en los valores de la permeabilidad y la frecuente presencia de registros superiores a 100 m/d y hasta 169.000 m/d, denotan la heterogeneidad del acuífero y la existencia de un sistema kárstico bien desarrollado.

El espesor del acuífero kárstico se desconoce con precisión, pero se estima que podría tener alrededor de 20-50 m, debido a que se espera que los procesos de karstificación disminuyan con la profundidad. Por lo tanto, a mayor profundidad la permeabilidad debe disminuir y pasar a ser una unidad de menor potencial hidrogeológico. Lo anterior se ha registrado en un ensayo de bombeo en una sección del acuífero representativa de más de 50 m de profundidad, mediante el cual se obtuvo una permeabilidad de 10^{-2} m/d (Dictuc, 2006) (Pozo 2018 a > 50 m, Tabla 5-10). La UH 3 está en contacto lateral con una la UH 2 en superficie.

Pozos	X (WGS84)	Y (WGS84)	K (m/d)	Coefficiente de almacenamiento	Profundidad del ensayo	Fuente de los datos
K-13,5	578877	7409408	43	0,06	< 50 m	EIA Rockwood 2009
K-4,5	580928	7400412	66	0,04	< 50 m	EIA Rockwood 2009
K-15	579208	7411194	112	0,055	< 50 m	EIA Rockwood 2009
K-9,5	579539	7405505	112	0,02	< 50 m	EIA Rockwood 2009
K-17,5	577951	7413509	475	0,18	< 50 m	EIA Rockwood 2009
K-21,5	573718	7416816	2.420	0,0064	< 50 m	EIA Rockwood 2009
K-20	575636	7416155	2.590	0,12	< 50 m	EIA Rockwood 2009
PN-08	582638	7382424	7.280	0,137	< 50 m	SGA
PN-05	576891	7384048	169.000	0,209	< 50 m	SGA
2018	578014	7391896	0,010		> 50 m	EIA SQM Adenda 2
PN-14	573767	7378720	55.500	0,053	< 50 m	SGA
PN-16	575656	7377001	12.500	0,21	< 50 m	SGA

Tabla 5-10: Parámetros hidráulicos del acuífero UH 3 en la parte oriental del núcleo del Salar de Atacama, obtenidos mediante pruebas de bombeo.

Fuente: modificado de SGA (2015).

5.2.4 Unidad Hidrogeológica 4 (UH 4)

Los acuíferos de características UH 4 de la cuenca en estudio corresponden a rocas estratificadas principalmente sedimentarias e ignimbritas, todas ellas formadas entre el Mioceno y el Holoceno.

Además, tal y como se ha nombrado anteriormente (capítulo 5.2.2) existe una parte de los depósitos evaporíticos del sector occidental del núcleo del salar (costra salina de cloruros, Qcl) que tiene características de UH 4, cuyo flujo se debería principalmente a las fracturas teniendo en cuenta los valores de permeabilidad que se han registrado, de hasta 380 m/d (Figura 5-9).

En general, constituyen acuíferos extensos de permeabilidad Baja y se estima que pueden almacenar agua subterránea y transmitirla muy lentamente. La permeabilidad es principalmente secundaria por fracturación, fallas y/o disolución de fracturas y en menor proporción, por porosidad primaria, debido a las características texturales, litológicas y estratigráficas que presentan.

- Las rocas sedimentarias que pueden constituir una UH 4 son las siguientes:

- Formación Tambores

Los materiales de Formación Tambores constituyen acuíferos de carácter libre o confinado, fisurados (paraconglomerados) y en parte, porosos (areniscas mal consolidadas y cementadas por sal y calcita). Además, el cemento puede haber sido disuelto y por lo tanto, la permeabilidad puede venir dada por porosidad secundaria.

- Formación San Pedro

Las areniscas y limolitas cementadas por sal y yesos, así como los conglomerados y los potentes mantos de sal y yeso que conforman la Formación San Pedro, pueden constituir, en los afloramientos de la Cordillera de Domeyko, acuíferos locales de Baja permeabilidad, asociados a disolución de fracturas y porosidad secundaria por disolución del cemento.

La Formación San Pedro también constituye el basamento del núcleo de halita, que se encuentra aproximadamente entre 900 m y 1.100 m de profundidad con respecto a la superficie. En este caso, debido a la reducida porosidad por compactación y ausencia de disolución por percolación de agua meteórica, se asemeja a una UH 6 (Figura 5-6).

- Formación el Campamento

El Campamento puede formar acuíferos pobres, libres o confinados de carácter local, constituidos por alternancia de tobas, halitas, silvina, yeso y paraconglomerados, cuyos clastos son de yeso blanco y la matriz es de yeso polvoriento y limos. Posiblemente la permeabilidad se deba principalmente a las fracturas y/o a la disolución de éstas y también, a discontinuidades como la estratificación. En menor grado la permeabilidad viene dada por la porosidad primaria en las evaporitas (halitas y yeso).

- Formación el Tambo

Las calizas y las calizas arenosas con oquedades forman acuíferos pobres y heterogéneos. La permeabilidad está asociada a disolución de fracturas. Si las fracturas están disueltas y son lo suficientemente importantes, pueden contener agua y transmitirla rápidamente a través de canales de disolución.

- Las ignimbritas que se agrupan como acuíferos UH 4 son las de bajo a moderado grado de consolidación, tienen características texturales que pueden ser favorables para la transmisión de flujo, como por ejemplo, matriz vitreoclástica desvitrificada (polvo de vidrio) y mayor proporción de pómez con respecto a los fenocristales que presenta. Además, presentan una gran extensión en superficie y espesores entre los 40 y 60 m, excepcionalmente 100 m (Ramírez y Gadeweg, 1982).

Las ignimbritas que cumplen las características anteriores conforman acuíferos pobres, locales y se caracterizan por ser acuíferos de tránsito entre las zonas de recarga y descarga, prácticamente no deben almacenar agua, ya que se encuentran aflorando en zonas montañosas con pendiente, excepto parte de la ignimbrita Tucúcaro, que se encuentra intercalada con depósitos aterrizados (TQal, UH 2). Golder (2017) estima una permeabilidad de 0,5 m/d en la ignimbrita Tucúcaro.

Código litológico	UH	Nombre	Nivel de soldamiento según carta geológica Toconao	Resumen descripción Carta geológica Toconao
MsPlp	UH 4	Ignimbrita La Pacana	Moderada a débilmente soldada. Excepcionalmente bandeadas y fuertemente soldada	Textura vitreoclástica parcialmente desvitrificada (polvo de vidrio). Fenocristales de cuarzo y plagioclasa en un 20-40%
MsPlt	UH 4	Ignimbrita Toconao	Consolidación moderada	Escasos fenocristales (2-5%) y matriz en polvo de vidrio.
Pltc	UH 4	Ignimbrita Tucúcaro	Consolidación moderada.	Escasos fenocristales (5-15%). Textura desvitrificada.
Pc	UH 4	Ignimbria Cajón	Espesor métrico a 250 m. Débilmente consolidada a muy consolidada en las partes distales	Mayor proporción de pómez con respecto los escasos fenocristales. Matriz de polvo de vidrio. Flujos de ceniza
Qc				
Pla	UH 5	Ignimbrita Atana	Consolidación débil a moderadamente soldada.	Fenocristales (20-50%). Matriz de vidrio
Plp	UH 5	Ignimbrita Patao	Base deleznable y parte superior soldada. Afectada ocasionalmente por diaclasamiento columnar.	Escasos fenocristales (5-15%). Matriz microcristalina.
Qt	UH 5	Ignimbrita Tuyajto	Poco potente (decímetros a 3 metros). Moderada a fuertemente soldada.	Abundantes fenocristales (25%), matriz de vidrio.
Mss	UH 5	Ignimbrita Sifón	Bien soldadas y cristalizadas (espesor hasta 120 m como máximo).	Toba de cristales fuertemente soldada con escasos fragmentos de pómez (2-4 mm). Matriz vítrea. Diaclasas de enfriamiento en la parte superior.
Msyb	UH 5	Ignimbrita Yerba Buena	Bien consolidado.	Toba brechosa principalmente de vidrio volcánico. Toba brechosa de lapilli. Toba brechosa de textura clástica.
Msp	UH 5	Ignimbrita Pelón	Fuertemente soldada	Toba superior de textura clástica y matriz de vidrio y textura esferulítica.
PIQc	UH 5	Ignimbrita Chaxas	Toba brechosa. Potencia entre 50-70 y otros autores aproximan 300 m (Guest, 1969). No se especifica el grado de consolidación.	Toba brechosa con matriz vítrea. Toba de lapilli. Toba brechosa poco soldada.

Tabla 5-11: Características de las ignimbritas UH 4.

Fuente: elaboración propia a partir de Ramírez y Gardeweg (1982); Manirovic y Lahsen (1984) y Boric, Díaz y Maksaev (1987).

Las ignimbritas que constituyen una UH 4 se presenta en la Tabla 5-11. El resto de ignimbritas constituyen unidades UH 5.

5.2.5 Unidad Hidrogeológica 5 (UH 5)

Las unidades geológicas que se agrupan en la UH 5 en la cuenca Salar de Atacama corresponden a rocas estratificadas volcano-sedimentarias y rocas intrusivas (granitoides y pórfidos), formadas entre el Ordovícico y el Eoceno. Los materiales anteriores están afectados por fallas y pliegues generados en procesos orogénicos y además, presentan afloramientos extensos, así como espesores relativamente importantes (espesores máximos de 1.600 m en la Formación Agua Dulce y 2.000 m en la Formación Lila). No obstante, son materiales de muy baja permeabilidad y se estima que pueden contener escasos recursos hídricos. A continuación, se enumeran las formaciones que se agrupan en esta unidad:

- Formación Lila (Pzl, DCs),
- Formación Tuina (Pt),
- Formación Agua Dulce (Trjad),
- Formación Purilactis (Kp, Jkp),
- Formación Cinchado (Tic),
- Formación Vilama (Qvi, MsQv).

Las ignimbritas soldadas, cristalizadas o débilmente soldadas, pero de espesor y extensión reducida, que se originaron entre el Mioceno y el Pleistoceno, también se han caracterizado como UH 5. Las ignimbritas que se incluyen en esta unidad son las siguientes (Tabla 5-11):

- Ignimbrita Alana
- Ignimbrita Patao
- Ignimbrita Tuyajto
- Ignimbrita Sifón
- Ignimbrita Yerba Buena
- Ignimbrita Pelón
- Ignimbrita Chaxas

La UH 5 aflora principalmente a lo largo de la Cordillera Principal, al norte de la cuenca, en el Cordón de Lila y en las partes altas de la Cordillera de Domeyko. Está en contacto lateral con la UH 6 y subyace a la UH 4 y UH 2, principalmente (Figura 5-9).

5.2.6 Unidad Hidrogeológica 6 (UH 6)

Las secuencias volcánicas (Formación Cas y Formación Cerros Negros), sedimentario-volcánicas en ambiente lacustre (Estratos El Bordo) o sedimentario-volcánicas principalmente constituidas por andesitas, dacitas, tobas y brechas (Formación Peine) originadas entre el Devónico y el Jurásico Inferior, que además, presentan afloramientos aislados en superficie y espesores entre 200 m y 600 m (menores que los de la UH 5), se consideran de muy baja permeabilidad y esencialmente, se estima que no presentan recursos de agua subterránea, debido a su naturaleza.

Además, los Estratos de Queque, formados por areniscas, conglomerados y limolitas, originados en el Paleoceno y por lo tanto, no afectados por las fallas y pliegues originados en los distintos procesos orogénicos, también se consideran en este grupo.

En particular se incluyen también en la UH 6, los conjuntos de volcanes I, II y III (Mioceno-Pleistoceno) constituidos por estrato-volcanes andesíticos y dacíticos, domos y lavas, se consideran masas compactas de rocas, de muy baja permeabilidad, así como las rocas intrusivas del Mioceno-Plioceno, que por edad se encuentran menos afectadas por fallas.

Los materiales anteriores afloran en el Cordón de Lila, en la parte alta de la Cordillera Occidental y la Cordillera de Domeyko.

En la Figura 5-9 se presenta el mapa hidrogeológico con la distribución de las de Unidades Hidrogeológicas y en la Tabla 5-12 se incluye un resumen de las unidades hidrogeológicas, los parámetros hidráulicos y los acuíferos identificados en la cuenca Salar de Atacama.

AMPHOS 21		UNIDADES HIDROGEOLOGICAS CUENCA SALAR DE ATACAMA					
UH	Unidades Geológicas (UG)*	Litología	Zona/Sector	Acuífero	Rango espesor detectado de UG	K promedio o rango (m/d)	Tipo de dato
1	Qal	Depósitos aluviales (gavas y arenas con intercalaciones de arcillas y limos)	Borde norte	Acuífero aluvial	20-80 m	50	PPBB
			Borde este		50 - >100 m	35	
			Borde sur		20-50 m	50	
2	Qcl	Halita porosa (porosidad ~ 6%)	Sector occidental del núcleo del salar (< 50 m)	Acuífero superior núcleo de halita	20-50 m	20	Custodio y Llamas (2001)
	Qs, Qcls, Qsl, Qtcl	Costras salinas de sulfatos, transición a cloruros, sulfatos con limos, costra salina de cloruros y sulfatos	Zona Marginal norte y este	Acuífero depósitos salinos	Indefinido	0,3 - 70	
	Mplt, TQt, Ql, Qlc, Qp, Qm, Qe, Qc	Depósitos de pie de monte, piroclásticos, lacustres, morrénicos y eólicos	Cuenca Salar de Atacama	Acuíferos aislados, locales	Indefinido	2 - 0,001	
	TQal (MPqs** y OMet**)	Estratos de Quebrada Salín (MPqs, gravas y arenas), Estratos de Tilocalar (OMet, gravas y arenas limosas con grado de compactación variable)	Monturaqui-Negrillar-Tilopozo	Acuífero MNT	295-350 m	19	
3	Qcl	Halita fracturada y karstificada	Sector oriental del núcleo del salar (< 50 m)	Acuífero kárstico depósitos salinos	20-50 m	40-169.000	PPBB
	Qcls, Qs, Qtcls	Costras salinas de sulfatos, transición a cloruros, sulfatos con limos, costra salina de cloruros y sulfatos	Zona Marginal sureste	Acuífero depósitos salinos	Indefinido	200-12.500	
4	Qcl, Qcls, Qs, Qtcls	Halita fracturada y costras salinas de sulfatos, transición a cloruros, sulfatos con limos, costra salina de cloruros y sulfatos	Núcleo de halita (< 50 m)	Acuífero fisurado de halita y depósitos salinos	20-50 m	100-800	Slug test + PPBB
	Qcl	Halita compacta (porosidad ≤ 3%)	Núcleo del salar (> 50 m)	Acuífero inferior núcleo de halita	900-1.100 m	0,01-0,4	
	Tt, TSc, TSp, Plpp, MsQec, TQet,	Paraconglomerados, areniscas mal consolidadas y cementadas por sal y calcita, arcillas yesíferas. Halita, yeso y silvina, alternancia de tobas y calizas mal estratificadas con abundantes oquedades.	Cordillera de Domeyko, Salar de Atacama y Cordillera Principal	Acuíferos de baja permeabilidad, pero de gran extensión. Se encuentran en las áreas de recarga de la cuenca	6 y 2.100 m	10 ⁻¹ -10 ⁻⁴	Custodio y Llamas (2001)
	Pltc, Pit**	Ignimbrita Tucúcaro intercalada en los Estratos de Quebrada Salín	Monturaqui-Negrillar-Tilopozo		20 m	0,5	Estimación de Goder (2017)
	MsPlp, MsPlt, Pltc	Ignimbrita La Pacana, Toconao y Cajón.	Zona Cordillera		40-100 m	10 ⁻¹ -10 ⁻⁴	Estimación según descripciones litológicas y texturales de Ramirez y Gardeweg (1982); Manirovic y Lahsen (1984) y Boric, Díaz y Maksaeve (1987)
5	Pzl, Dcs, Pt, TrJad, Kp, Jkp, Tic, Qvi, MsQv	Rocas estratificadas y vulcano-sedimentarias, rocas intrusivas (granitoides y pórfidos) e ignimbrotas soldadas o débilmente soldadas pero de espesor y extensión reducida	Zona Cordillera	Materiales con escasos recursos hídricos	250-2500	< 10 ⁻⁴	
	Pla, Plp, Qt, Mss, Msyb, Msp, PIQc	Ignimbrita Alana, Patao, Tuyajto, Sifón, Yerba Buena, Pelón, Chaxas	Zona Cordillera		40-100		
6	PzTrc, Pzl, DCs, Pt, Trjad, Kp, Jkp, Tic, Qvi, MsQv	Rocas estratificadas vulcano-sedimentarias. Rocas intrusivas (granitoides y pórfidos). Ordovícico-Eoceno	Zona Cordillera	No constituye acuífero	200-600	< 10 ⁻⁵	
	Mv, PIQv, Qv, Msv, Plpi, Plv, Ptv, PiPv, Qv, TQv	Conjunto de volcanes I, II y III (Mioceno-Pleistoceno)	Zona Cordillera		Indefinido		

* Códigos correspondientes al mapa geológico de las hojas de Antofagasta, Toconao y Calama

** Los códigos corresponden al mapa geológico de Golder (2017)

Tabla 5-12: Resumen de los parámetros hidráulicos, acuíferos y unidades hidrogeológicas de la Cuenca del Salar de Atacama. Fuente: elaboración propia a partir de antecedentes.

Fuente: elaboración propia.

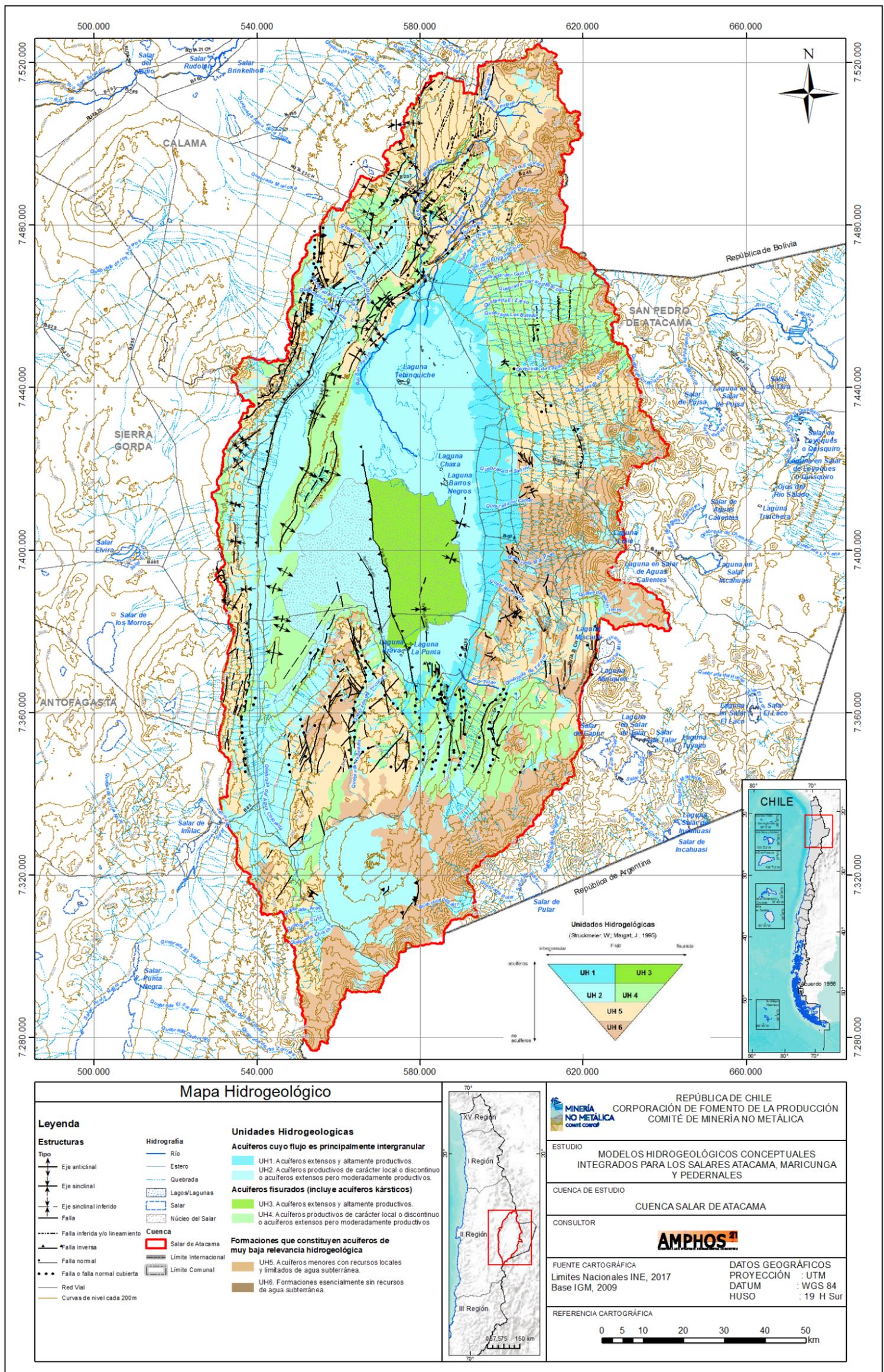


Figura 5-9: Mapa hidrogeológico de la cuenca Salar de Atacama.

Fuente: elaboración propia.

5.3 Geometría de los acuíferos (3D Leapfrog)

Para la definición de la geometría de los acuíferos se llevó a cabo una revisión detallada de la información geofísica disponible y recopilada en la cuenca, en conjunto con el análisis de la información estratigráfica de pozos y/o sondajes. Respecto de la información geofísica la Figura 5-10 muestra la distribución de los distintos levantamientos geofísicos que fueron recopilados para el análisis e interpretación de la geometría de los acuíferos. Los diferentes métodos geofísicos corresponden a gravimetría (GRAV), Transiente Electromagnético (TEM -NanoTEM), sísmica, tomografía eléctrica y magnetotelúricos-audiomagnetotelúrico (MT-AMT) (Tabla 5-13). La columna estratigráfica de los sondajes y/o pozos utilizados para el presente análisis se encuentran en el Anexo II del actual informe, así como los perfiles geofísicos.

5.3.1 Prospecciones geofísicas

En este capítulo se realiza un análisis hidrogeológico de cada método geofísico estudiado. En la Tabla 5-13 se observan los levantamientos geofísicos recopilados para el análisis de la geometría de los acuíferos y en la Figura 5-12 su ubicación.

A modo de introducción, mediante el análisis de los perfiles geofísicos se han diferenciado grandes unidades geológicas con comportamientos hidrogeológicos distintos y además, se ha identificado la interfaz salina entre salmuera y agua dulce-salobre:

- Depósitos evaporíticos del Holoceno (contienen la salmuera).
- Formación San Pedro y Tambores que conforman el basamento, de edad Mioceno-Plioceno, de los depósitos evaporíticos del Holoceno.
- Grupo Purilactis de edad Cretácica, unidad que subyace a la Fm. San Pedro y Tambores.

Año	Autor	Técnica	Longitud	Sector	Referencia
2002	Muñoz <i>et al.</i>	Sísmica (ENAP)	200 km	Salar de Atacama	A_REF.010
2006	Arriagada <i>et al.</i>	Sísmica (ENAP)	190 km	Salar de Atacama	A_REF.100
2015	Rubilar, J. F.	Sísmica (ENAP)	400 km	Salar de Atacama	A_REF.061
2004	SLM NX Uno de Peine	TEM-NanoTEM	325 km	Margen Este Salar de Atacama	A_REF.029-2
2004-2008	SLM NX Uno se Peine	TEM	135 km	Margen Oeste Salara de Atacama	A_REF.029-2
2014-2015	DGA	TEM GRAV MT	190 km	Margen Este Salar de Atacama	A_REF.063
2017	Minera Escondida	TEM, ELEC.	36 km	Margen sur Salar de Atacama	A_REF.092
2013	Rockwood L.	TEM	134 km	Margen sur Salar de Atacama	A_REF.093

Tabla 5-13: Levantamientos geofísicos recopilados para el análisis de la geometría de los acuíferos.

Fuente: elaboración propia.

5.3.1.1 Perfiles sísmicos en el Salar de Atacama y Borde Oeste del Salar.

La información sísmica recopilada consistió en una serie de 14 perfiles sísmicos, todos elaborados por ENAP (Empresa Nacional del Petróleo) y presentados en diversos trabajos posteriores de manera cruda o interpretados, de los cuales 3 cruzan completamente la extensión del salar en una orientación aproximada EW, mientras que 7 lo hacen en una orientación similar, pero sólo cubriendo una extensión parcial desde el borde oeste. Finalmente, tres perfiles sísmicos se orientan según un trazado preferente NS, uno de ellos a lo largo del margen oeste del salar, y dos a lo largo de la parte central del salar.

Los perfiles sísmicos elaborados por ENAP presentan una escala de representación vertical en unidades de tiempo (de recorrido de onda; *Two-way travelttime: TWT*) por lo que las profundidades asociadas a los límites entre las principales secuencias identificadas corresponden a interpretaciones desarrolladas en los trabajos citados. La principal fuente de correlación vertical utilizada ha sido la información proporcionada por el pozo Toconao-1 ubicado próximo al centro del salar, y que fue perforado hasta 5.425 m de profundidad.

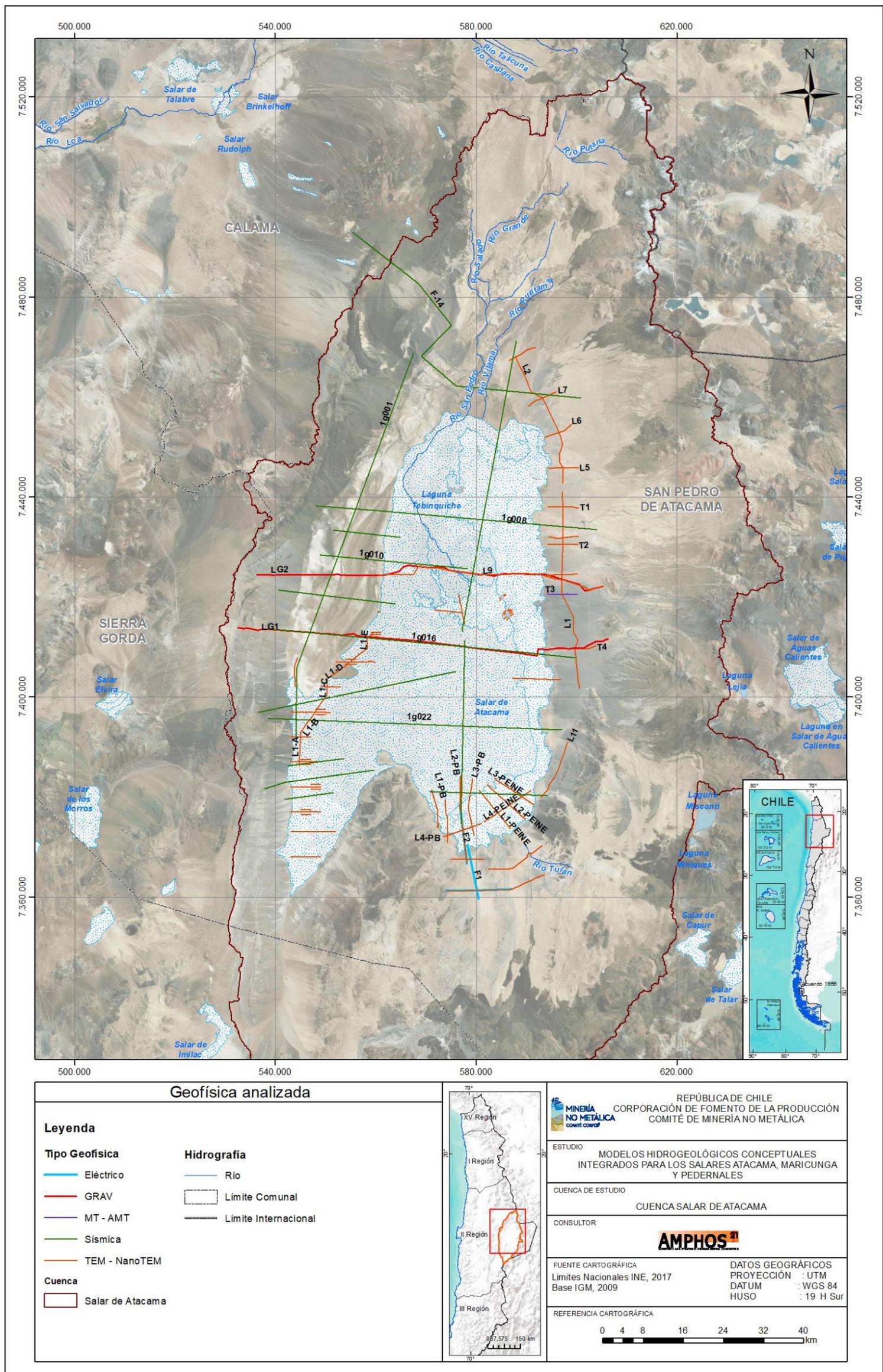


Figura 5-10: Información geofísica recopilada y analizada para la cuenca del Salar de Atacama.

Fuente: elaboración propia.

Secuencias sísmicas.

Muñoz et al, 2002 (A_REF.010), sobre la base de correlación de reflectores sísmicos interpretados desde los perfiles de ENAP, más la información de un perfilaje sísmico del pozo Toconao-1, identificó 6 secciones sísmo-estratigráficas (de la A a la F) que constituyen el relleno de la cuenca de Atacama, sobre el basamento de edad pérmica. La unidad más superficial (Secuencia F) consiste en una secuencia de estructura predominante horizontal dominada por depósitos salinos de halita, con una intercalación de arcillolitas, que se identificó entre los 480 a 624 m. Adicionalmente, fueron identificados estratos intercalados de ignimbritas, hacia el margen este del salar, aproximadamente a 360 m de profundidad. El límite inferior de esta secuencia queda claramente identificado por un límite reflector que reflejaría el cambio del ambiente deposicional desde un ambiente de predominio hiper-salino (de menores velocidades de onda) a uno de predominio detrítico (con mayores velocidades, secuencia E). Este límite se identificó a aproximadamente 970 m de profundidad en el centro del salar y conceptualmente constituye el límite entre los depósitos evaporíticos de edad holocena y la Fm. San Pedro y Tampores, éstas dos últimas se han definido en el presente estudio como el basamento de edad miocena, debido a que se ha interpretado como una unidad sin recursos de agua subterránea. Dicho basamento se ha definido en el modelo 3D como el Volumen 6.

Bajo la unidad anterior, las secuencia E y D, está compuesta por estratos de estructura horizontal continuos y ensanchamiento hacia el este de la cuenca (secuencia E) y estratos similares, pero con una disposición tipo 'onlap' hacia el oeste y noroeste, y tipo 'downlap' hacia el este de la cuenca (secuencia C), ambas separadas por un límite diagnóstico que ha sido correlacionado con un estrato tobáceo o ignimbrítico. En el centro del salar este límite se encuentra próximo a los 1.500 m de profundidad, mientras que la base inferior de la secuencia D, se diagnosticó próximo a los 1.900 m de profundidad. Según correlación estratigráfica con el pozo Toconao 1, estas secuencias estarían constituidas por arcillolitas pardo-rojizas con menor proporción de estratos de areniscas y anhidritas (secuencia E) y por areniscas pardo-rojizas, intercalaciones de arcillolitas y conglomerados volcánicos (secuencia D), las que se correlacionan indistintamente con las formaciones Tambores y San Pedro.

Las secuencias más profundas (Secuencias C, B, A) conforman capas con distintas disposiciones estructurales, entre las que destacan una de disposición general monoclinial hacia el oeste de las secuencias más profundas (A y B), una superficie de erosión que trunca las secuencias anteriores, previo a la acumulación de la secuencia C, y deformaciones locales producto de la deformación tectónica (fallas y pliegues) y sintectónica. La litología de estas secuencias para el centro del salar, descritas de techo a base, corresponde a conglomerados volcánicos color rojizo, a areniscas multicolores intercalados con arcillolitas y conglomerados (secuencia C), areniscas volcanoclasticas color pardo rojizo, con intercalación dispersa de capas de conglomerados (secuencia B) y limolitas y arcillolitas con intercalaciones menores de areniscas y areniscas con intercalaciones finas de

limolitas (secuencia A). Todas estas unidades fueron correlacionadas con distintas formaciones del Grupo Purilactis, que datan desde el Cretácico superior al Paleógeno.

La secuencia estratificada de la cuenca de Atacama, que regionalmente se define por un conjunto de rocas de edad Permo-Carboífero/Triásico(?) y que se agrupan en distintas formaciones dentro del Grupo Peine (Arriagada *et al.*, 2006) fue identificado en el centro del salar (pozo Toconao-1) aproximadamente a los 3.900 m de profundidad. Sin embargo, su límite superior, en los perfiles sísmicos posee una superficie poco definida, por lo que su definición a lo largo de la cuenca es de difícil precisión.

Fuera del perfil 1g010 (Figura 5-10) que pasa por el pozo Toconao 1, existen muy pocas interpretaciones específicas para este límite, destacando aquellas efectuadas por Rubilar (2015; Figura 5-11), quien extiende esta unidad a lo largo de los perfiles 1g016 y 1g022, donde el espesor aumenta levemente hacia el sur en la mitad sur del salar, y al este del SFS, alcanzando hasta los 1.300 m de espesor aproximados.

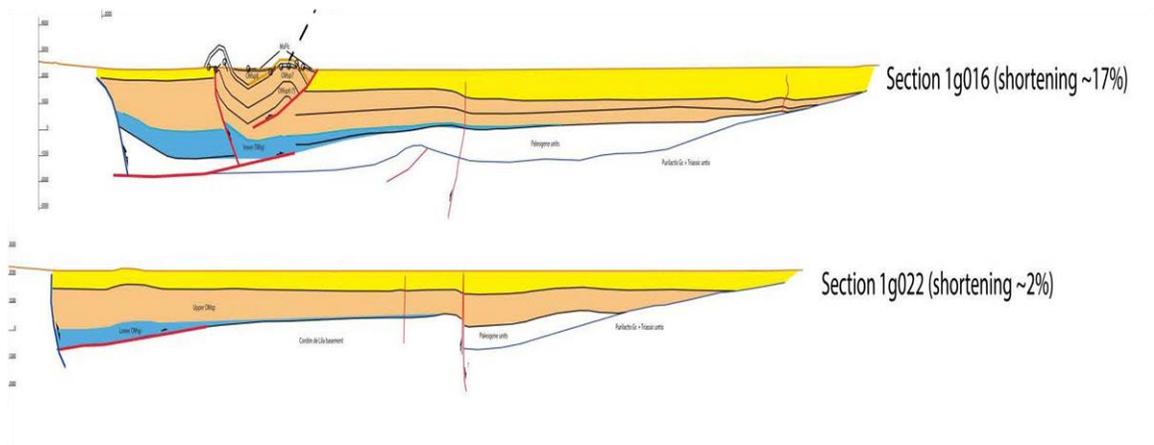


Figura 5-11: Perfiles geológicos realizados a partir de la interpretación de los perfiles sísmicos. Ubicación de los perfiles en Figura 5-10.

Fuente: Rubilar (2015).

En los perfiles interpretados por Arriagada, 2006 (Figura 5-12), sin embargo, se observa que la profundidad diagnosticada por Rubilar (2015) coincide de manera aproximada con la profundidad delimitada para todo el registro del Neógeno al Cuaternario (límite Neógeno-Fm. Loma Amarilla), que abarca tanto los depósitos predominantemente evaporíticos (secuencia 'F', de Muñoz *et al.*, 2002) y los depósitos predominantemente detríticos del Mioceno y Plioceno (secuencias 'E' y 'D', de Muñoz *et al.*, 2002). Estas diferencias serán revisadas más adelante, para la definición de la geometría de acuíferos finalmente definida.

Síntesis de interpretaciones

Los perfiles sísmicos analizados por distintos autores, se han focalizado en la definición estratigráfica y estructural de la cuenca del salar y alcanzan su mejor resolución para definir estructuras de gran contraste de densidad y velocidad sísmica, como son las discordancias con importantes cambios de facies, fallas y otros tipos de deformaciones. En la Figura 5-12 se muestra la delimitación de basamento y otros límites importantes dentro de la secuencia estratificada de la cuenca del salar (Arriagada *et al.*, 2006; A_REF.100). Se identifican los rellenos sedimentarios del Neogeno, el techo de las rocas sedimentarias del Grupo Purilactis, y límite interpretado para el basamento Paleozoico-Triásico (Grupo Peine). De las tres secciones de la Figura 5-12, la sección B-B'' es la más próxima al pozo de control Toconao-1, donde se tiene información estratigráfica, por lo que es aquel en el que se tienen mejor precisión en la interpretación.

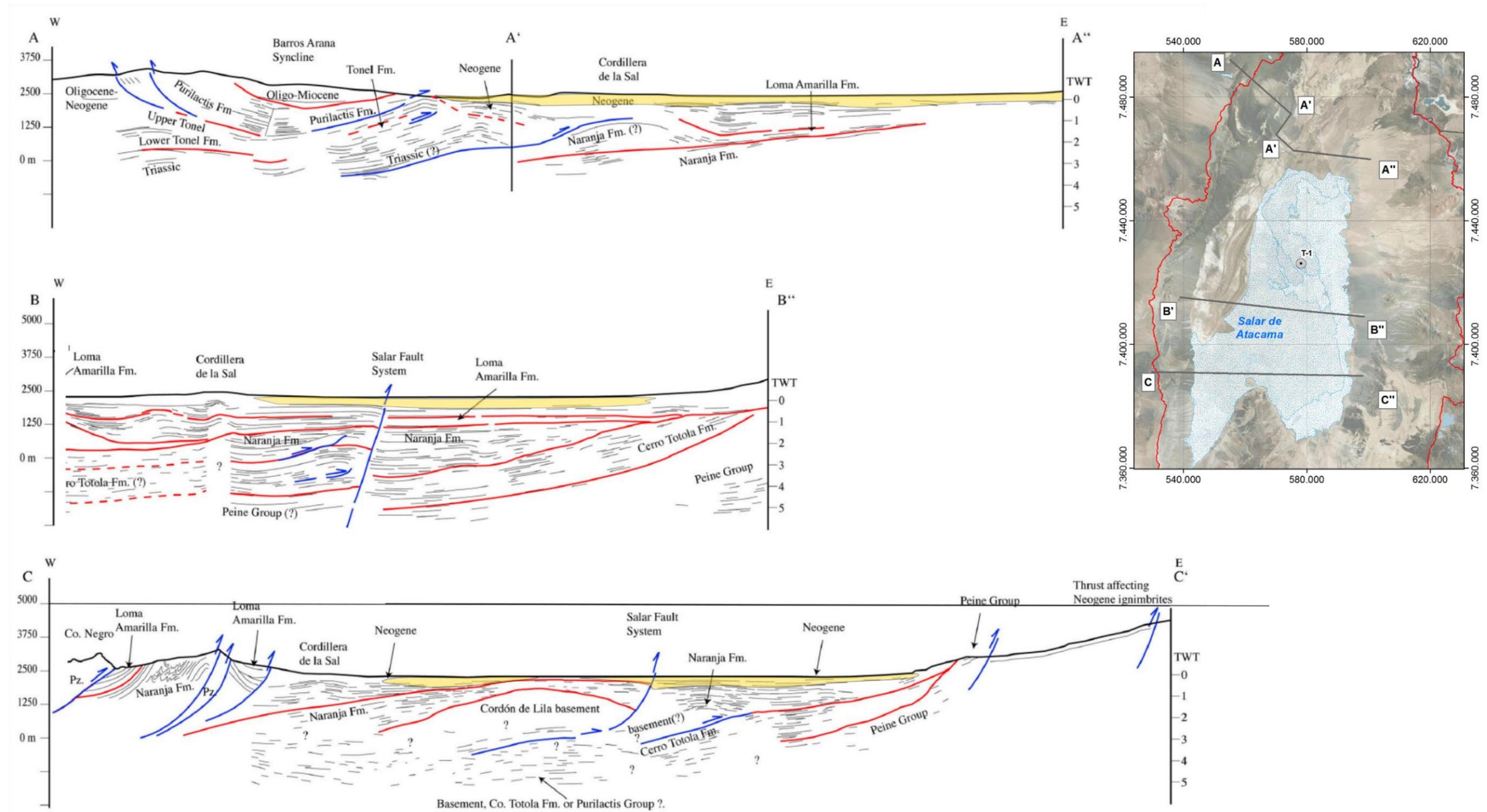


Figura 5-12: Interpretación de perfiles sísmicos de la cenca de Salar de Maricunga. En amarillo se indica el espesor de sedimentos y rocas semiconsolidadas con potencial acuífero. La sección AA" está construida sobre el perfil sísmico F14; sección B'B" se construyó sobre el perfil 1g016 y el perfil CC" equivale al perfil 1g022 (Figura 5-10).

Fuente: modificado de Arriagada et al., 2006.

En este trabajo se ha definido que las formaciones que conforman acuíferos conocidos o que potencialmente podrían conformar acuíferos de importancia (UH-1 a UH-4) se enmarcan dentro de los depósitos y rocas semiconsolidadas del Plioceno al Holoceno, cuyo límite se identifica con la base de la secuencia 'F' identificada por Muñoz *et al.*, (2002).

Según se desprende de los resultados analizados por diversos autores se observa que el análisis efectuado de los perfiles sísmicos ha cumplido con un enfoque de exploración y mapeo de las grandes estructuras que configuran la cuenca de Salar de Atacama, sin otorgar resultados o interpretaciones específicas para las unidades más superficiales del salar.

Como conclusión del análisis anterior se concluye que la información sísmica recopilada sirve para determinar el potencial máximo de extensión de las formaciones detríticas/salinas del relleno del salar que pueden conformar acuíferos, sin embargo, resultan en un bajo nivel de detalle y utilidad para estimar límites y volúmenes de acuíferos conocidos.

5.3.1.2 Perfiles gravimétricos

Entre los estudios gravimétrico se revisaron los perfiles desarrollados dentro del estudio DGA (2015, A_REF.063-2) en los que se levantaron datos de 145 estaciones para la elaboración de dos perfiles (LG.1 y LG.1; Figura 5-10) que atraviesan al Salar de atacama en una orientación este-oeste, y que alcanzan una longitud aproximada de 70 km cada uno.

El método tiene el uso potencial de diferenciar, por medio del contraste de densidades de los materiales geológicos, las rocas (compactas y de alta densidad) de los materiales sedimentarios de baja consolidación que conforman el relleno de la cuenca.

La información se presenta en la forma de curva de datos de anomalía de Bouguer, para la cual se aplicaron correcciones de Aire Libre, Topográfica y de Bouguer y de un modelamiento de 2D con unidades de densidad homogénea.

Los perfiles elaborados identifican una capa superficial que alcanza un espesor entre 2.300 a 3.700 m aproximados, que limitaría con unidades de densidad con contraste de 0,2 gr/cc, en el sector del salar y de 0,33 gr/cc en el sector de la Cordillera de la Sal. La capa superficial señalada, corresponderían aproximadamente al conjunto de todos los depósitos sedimentarios y volcanoclásticos de edad Pleistoceno al Holoceno que rellenan la cuenca, por sobre las rocas sedimentarias y volcánicas anteriores al Pleistoceno.

5.3.1.3 Perfiles electromagnéticos (TEM, NanoTEM) y eléctricos.

Se han elaborado numerosos levantamientos de información mediante la técnica de prospección geofísica transiente electromagnética TEM y NanoTEM. Dichas prospecciones se distribuyen principalmente a lo largo de los márgenes del salar y en el sector de Monturaqui. Las referencias recopiladas que fueron integradas a análisis del presente estudio se muestran en la Tabla 5-13.

La empresa Geodatos, que ha estado a cargo de la mayoría de los levantamientos geofísicos TEM y Nano TEM del Salar de Atacama que fueron recopilados para este estudio, propone mediante la interpretación geológica de los resultados geofísicos, que el rango de resistividad eléctrica característico para la identificación de salmueras en el medio subterráneo es el que queda constituido en resistividades inferiores a 2 ohm-m. En el presente trabajo se han considerado ligeras desviaciones a este rango, dependiendo de la información complementaria analizada, geológica e hidroquímica en pozos (Anexo I y II). En la Tabla 5-14 se muestran los rangos de resistividad utilizados para la interpretación de los perfiles electromagnéticos y eléctricos analizados.

Resistividad Ohm-m	Material / acuífero
0-2	Salmuera en acuífero de alta permeabilidad.
2-10	Sedimentos arcillosos saturados, sedimentos salinos de permeabilidad moderada a baja, aguas salobres en acuífero discontinuo.
10-40	Sedimentos detríticos arcillosos, sedimentos salinos de baja permeabilidad, Arenas arcillosas saturadas, sedimentos detríticos saturados de agua salobre.
40- 90	Arenas y gravas saturadas.
90-400	Rocas fracturadas de permeabilidad baja a moderada.
>400	Rocas de baja permeabilidad.

Tabla 5-14: Rango de resistividades utilizadas para la interpretación de materiales y acuíferos en el Salar de Atacama.

Fuente: elaboración propia.

Margen Este del salar

En la Figura 5-13 se han trazado en los perfiles TEM el contacto entre unidades geoléctricas. A lo largo de todo el margen oriental del Salar de Atacama la Dirección General de Aguas (DGA, 2015; REF.063) efectuó 13 perfiles TEM. Tres de estos perfiles tienen una orientación aproximada NS a NNW-SSE (L1, L2 y L11), mientras que el resto de las secciones, cruzan a los anteriores, con una orientación WE. En el extremo norte, el perfil L2 (Figura 5-13), muestra horizontes discretos con resistividades de 3,5 a 10 ohm-m, cuyo espesor por lo general alcanza entre 10 y 30 m de espesor. La resistividad de estos materiales puede corresponder a aguas subterráneas de contenido moderado a alto en sales disueltas. Sin embargo, se puede establecer por correlación con pozos con información química próximos al perfil, que la conductividad eléctrica descrita para el acuífero del sector, varía entre 3.700 a 4.500 $\mu\text{S/cm}$ (pozos San Pedro 3 y San Pedro 5), rangos que representan salinidades bajas del acuífero y, que por la tanto, la resistividad del perfil debe ser interpretada probablemente por una distribución de facies con contenido moderado a alto de arcillas. Las resistividades en el rango de 10 a 50 ohm-m (tonalidades amarillo y anaranjado), son

probablemente los horizontes más propicios para conformar acuíferos de detríticos saturados. La estratigrafía de los pozos Tambillo 2 y Zarzo1 se correlaciona positivamente con estos horizontes (Figura 5-13). Por otra parte, valores mayores a 50 ohm-m (tonalidades verdes a azules) representan probablemente sedimentos o depósitos volcánicos secos o bajo contenido de humedad. Según esta interpretación, no habría presencia de cuña salina bajo la traza de este perfil.

El perfil L1 (Figura 5-13), por su parte, muestra una estratificación de al menos 3 capas. En superficie se observa una capa superficial de alta resistividad (300 a 1.600 ohm-m), que se interpreta como sedimentos de gravas/arenas no saturadas; seguidas por un horizonte de resistividades variables entre 6 a 60 ohm-m, que se interpreta como sedimentos saturados, de distintas granulometrías y salinidades; finalmente, un horizontes inferior, que se encontraría bajo los 180 m de profundidad, de resistividades entre 1,5 a 5 ohm-m, el cual se interpreta como sedimentos con alto contenido en arcillas, probablemente saturados. Este horizonte es de 30 a 70 m de espesor en la mitad norte del perfil, y se ensancha hasta superar los 300 m de profundidad en la mitad sur. La presencia de salmuera en este horizonte podría estar representada por un rango de resistividad ligeramente superior a los diagnosticados en otros perfiles geofísicos. Se estima que esta respuesta sea debido a que el perfil se sitúe a lo largo de la zona límite de la cuña salina, hacia el este.

La estratigrafía de los pozos Corfo 149 y Camar 2a, en el mismo perfil, no muestran predominio de facies arcillosas en el tramo de baja resistividad señalado, lo que es un argumento a favor de que la causa de la baja resistividad mostrada en el perfil TEM sea la presencia de aguas subterránea enriquecida en sales.

Los perfiles de orientación oeste-este que atraviesan las líneas L2 (L5, L6, L7 y L8) muestran un patrón similar al observado en el perfil L2, donde los horizontes de menor resistividad se correlacionan con estratos arcillosos observados en pozos cercanos (Figura 5-14). Por otro lado, los perfiles que atraviesan al perfil L1 (L3, L4, L5, T1, T2, T3 y T4), son más claros en mostrar una interfaz entre un horizonte de resistividades contrastantes, que graficarían la extensión de la cuña salina.

Otras de las campañas ejecutadas en el sector oriental del salar, por la empresa SLM NX Uno de Peine (2004; A_REF.029-2) específicamente en la mitad sur, diagnosticó la existencia de un acuífero con contenido de salmuera (resistividad entre 1 a 0 ohm-m) cuyo límite superficial se visualiza localmente al este la zona marginal de lagunas. El mismo estudio concluye que en esta parte del salar la potencia media que ocupa la salmuera subterránea sería de 160 m. Ni los perfiles individuales, ni datos particulares de las estaciones TEM estuvo disponible para el análisis, sólo algunos resultados de interpolación en planta.

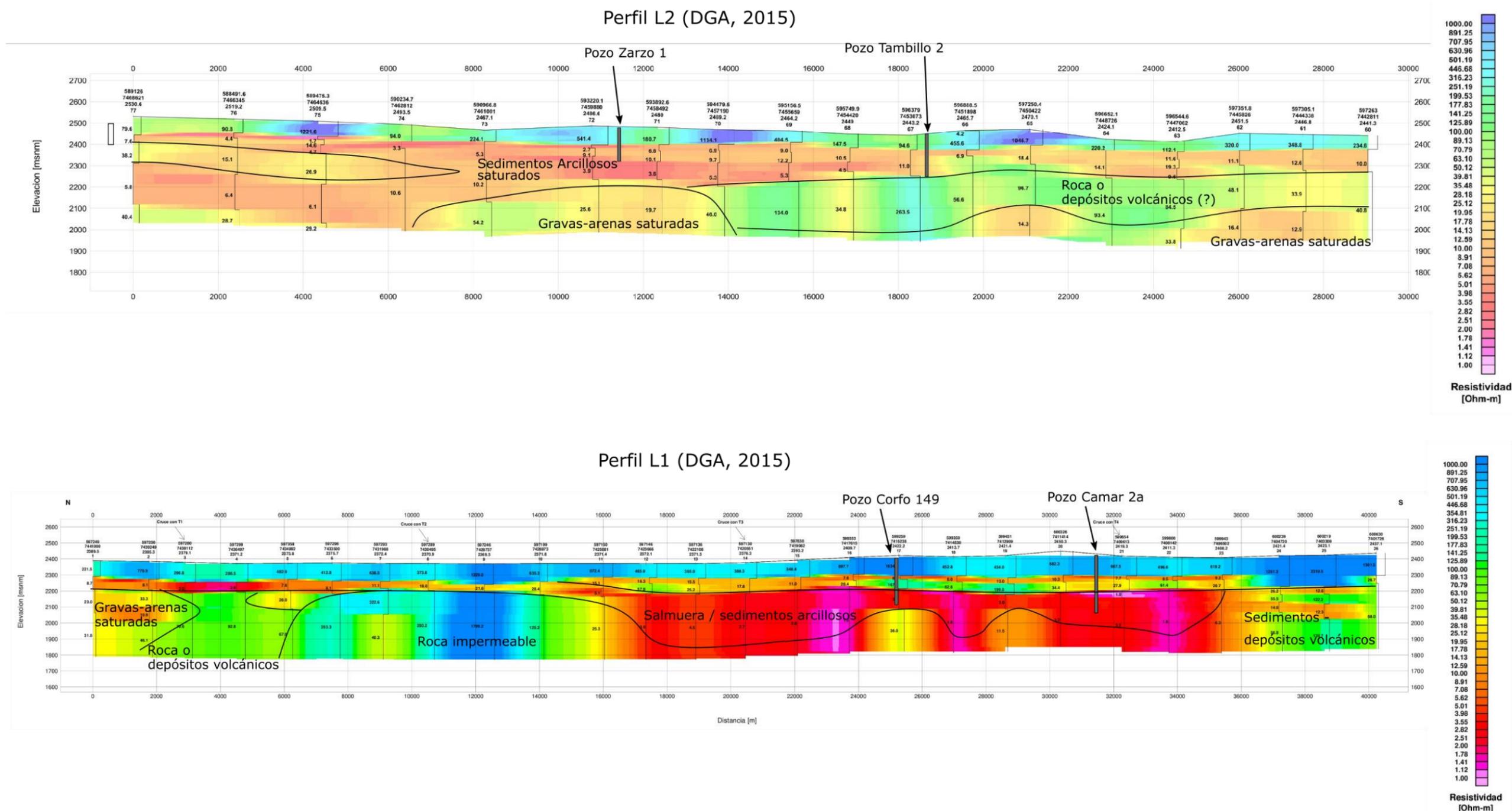


Figura 5-13: Perfiles TEM L1 y L2 del margen oriental del salar. Perfiles provenientes de DGA (2015) (REF.063-3).

Fuente: modificado de los perfiles TEM (DGA, 2015).

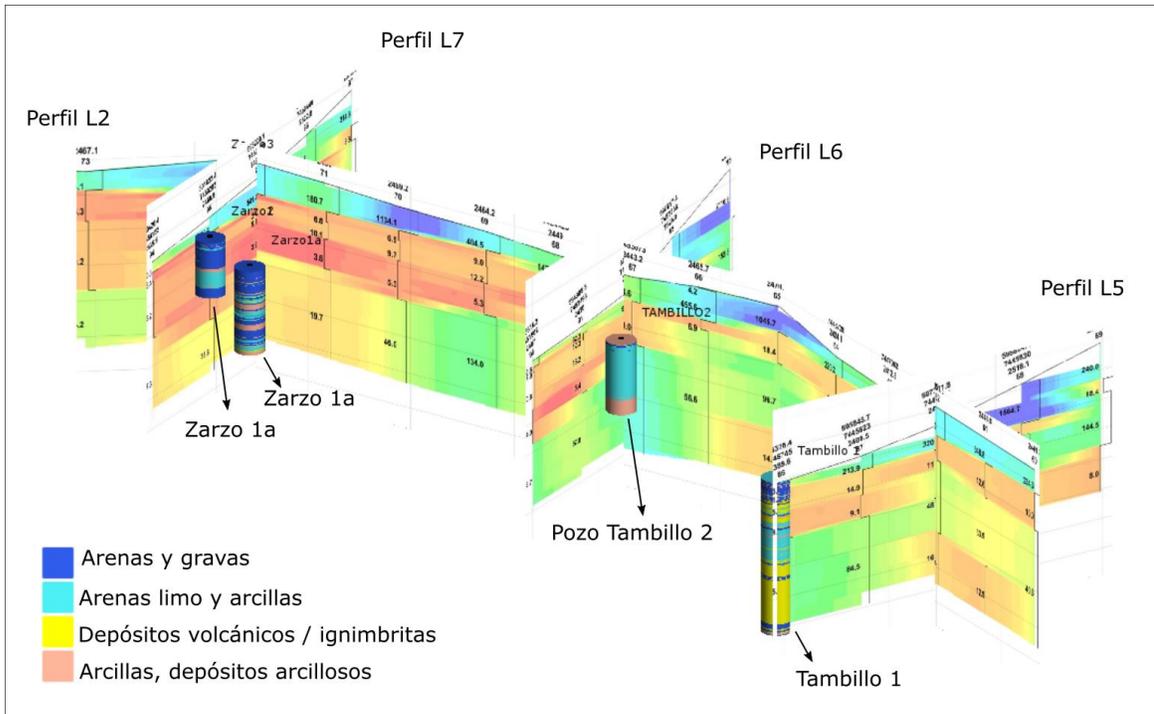


Figura 5-14: Perfiles geofísicos del margen nor-oriental del Salar de Atacama (DGA, 2015) con estratigrafía de pozos cercanos. Se observa correlación entre respuesta de baja resistividad y facies ricas en arcillas y resistividades intermedias con depósitos volcánicos e ignimbritas.

Fuente: elaboración propia, extraída del Leapfrog realizado para el presente estudio.

Margen Oeste del salar

La empresa SLM NX Uno de Peine realizó tres campañas realizadas en los años 2004, 2006 y 2007, con el objetivo de identificar la presencia de salmuera, los que se conjugaron en 29 perfiles de orientación preferente este-oeste y 1 de los cuales posee orientación preferentemente NNE-SSW (L1; tramos A, B, C, D, E). La ubicación de los perfiles efectuados por SLM NX Uno de Peine se muestra en la Figura 5-15.

El perfil de orientación L1, muestra una diferenciación en la respuesta geoeléctrica en profundidad y de norte a sur. En la mitad norte, se observa un horizonte superficial de muy baja resistividad (0,4 a 1,2 ohm-m, tonalidades rojo-anaranjado), que se ha correlacionado con los estratos de alto contenido salino y alta permeabilidad, observados en pozos, como el S-1-14, donde se describen sedimentos con más de 60% de sales. Bajo este horizonte, la capa de tonalidades azul a verde (resistividades de 10 a 45 ohm-m) y espesor de 150 a 200 m, puede representar a aquellos estratos menos enriquecidos en sales y menor permeabilidad. Este horizonte se identifica de norte a sur. Una

correlación de este tipo se observó en el pozo S-1-47, donde se describe una columna de sedimentos salinos, aunque con una concentración de sales inferior al 60%. Bajo el horizonte anterior, se grafican nuevamente bajas resistividades, en el rango en que podrían representar acuíferos salinos, arcillosos y/o presencia local de salmueras.

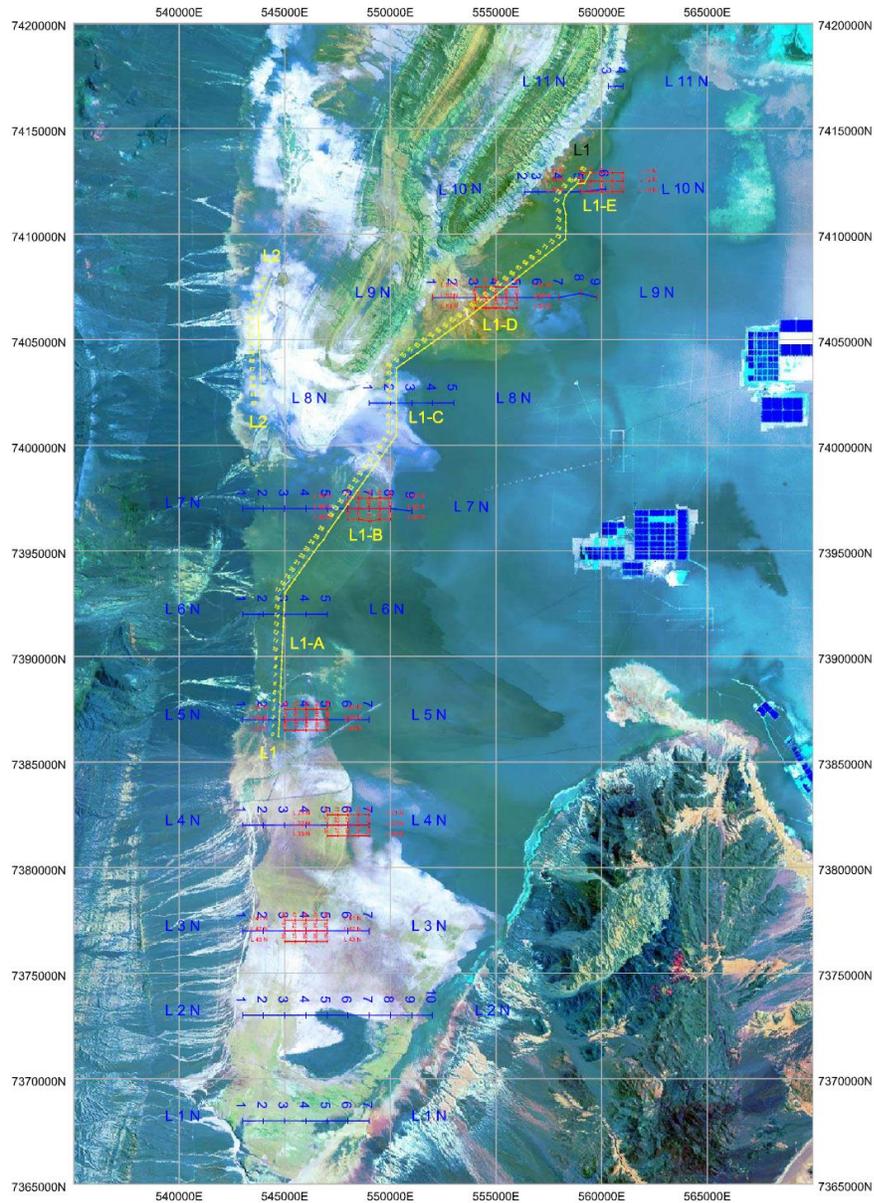


Figura 5-15: Ubicación de perfiles TEM efectuados por la empresa SLM NX Uno de Peine en el borde oeste del Salar de Atacama. Campañas de 2004 (amarillo), 2006 (azul) y 2007 (rojo).

Fuente: SLM NX Uno de Peine – Geodatos, 2008.

Las líneas de orientación este-oeste muestran condiciones similares a las representadas en el perfil L1 (A-B-C-D), a la posición de intersección. Debido a su escasa longitud, no se observan grandes variaciones laterales.

Según lo observado en los perfiles geofísicos, la distribución de salmuera en el agua subterránea del margen oeste del salar podría tener una geometría compleja, la cual probablemente estaría determinada por la distribución de permeabilidades de los sedimentos detrítico/salinos. Una mejor definición de esta delimitación podría ser graficada mediante perfiles de conductividad eléctrica de pozos del sector (varios de los cuales tienen profundidades entre 100 y 300 m) y/o la ejecución de pozos en ubicación y profundidad específica para estos fines.

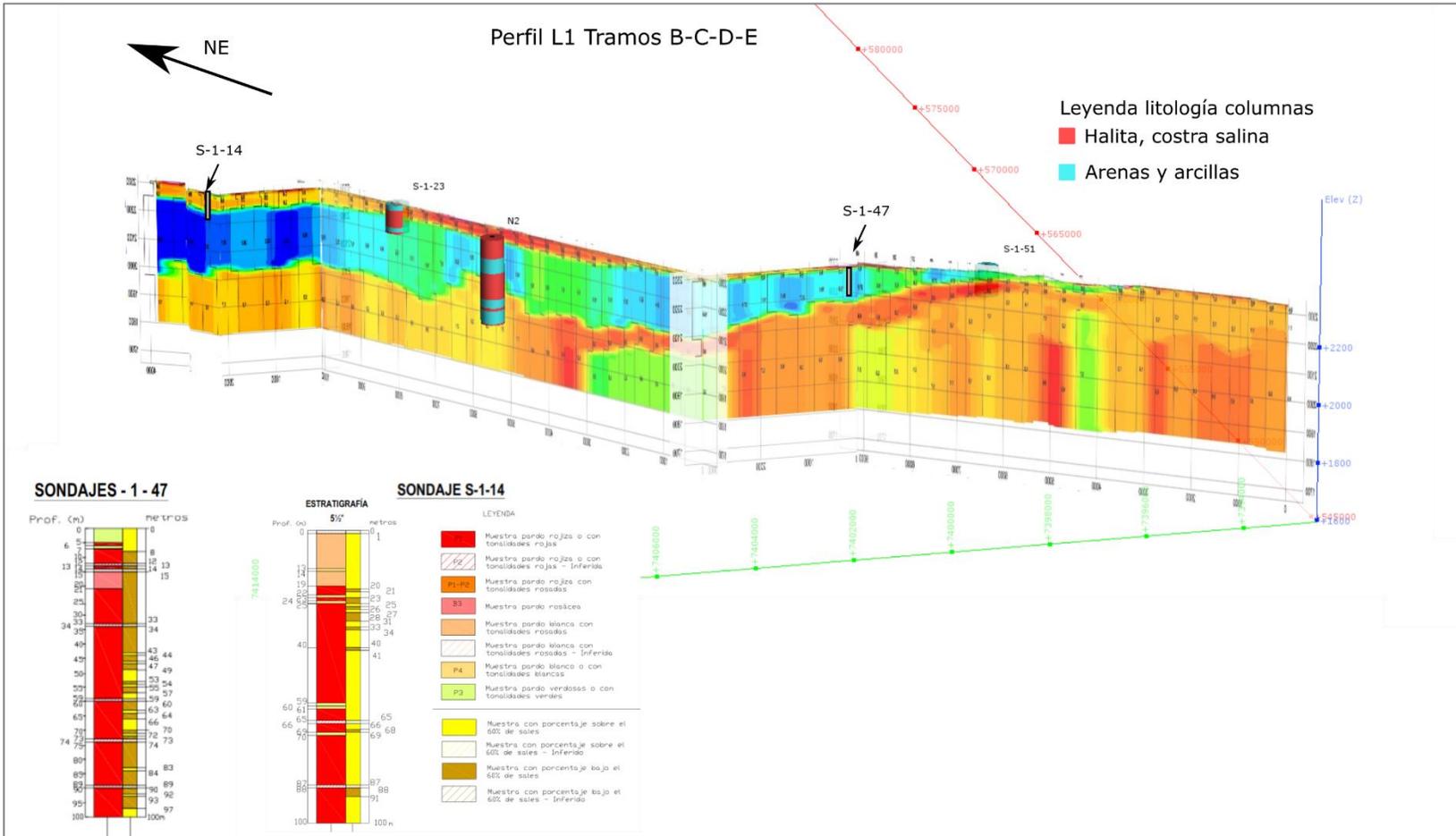


Figura 5-16: Perfil TEM L1 del margen oeste del Salar de Atacama (REF.029-2). Descripción en texto.

Fuente: elaboración propia con información de Geodatos (2008) y CPH (2008).

Margen sur del salar

En el sector sur del salar se han analizados los perfiles TEM presentados por Rokwood Lithium, dentro de su proyecto EIA de pozas de evaporación (Geodatos, 2013; A_REF.093-5) y los perfiles de resistividad eléctrica de Minera Escondida (Golder, 2017; A_REF.092) presentados dentro del proyecto EIA del Proyecto Monturaqui. Los perfiles de mejor resolución espacial son aquellas de Rockwood Lithium y son también los de mejor cobertura espacial en esta parte del salar.

Los resultados obtenidos en los distintos perfiles de orientación norte-sur (L1-PB, L2-PB, L3-PB, F2 y F1 de Minera Escondida), junto con los perfiles de orientación NW-SE (L1_Peine, L2_Peine y L3_Peine) grafican de manera consistente y con un muy buen detalle una interfase entre una unidad superficial con forma de cuña, de resistividades en el rango de 2 a 30 ohm-m y un nivel inferior, con otra inferior, de resistividades en el rango de 0,2 a 0,9 ohm-m (Figura 5-17), la cual se interpreta como la separación entre las dos fases de aguas con distinta salinidad: Más salina y densa en profundidad, menos salina en superficie.

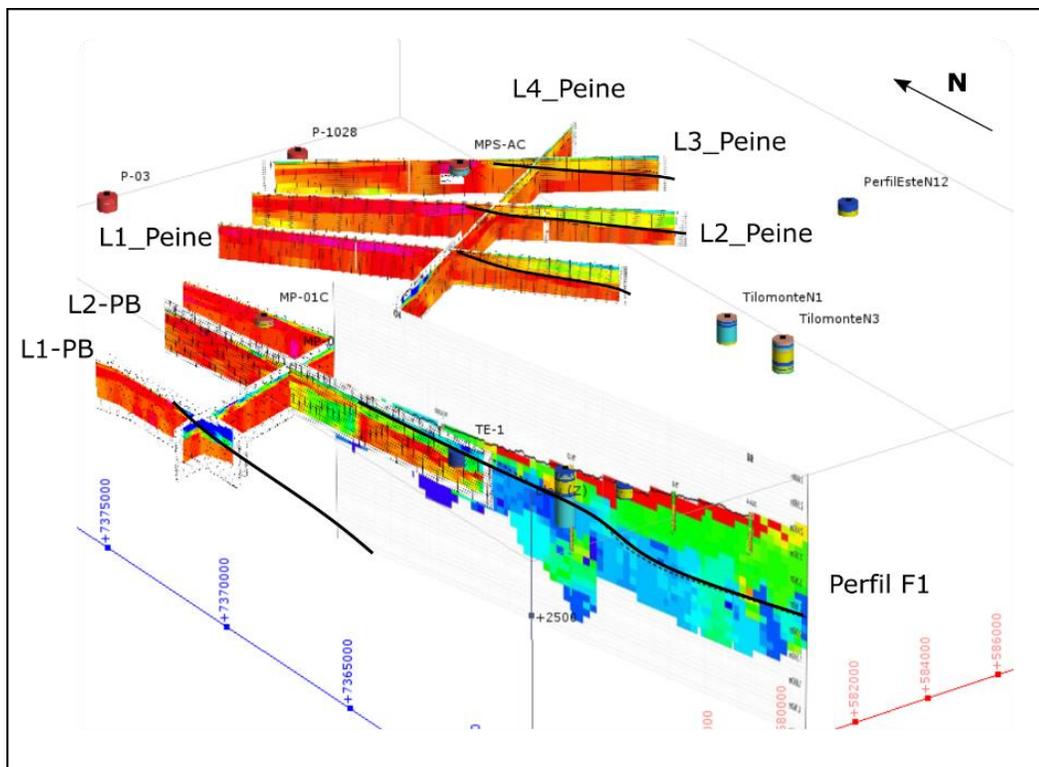


Figura 5-17: Identificación de cuña de la interfase de aguas dulce-salobres y salmueras en el sector sureste del Salar de Atacama mediante perfiles TEM. Ubicación de los perfiles en Figura 5-10.

Fuente: elaboración propia. Imagen extraída del modelo 3D Leapfrog realizado para el presente estudio.

Centro-norte del Salar de Atacama

El perfil electromagnético TEM más al norte situado dentro del salar, es el perfil L9, cuyo trazado se encuentre levemente al norte de la zona identificada como núcleo del salar, y dentro de la zona marginal del salar (DGA, 2015).

El perfil L9 (Figura 5-18 y Figura 5-19) cruza al salar en una orientación este-oeste, partiendo en su extremo oeste, sobre rocas sedimentarias en la Cordillera de la Sal, hasta los depósitos aluviales del margen este del salar. Cabe destacar que en la Figura 5-19 se ha trazado sobre los perfiles originales el contacto entre las unidades geoelectricas.

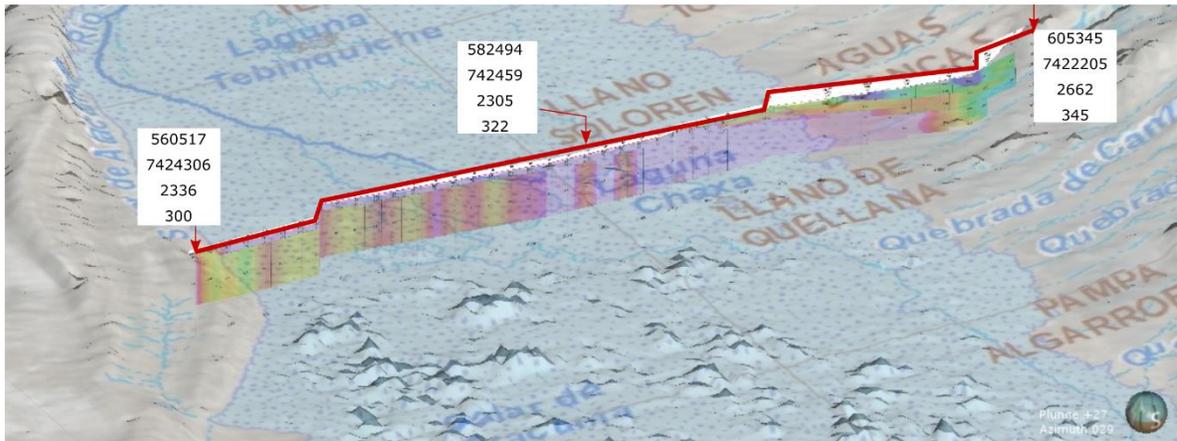


Figura 5-18: Ubicación del trazado del perfil TEM L9, en la parte central del salar. Se indican coordenadas y cota de las estaciones No. 300, 322 y 345. Detalle del perfil en Figura 5-19.

Fuente: elaboración propia. Imagen extraída del modelo 3D Leapfrog realizado para el presente estudio.

En el perfil se observa una diferenciación en la distribución de resistividades en la mitad este y oeste del salar. En la mitad oeste del salar se identifica una capa de muy baja resistividad (<2,5 ohm-m) que se extiende desde la superficie hasta aproximadamente los 60 a 90 m de profundidad. Bajo este horizonte se extiende un nivel discontinuo, de resistividades variables entre 2,5 a 50 ohm-m que se extiende hasta el resto de la profundidad observada por el perfil (450 m). Mientras que la capa superficial se interpreta como la presencia de salmuera en el acuífero superficial del salar, el horizonte inferior, se interpreta como un horizonte de menor permeabilidad, con presencia de variaciones de facies laterales y distribución discontinua de salinidad.

Por otro lado, la mitad este del salar, muestra una estructura similar a la observada en el resto de este margen con la identificación de unidades de resistividad contrastada, en forma de cuña, con las que se interpreta la presencia de interfaz entre aguas frescas de recarga lateral, y salobres en profundidad.

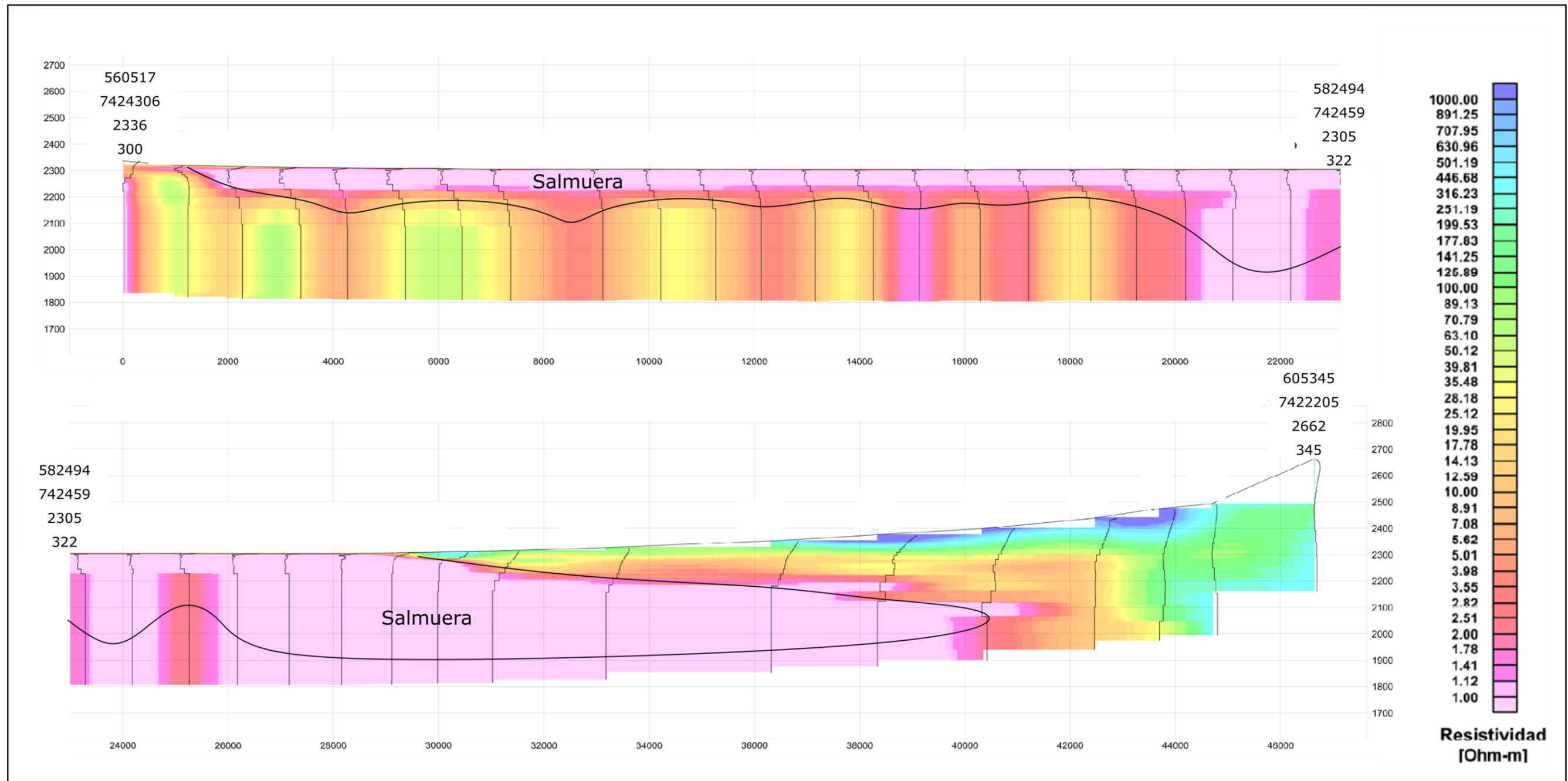


Figura 5-19: Perfil TEM L9 del sector central del salar. Ubicación del perfil en Figura 5-10 y Figura 5-18.

Fuente: modificado de Geodatos (DGA, 2015).

5.3.2 Identificación de la extensión de la interfase salina

En las zonas periféricas del salar, las aguas que ingresan como recarga lateral poseen menor salinidad y densidad que las que se encuentran ya alojadas en el acuífero del salar, por lo que se genera una diferenciación conocida como interfase salina, donde el volumen más denso y salino se proyecta bajo las aguas dulces-salobres en forma de cuña salina. Este proceso se explica también en el apartado 5.5 y se relaciona con el funcionamiento de los sistemas lagunares.

En los márgenes este y sur del salar se identifica claramente la interfase salina en superficie por la calidad de las aguas de los sistemas lagunares Quelena, Soncor, La Punta-La Brava y Peine. Este límite ha sido trazado trabajos anteriores (Fock, 2009) y en los estudios de SGA (2015) y es el que se acepta para el trazado superficial de la interfase salina en estos sectores. En profundidad, el trazado de la interfase salina fue definido mediante el análisis de los perfiles TEM del lado este y sur del salar, perfiles descritos en el capítulo 5.3.1 del presente informe. En el modelo 3D se ha utilizado toda esta información para trazar el contacto en los sistemas acuíferos definidos en el capítulo 5.3.2.

En el sector sur, además de identificar la interfase salina mediante los perfiles TEM, ha sido correlacionada con perfiles verticales de conductividad eléctrica en pozos ubicados en las inmediaciones (TP-1, TP-2 y TP-3) y calidad química de las aguas en pozos multipiezómetros (SGA, 2015) y otros (Figura 5-20; Golder, 2017; A_REF.092). La cuña salina se adentra en profundidad hacia el acuífero aluvial unos 10-12 Km desde el afloramiento en superficie de la interfaz salina definida por Fock (2009), Salas (2010) y RWL (SGA, 2015), tanto en el borde este como en el sur.

Cabe destacar que en los perfiles geofísicos MT (magnetotélúricos) no ha sido posible identificar la cuña salina, ya que se observa de forma difusa.

En la Tabla 5-15 se muestran algunos datos de la profundidad de la cuña salina entre 1995 y 2015 y 2015 (Golder, 2017) en los pozos "TP".

Pozo	Cota Terreno (m s.n.m.)	Profundidad Nivel Estático (m)		Profundidad Interfase Salina (m)	
		Diciembre 2015	Promedio 1995-2015	Diciembre 2015	Promedio 1995-2015
TP-3	2.326,0	16,5	16,3	77,7	77,8
TP-1	2.319,6	10,1	10,0	72,9	72,9
TP-2	2.311,1	4,0	3,8	53,6	53,5

Tabla 5-15: Datos de profundidad de la interfase Salina diagnosticada en pozos del sector Callejón, en el extremo sur de la cuenca del Salar de Atacama.

Fuente: Golder, 2017.

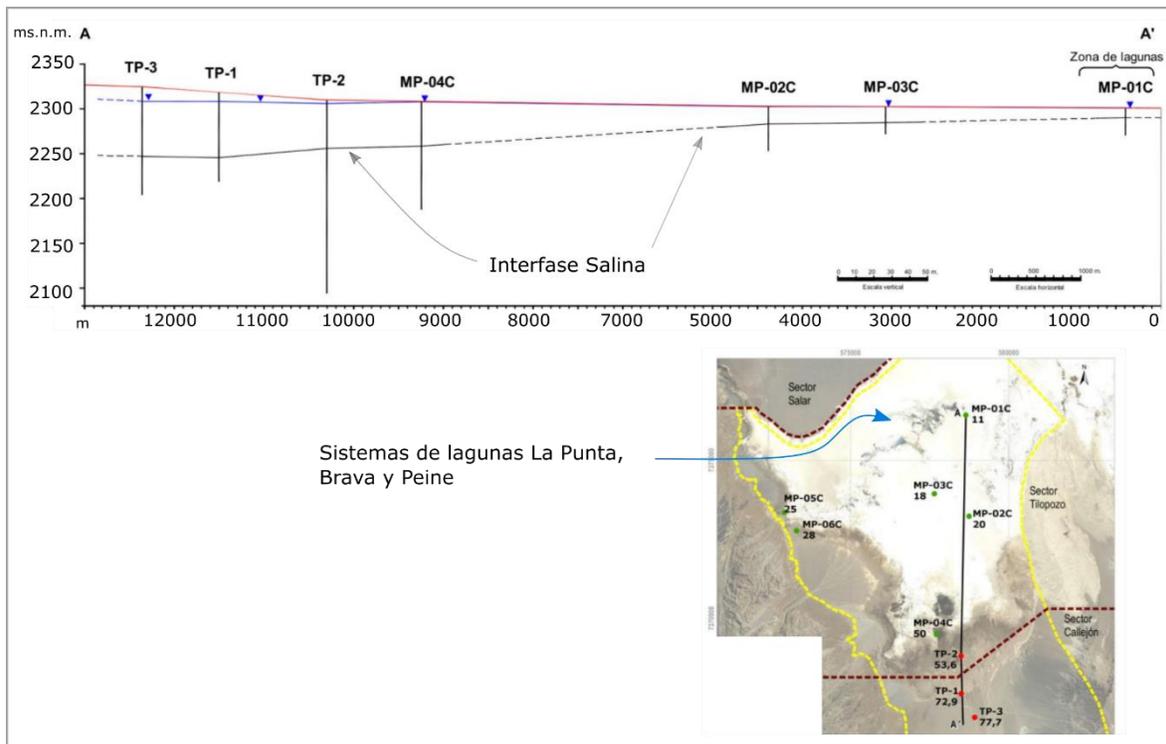


Figura 5-20: Identificación de la interfase salina en el sector sur del salar por medio de la correlación con perfiles de conductividad eléctrica en pozos.

Fuente: modificado de Golder, 2017 (A_REF.092).

El lado oeste del salar no se genera el efecto de diferenciación entre dos masas de agua subterránea de distinta densidad, por lo que no se ha identificado el fenómeno de cuña salina. Lo anterior puede ser debido a que la recarga lateral al salar en este sector es despreciable. En los perfiles geofísicos TEM de este sector se observa una distribución compleja de las resistividades que identifican la presencia de salmuera (< 2 ohm-m) y aquellas que identifican a los materiales menos permeables y/o arcillosos (resistividades de 2 a 10 ohm-m). Sería necesario contrastar dichos valores con perfiles verticales de conductividad eléctrica en pozos y sondas de gamma natural, para discretizar entre salmuera y materiales arcillosos en las resistividades obtenidas, respectivamente.

Finalmente, en el sector norte no se dispone de perfiles TEM como para identificar una cuña salina. No obstante, se estima que debería existir ya que el río San Pedro se infiltra en el salar y es una de las fuentes de recarga del salar.

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 y el límite de la interfase salina en superficie se ha construido el modelo 3D en el software Leapfrog Hydro (v 2.7.2).

El modelo hidrogeológico planteado hasta el momento, cuyo detalle y conceptos básicos se muestran en la Tabla 5-12 y Figura 5-9, se ha simplificado e integrado en sistemas acuíferos, debido a que existen acuíferos con propiedades similares y que además, se encuentran conectados. De esta manera, se han definido 6 volúmenes, 5 correspondientes a los sistemas acuíferos (volumen 1, 2, 3, 4, 5) y 1 al basamento (volumen 6). En la Figura 5-21 se observa una vista en planta de los volúmenes construidos, mientras que en las Figura 5-22 y Figura 5-23 se observa una vista de los acuíferos del Salar de Atacama en dirección NE y NW respectivamente. Finalmente, en la Figura 5-24 una vista del basamento. Para observar, con mayor detalle, las características de los volúmenes se han realizado perfiles de corte del modelo 3D, 10 perfiles con dirección E-W, 10 perfiles con dirección N-S y un perfil en la dirección SE-NW, todos ellos se encuentran en el Anexo VI-03. La escala vertical de los perfiles que se encuentran en el anexo está exagerada x2.

A continuación, se presenta una descripción de los sistemas acuíferos-volúmenes contemplados en el modelo 3D:

- **Volumen 1. Acuífero Aluvial borde este + acuífero aluvial borde norte:** acuíferos de tipo dulce-salobre que discurre por el borde este del salar. Tiene una potencia próxima a 300 m, aumentando hasta los 500 m en el borde norte, y el espesor saturado se encuentra entre 250 y 450 m. Por otro lado, el volumen total es de 270.050 hm³ y el volumen de acuífero, teniendo en cuenta el espesor saturado, es de 209.410 hm³. Las relaciones de contacto con los otros volúmenes son de tipo erosivo (tanto con los acuíferos del salar, acuífero MNT y basamento). Cabe destacar que el acuífero aluvial borde este en la zona sureste limita lateralmente con el acuífero MNT. Está formado principalmente por sedimentos detríticos que corresponden a las UH 1 y UH 2. La zona de contacto con el salar corresponde a la interfase salina. Cabe destacar que las potencias de dicho acuífero deben ser validadas con sondajes que se profundicen hasta el basamento y con métodos geofísicos.
- **Volumen 2. Acuífero Monturaqui-Negrillar-Tilopozo (MNT) + acuífero aluvial borde sur:** acuíferos de tipo dulce-salobre que se encuentran al sur de la cuenca. El acuífero MNT está ubicado en el sur de la cuenca y en contacto con éste, hacia el norte, se encuentra el acuífero aluvial borde sur, anexo al núcleo del salar. El acuífero MNT tiene una potencia media próxima a 400 m, mientras que el acuífero aluvial borde sur tiene una potencia media de 130 m. Si atendemos al espesor saturado, en el acuífero MNT es de 250 m en la parte alta de

éste y aumenta hacia el norte hasta 500 m donde la extensión lateral del acuífero se reduce. Dicho acuífero, en las proximidades del contacto con el aluvial borde sur, tiene un espesor saturado de 250 m. Por otro lado, el acuífero aluvial borde sur tiene un espesor saturado medio próximo a 130 m.

El volumen 2 tiene 150.940 hm³, mientras que el volumen, teniendo en cuenta el espesor saturado, es de 72.279 hm³. Tanto el acuífero MNT, como el acuífero aluvial borde sur presentan un contacto erosivo con el volumen 1 y los acuíferos del Salar de Atacama, así como con el basamento.

El volumen 2 está formado principalmente por sedimentos detríticos que corresponden a las UH 1 y UH 2. La zona de contacto con el salar corresponde a la interfase salina.

- **Volumenes Acuíferos Salar de Atacama (Volumen 3, 4 y 5):**

El sistema acuífero que se define como Acuíferos Salar de Atacama corresponde al volumen que ocupa el núcleo y la zona marginal del Salar de Atacama. El contacto modelado entre acuíferos, al norte, sur y este del sistema, corresponde a la interfase salina, es decir, a la zona de contacto entre la salmuera y el acuífero de agua dulce-salobre. Así este sistema acuífero delimita al norte, este y sureste, de manera erosiva, con el Volumen 1, al suroeste con el Volumen 2, mientras que en profundidad se deposita sobre el basamento. En el modelo 3D se ha dividido el sistema en 3 capas:

- Volumen 3. Acuífero superficial: según los valores de permeabilidad en el núcleo (capítulo 5.1) existe una capa de mayor permeabilidad hasta aproximadamente 50 m (dato referencial que debe ser sensibilizado a medida que se disponga de más datos de permeabilidad o se realicen más ensayos). Como el nivel de la napa se encuentra a aproximadamente a 2 m de profundidad, el espesor saturado es de 48 m. Por tanto, el volumen de acuífero teniendo en cuenta el espesor saturado es de 100.490 hm³, mientras que el volumen total es de 117.020 hm³. El acuífero definido en este volumen está constituido principalmente por la UH 2 (sector occidental) y UH 3 (sector oriental).
- Volumen 4. Acuífero intermedio: el volumen de acuífero intermedio modelado se encuentra entre los 50 y 150 m de profundidad con respecto la superficie y por lo tanto, subyace al acuífero superficial. Lo anterior se ha considerado de forma estimativa, de acuerdo con la hipótesis de que en profundidad la porosidad efectiva debe disminuir. Las dimensiones de este volumen deben ser validadas con más datos de permeabilidad en profundidad. En este caso el volumen, teniendo en cuenta el espesor saturado, coincide con el volumen total que es de 281.970 hm³. El acuífero definido en este volumen está constituido por la UH 4.

- Volumen 5. Acuífero profundo: el acuífero profundo del Salar de Atacama subyace al acuífero intermedio y se encuentra a más de 150 m de profundidad. Dicha profundidad se ha estimado de forma referencial, teniendo en cuenta que la porosidad efectiva debe ser menor que en el acuífero intermedio. La base del acuífero profundo está en contacto con el basamento definido y alcanza una profundidad máxima entre 900 y 1.100 m en el centro del salar, con respecto a la superficie. En este caso el volumen, teniendo en cuenta el espesor saturado, coincide con el volumen total que es de 1.951.100 hm³. El acuífero definido en este volumen se estima que podría estar constituido por una UH 4. Los datos anteriores deben ser validados con perfiles TEM, sondajes profundos de exploración, ensayos de porosidad y parámetros hidráulicos.

Volumen 6. Basamento: el basamento que se define en el presente modelo conceptual constituye la base de los sistemas acuíferos definidos y se caracteriza por ser una unidad de muy baja permeabilidad con recursos hídricos despreciables. En el centro del salar el basamento se encuentra entre 900 y 1.100 m de profundidad con respecto a la superficie, bajo el volumen 2 (Acuífero Monturaqui-Negrillar-Tilopozo (MNT) + acuífero aluvial borde sur) alrededor de 400 m y próximo a los 300 m cerca de la zona marginal y bajo el volumen 1 (Acuífero Aluvial borde este + acuífero aluvial borde norte) aproximadamente a 300 m aumentando en el norte hasta los 500 m de profundidad con respecto a la superficie del terreno. Además, en el modelo 3D las unidades geológicas que aforan entre los acuíferos definidos y la cuenca hidrográfica se han definido como basamento. El basamento está constituido principalmente por las UH 5 y UH 6 y su volumen es próximo a 50.677.000 hm³. 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 a la base de los volúmenes acuífero; de este modo podría definirse un límite inferior distinto y el volumen del basamento cambiaría en consecuencia.

Además, en el modelo 3D se ha construido una superficie piezométrica a partir de las isopiezas (agosto 2013) elaboradas para el presente proyecto.

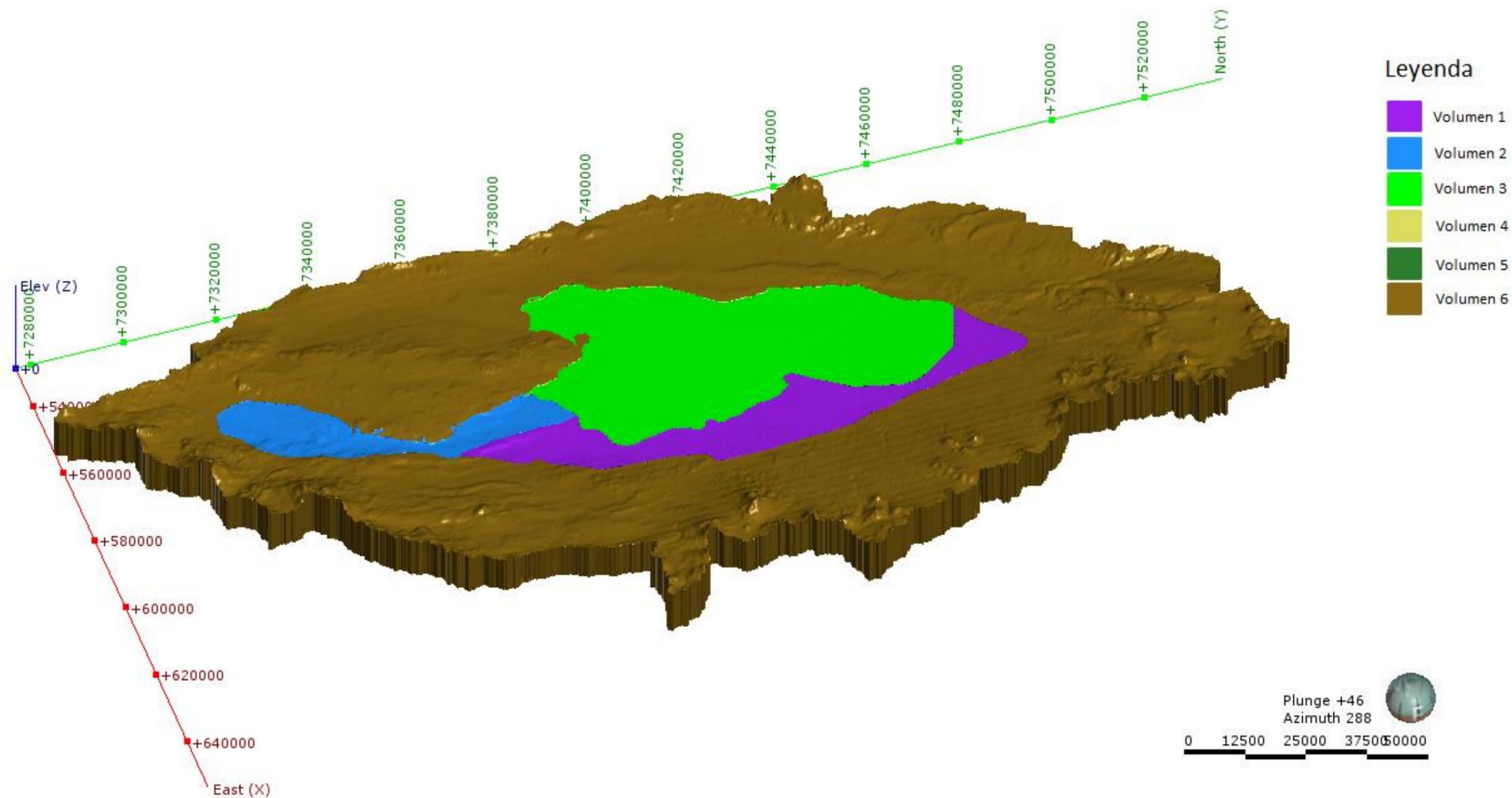


Figura 5-21: Imagen en planta de los volúmenes construido en el Leapfrog Hidro V2.7.2. Exageración vertical: x2.
Fuente: elaboración propia.

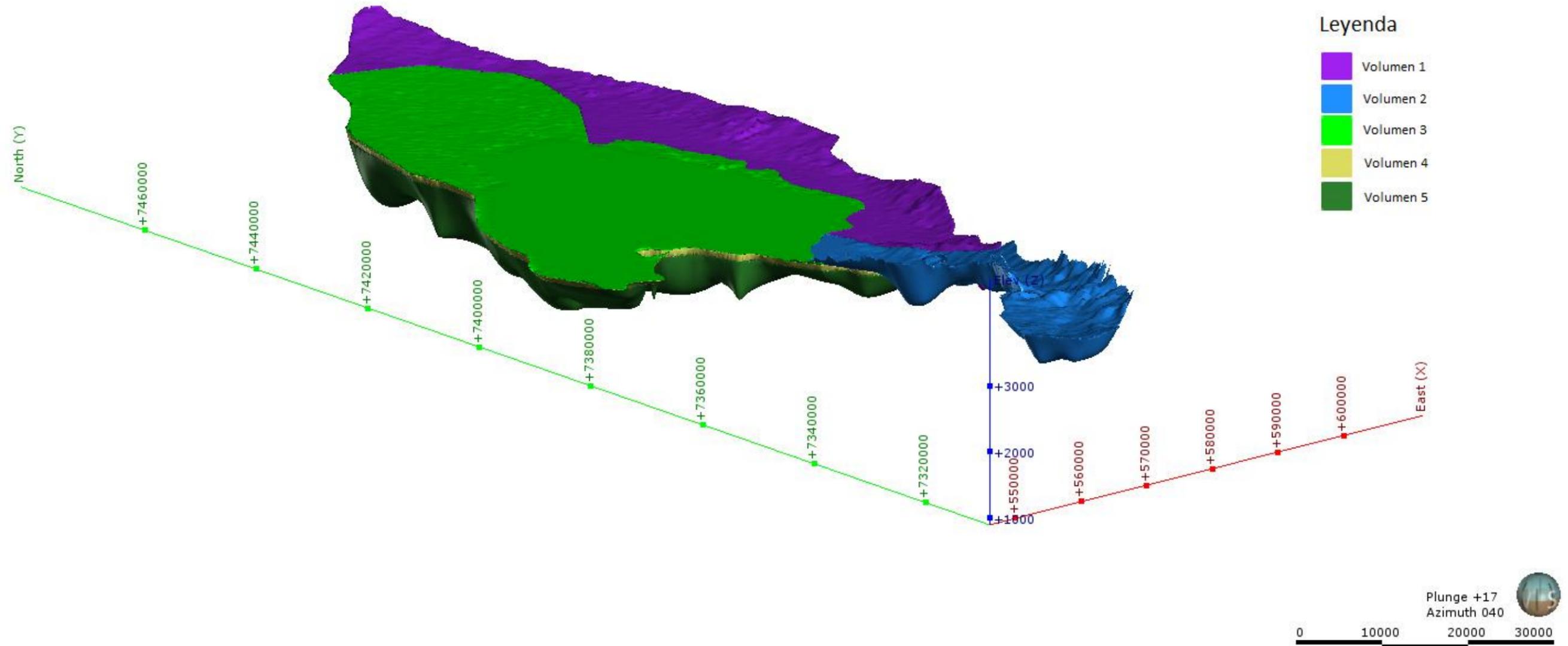


Figura 5-22: Vista noreste de los acuíferos del Salar de Atacama construídos en el Leapfrog Hidro V2.7.2. Exageración vertical: x8.

Fuente: elaboración propia a partir de referencias citadas en texto

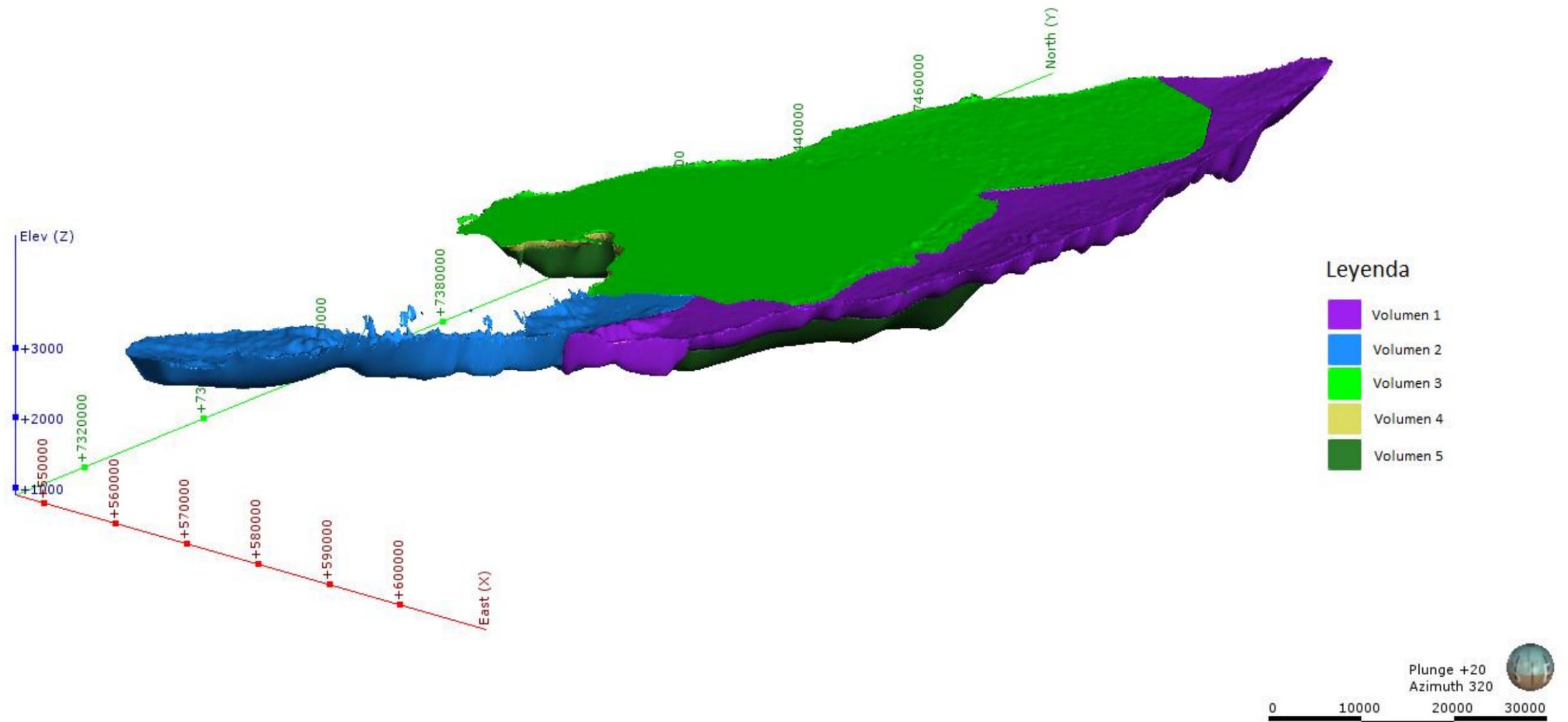


Figura 5-23: Vista noroeste de los acuíferos del Salar de Atacama construídos en el Leapfrog Hidro V2.7.2. Exageración vertical: x8.

Fuente: elaboración propia a partir de referencias citadas en texto

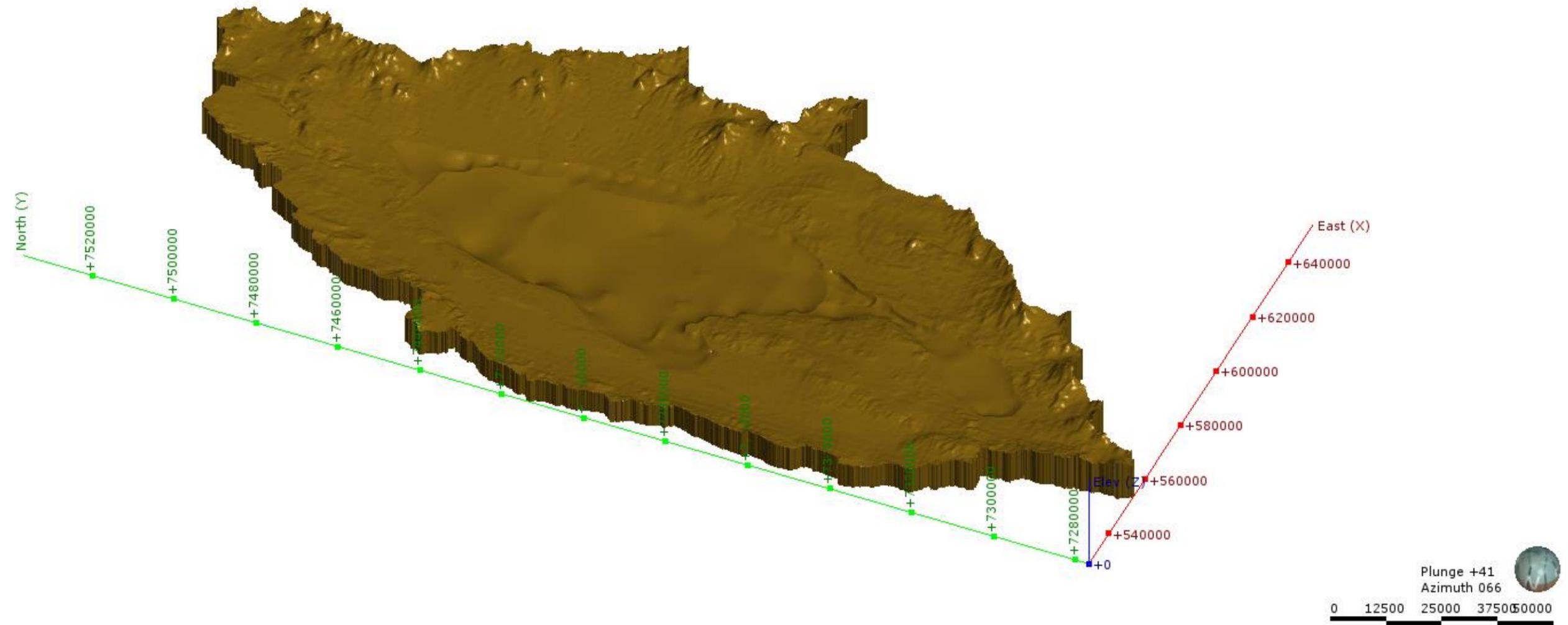


Figura 5-24: Imagen en planta del Volumen 6 construido en el Leapfrog Hidro V2.7.2. Exageración vertical: x2.

Fuente: elaboración propia a partir de referencias citadas en texto.

5.4 Piezometría

En el presente capítulo se realiza, en primer lugar, un análisis de la evolución temporal del nivel del agua de los pozos que se encuentran en el núcleo y la zona marginal. En segundo lugar, se presenta el mapa piezométrico para agosto de 2013 del núcleo y de los acuíferos que lo bordean.

5.4.1 Inventario de puntos de agua

El análisis de la evolución temporal del nivel de agua se ha realizado a partir de registros históricos desde 1985 hasta 2015. Estos registros se han integrado en una base de datos compuesta por 783 puntos con niveles de agua (Anexo I, BBDD de niveles). Los registros corresponden tanto a mediciones puntuales, como a series de datos; así el 20% de los registros son mediciones puntuales y el 80% corresponden a series de datos temporales. Cabe destacar que el 75% de las series temporales corresponden a un periodo de medición continua superior a 5 años, mientras que el 12%, es superior o igual a 10 años. Finalmente, el periodo que abarca un mayor número de registros corresponde a 1995-2015.

La distribución de los pozos con registro de nivel se encuentra localizada principalmente en el núcleo del salar y en los bordes del mismo, así como en el área del acuífero de Monturaqui-Negrillar-Tilopozo (MNT). Sin embargo, al norte del núcleo del salar se disponen de escasos registros y además son datos puntuales. Por otro lado, en los bordes de la cuenca, donde existen los acuíferos de menor entidad (capítulo 5.2), no se dispone de pozos con registros.

En la Figura 5-25 se puede observar la distribución espacial de los pozos con registros de nivel.

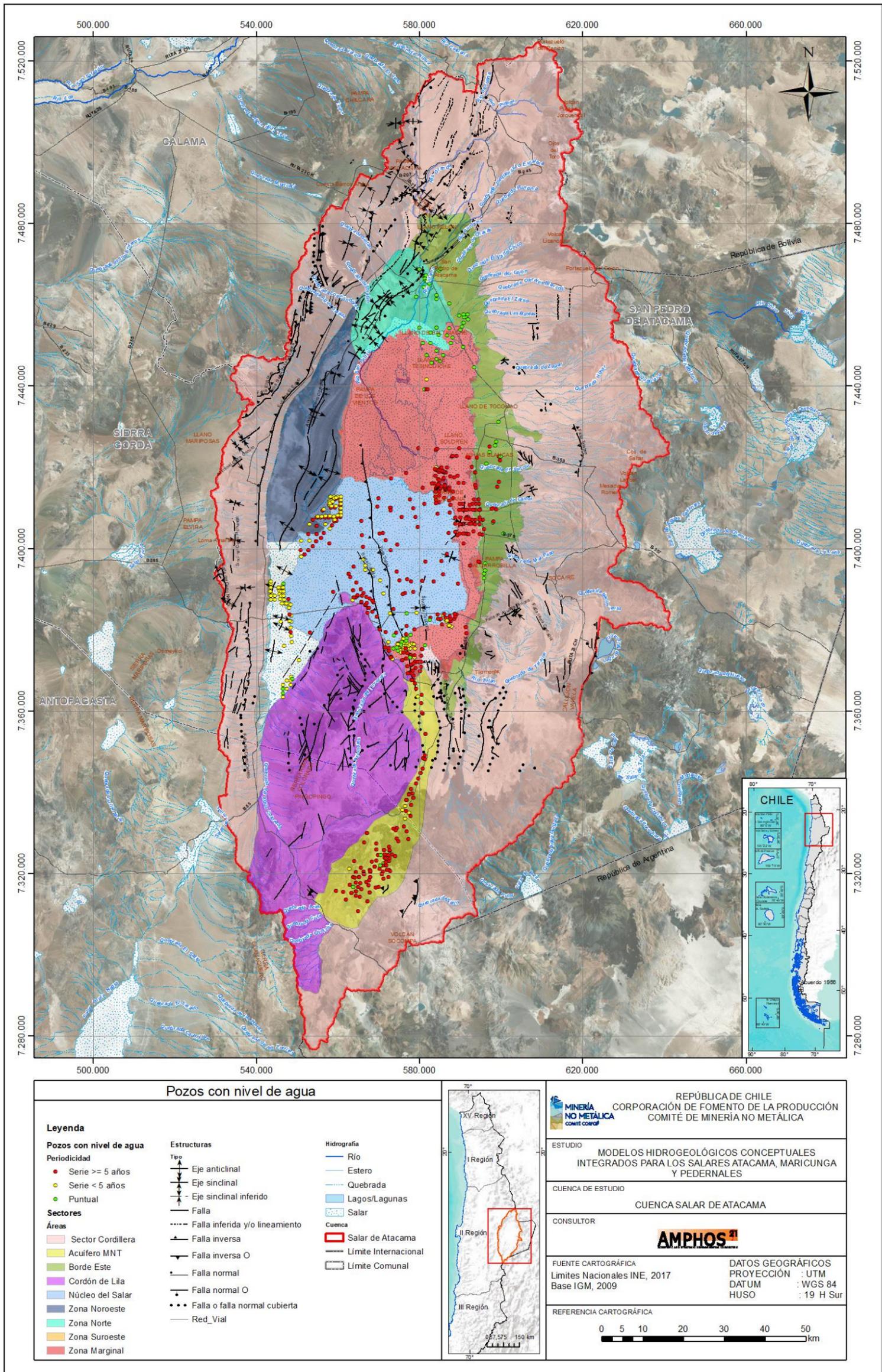


Figura 5-25: Catastro de pozos con registro de nivel de agua.

Fuente: elaboración propia.

5.4.2 Evolución de niveles

Los pozos que se han estudiado en la evolución temporal del nivel de agua se encuentran en las siguientes zonas:

- Zona marginal.
- Acuífero aluvial del borde este.
- Núcleo del Salar de Atacama.

En la Figura 5-26 se ubican las diferentes zonas estudiadas y los pozos que se han tenido en cuenta como referencia en el análisis. La fuente de los datos corresponde principalmente a mediciones que realiza SQM en el Plan de Seguimiento Ambiental (PSA) comprometido en el RCA 226/2006, datos que se presentan en el informe “Cuarta Actualización del Modelo Hidrogeológico del Salar de Atacama” realizado por CSIC (2017) para la minera SQM. Además, se han incluido los pozos con registros de nivel extraídos del modelo numérico presentado en el EIA de Rockwood Lithium, elaborado por SGA (2015).

A continuación, se detalla la evolución de los niveles por zonas, para el periodo desde 1986 hasta diciembre de 2015.

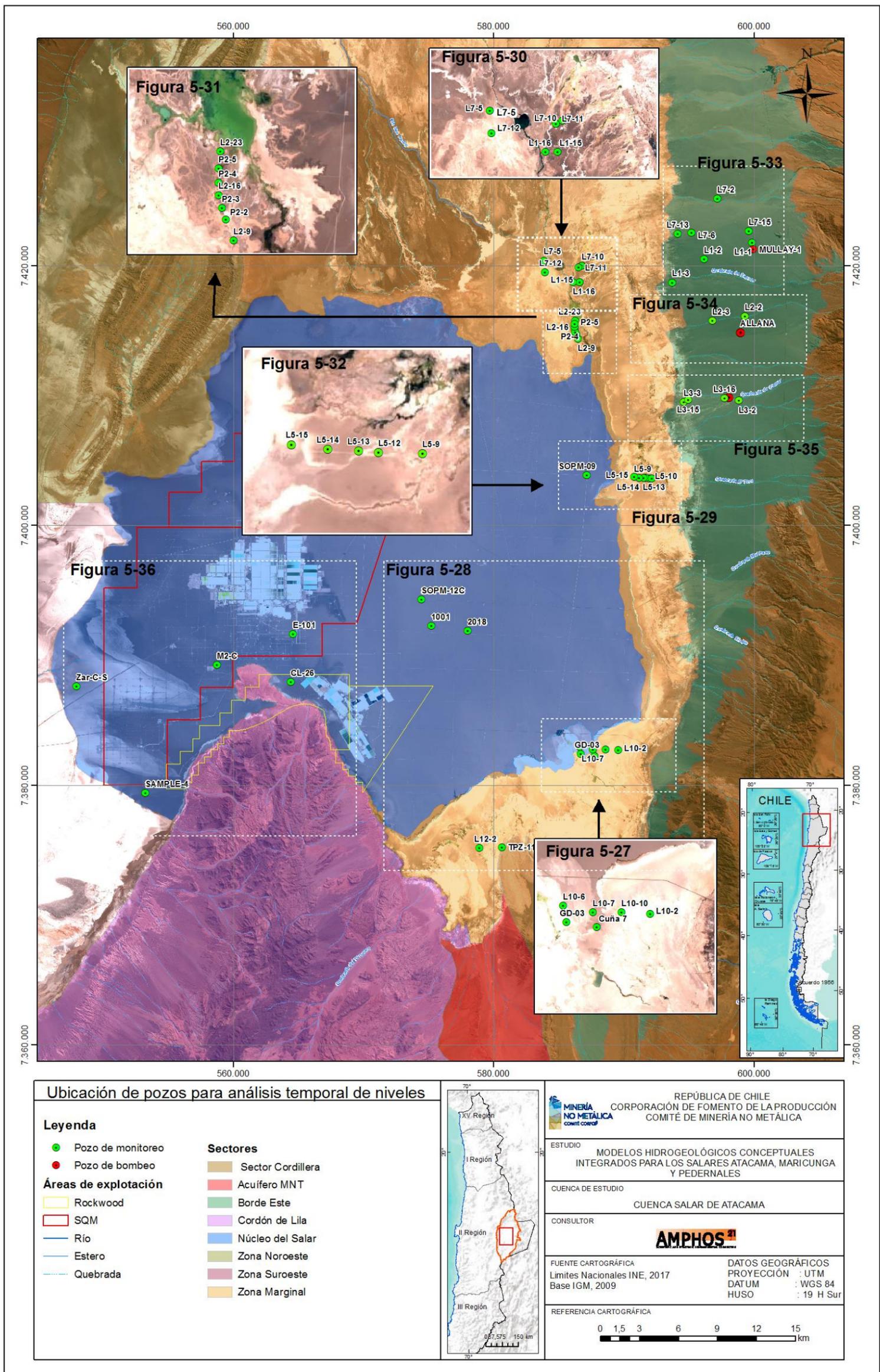


Figura 5-26: Ubicación de los pozos analizados en la evolución temporal del nivel de agua.

Fuente: elaboración propia a partir de referencias citadas en texto.

Zona marginal, sureste del salar (Laguna Interna, Salada y Saladita)

En la Figura 5-27 se muestra la evolución temporal de la cota piezométrica de 6 pozos, representativos del comportamiento hidráulico del sector.

La tendencia general del nivel piezométrico es de mantenerse constante con variaciones de orden centimétrico a decimétrico y de tipo estacional a largo del periodo de muestreo. El nivel piezométrico aumenta entre los meses de enero y marzo (meses en que se produce la recarga del acuífero). Destaca un incremento de hasta 50 cm en marzo 2015.

A partir de 2012 el efecto de la recarga es más significativo, debido a que de 2012 hasta la actualidad el clima se caracteriza por ser más húmedo. Concretamente, el aumento del nivel se produce en los meses de febrero de 2012 y 2013 y de marzo de 2015 y coincide con precipitaciones de entre 13 mm/mes y 37,5 mm/mes, registradas en la estación meteorológica Peine (2.460 m s.n.m.), situada a 7 Km al sureste de las lagunas. Mediante el análisis anterior se estima que el acuífero tiene una respuesta relativamente rápida frente a los eventos de precipitación y se produce un incremento del nivel piezométrico del acuífero.

La cota piezométrica en pozos situados en el núcleo, en las proximidades de la zona anteriormente estudiada, como por ejemplo los pozos 2018, 1001 y SOPM-12C (Figura 5-28), muestran un descenso del nivel desde el año 1996 hasta la actualidad de alrededor de 90 cm. Además, se observa que cuando el nivel se encontraba más próximo a la superficie (pozo 2018 entre los años 1986 y 1993), el núcleo tenía un comportamiento cíclico controlado por la evaporación, mientras que en los últimos años, concretamente desde 2012, ha descendido el nivel progresivamente debido en parte a la extracción de salmuera y por otra, a la evaporación desde la superficie freática. No obstante, cabe destacar que los incrementos puntuales del nivel en los eventos de recarga han amortiguado parte del descenso. El descenso observado tiende a la estabilización después de cada evento de recarga, en valores próximos a la cota 2.299,5 m s.n.m.

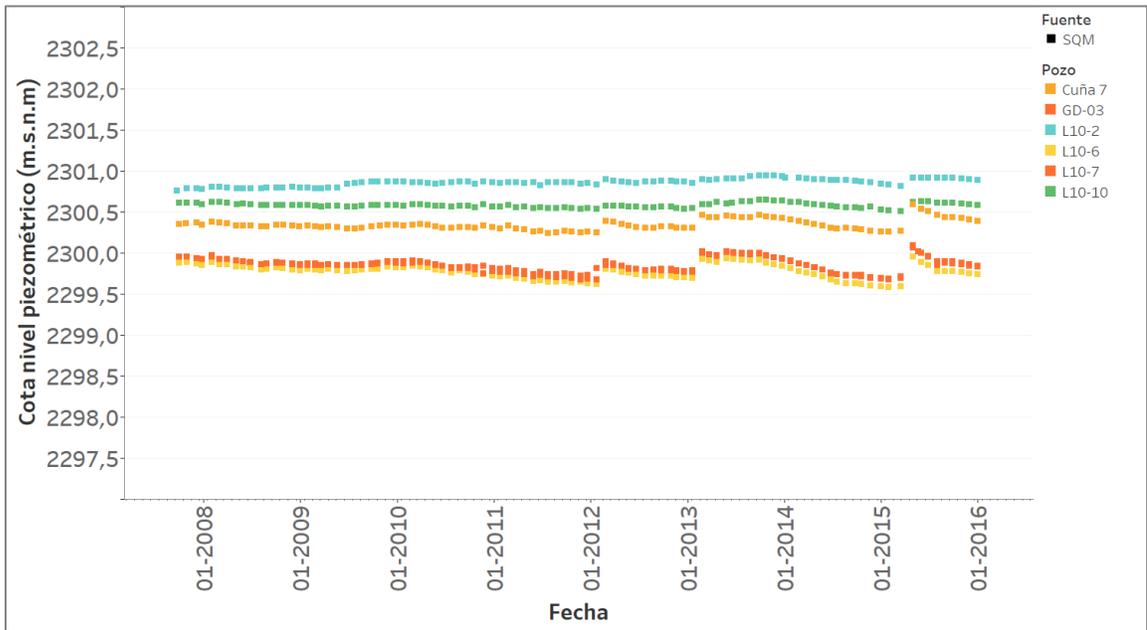


Figura 5-27: Evolución temporal de la cota piezométrica en el borde sureste del Salar de Atacama (zona marginal).

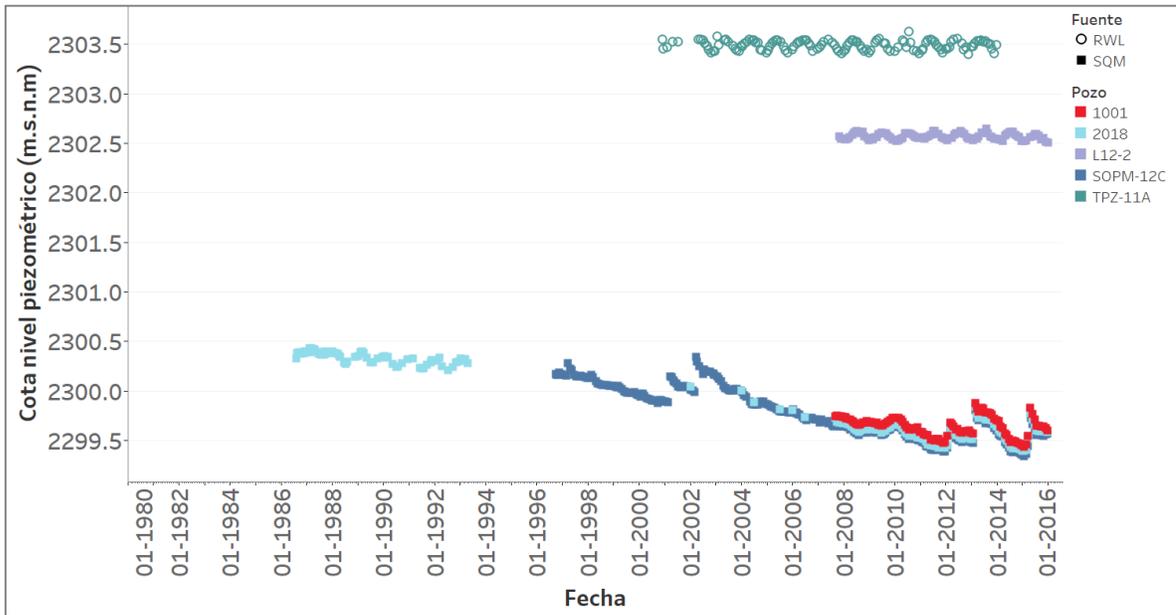


Figura 5-28: Evolución temporal de la cota piezométrica en el borde sureste del Salar de Atacama. Zona marginal (L12-2 y TPZ-11A) y núcleo (pozo 2018, 1001 y SOPM-12C).

Zona marginal centro y norte (Aguas de Quelana, Laguna Chaxa y Barros Negros)

Los pozos de monitoreo de los gráficos que se presentan a continuación se encuentran en las proximidades de las Lagunas Aguas de Quelana (Figura 5-29), en las inmediaciones de la Laguna Chaxa (Figura-5-30) y aguas abajo de la Laguna Chaxa, a la altura de Barros Negros (Figura-5-31).

El nivel piezométrico en esta zona está influenciado por la evaporación, que produce un descenso del nivel en los meses de verano, y también por los eventos de recarga, que implican un incremento centimétrico de la cota piezométrica, sobre todo a partir del año 2012, correspondiente al periodo húmedo. La respuesta del acuífero frente a los eventos de recarga es relativamente rápida.

En la Figura-5-30 y Figura-5-31 se observa la misma tendencia estacional, lo que indica que la zona marginal centro y norte tienen un comportamiento hidráulico similar.

En los pozos de la Figura-5-31 la variación estacional del nivel es más significativa que en el resto de zonas estudiadas. Esto puede ser debido a que la evaporación es más alta por estar más someros los niveles de agua.

Cabe destacar, que existe una diferencia de 6 m entre las cotas aportadas por SQM y las aportadas por SLM NX Uno de Peine en los pozos de esta zona y para fechas de monitoreo próximas y debe estudiarse con más detalle esta diferencia y con información que Amphos actualmente no dispone.

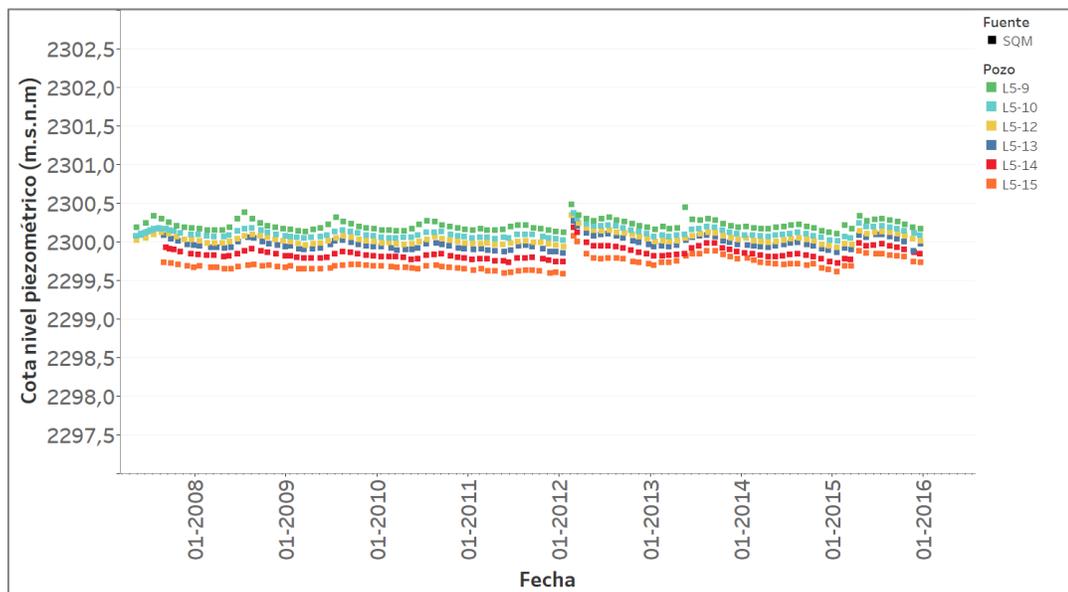


Figura 5-29: Evolución temporal de la cota piezométrica en la zona marginal centro del Salar de Atacama (Aguas de Quelana).

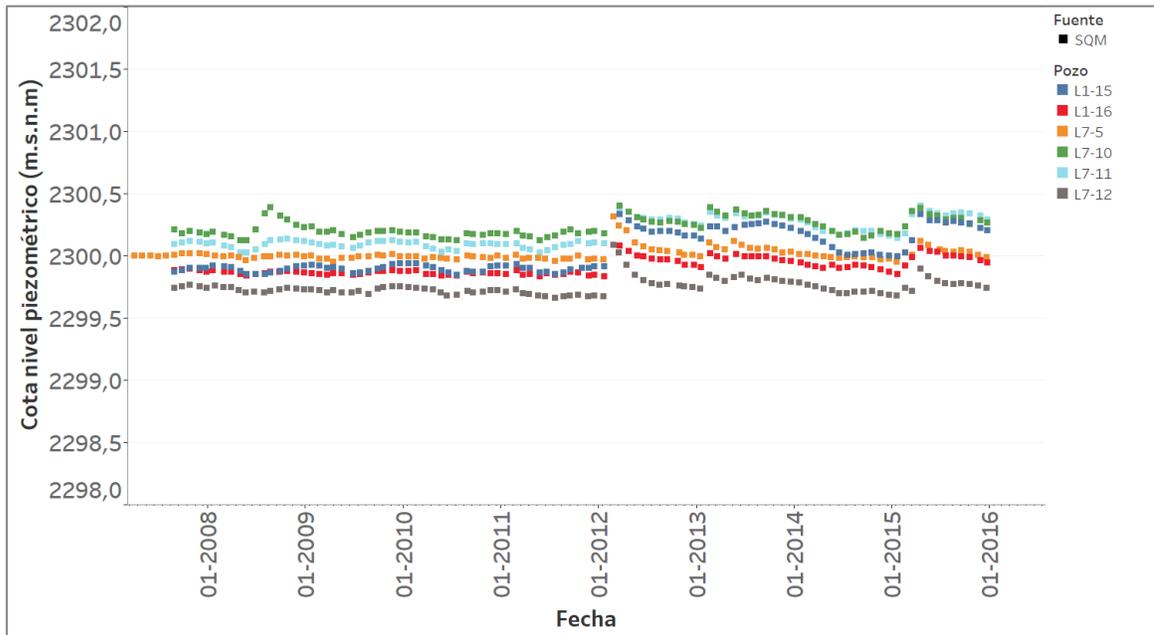


Figura-5-30: Gráfico con variación de las cotas piezométricas en la zona marginal norte del Salar de Atacama (Laguna Chaxa).

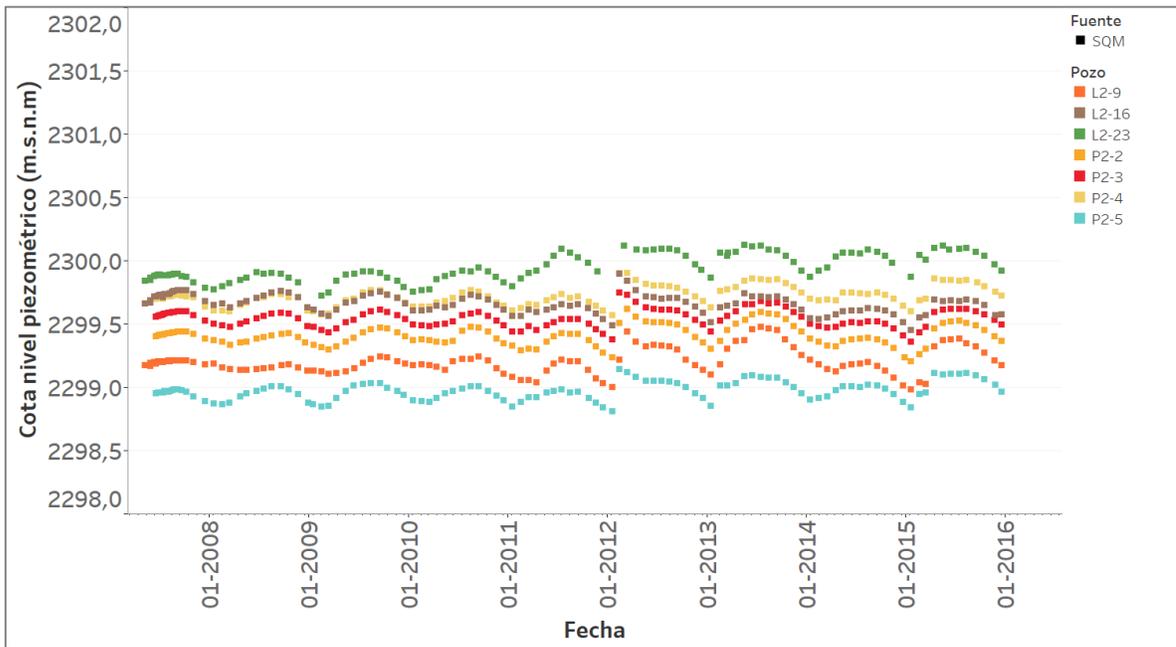


Figura-5-31: Gráfico con variación de las cotas piezométricas en la zona marginal norte del Salar de Atacama (Barros Negros).

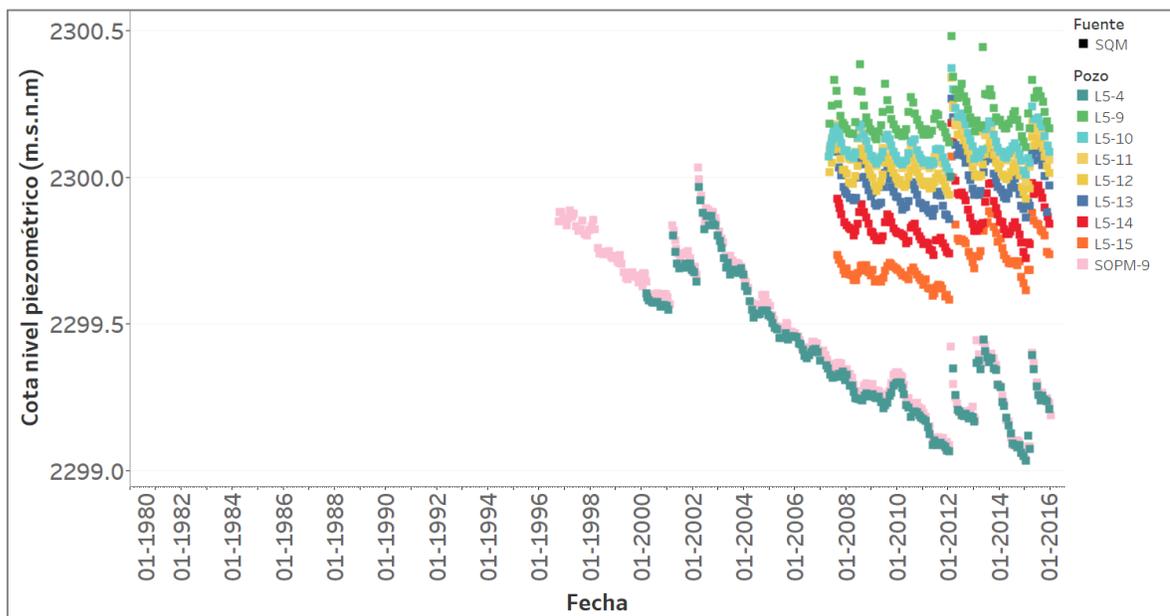


Figura 5-32: Gráfico con variación de las cotas piezométricas en la zona marginal centro del Salar de Atacama y núcleo (SOPM-9, L5-4).

En el gráfico de la Figura 5-32 se observan los pozos que se encuentran en la traza imaginaria de un perfil este-oeste, que atraviesa el núcleo y la zona marginal centro (Figura 5-26). En éste se observa que el nivel de los pozos que están cerca del núcleo (SOPM-9 y L5-4) presenta una tendencia de decaimiento, con una tasa de descenso desde el año 2000 hasta el último periodo de muestreo representado (2015), de 6 cm/año, debido posiblemente por el efecto continuado de la extracción de salmuera. Sin embargo, los pozos de la zona marginal no presentan una disminución del nivel y muestran un comportamiento cíclico, controlado por la evaporación. Tanto el núcleo como la zona marginal están influenciados por los eventos de recarga, que producen un incremento del nivel en el acuífero.

Acuífero aluvial del borde este (Pozo Mullay, Allana y Camar)

En el acuífero aluvial existen varios pozos de bombeo, entre los cuáles se encuentra el Pozo Mullay, el Allana y el Camar. Todos ellos tienen derechos de agua otorgados. En la Figura 1-4 se muestra la evolución temporal del bombeo (capítulo 1.3).

En las inmediaciones del Pozo Mullay-1 (Figura 5-26) los pozos de monitoreo muestran un descenso de alrededor de 1 m (Figura-5-33) (pozo L1-1, situado a 800 m al sureste del Mullay y pozo L7-15, a 300 m al noreste del mismo), mientras que a 4 Km el efecto del bombeo todavía es notorio y se produce un descenso de 70 cm y 50 cm (pozos L7-2 y L1-2). Aparentemente, el radio de influencia del bombeo del pozo Mullay-1, en ausencia de otras alteraciones, podría ser de hasta 5 Km (pozo

L7-13). En las inmediaciones de la Laguna Pular ya no se observa el efecto del bombeo (pozo L7-14).

En los pozos Allana y Camar-2 se observa la misma tendencia y el mismo radio de influencia observado (5 Km) que en las inmedaciones del pozo Mullay (Figura 5-34 y Figura 5-35).

La tendencia general de descenso fue más marcada a partir de finales de 2008 en adelante, cuando se incrementó la tasa de bombeo de los pozos con derechos de agua. El acuífero aluvial no muestra variaciones del nivel por efecto de la recarga, ni de tipo estacional, a diferencia de la zona marginal. Cabe destacar que los descensos tienden a la estabilización, a partir de 2013-2014 aproximadamente.

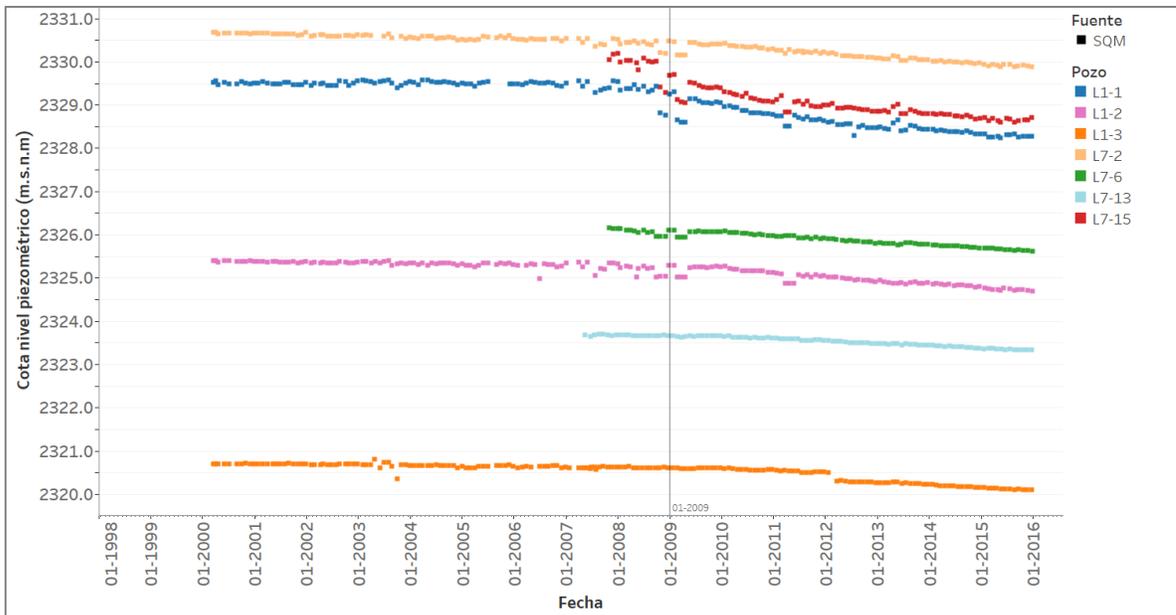


Figura-5-33: Evolución temporal de la cota piezométrica en el acuífero aluvial Salar de Atacama (inmediaciones del Pozo Mullay-1).

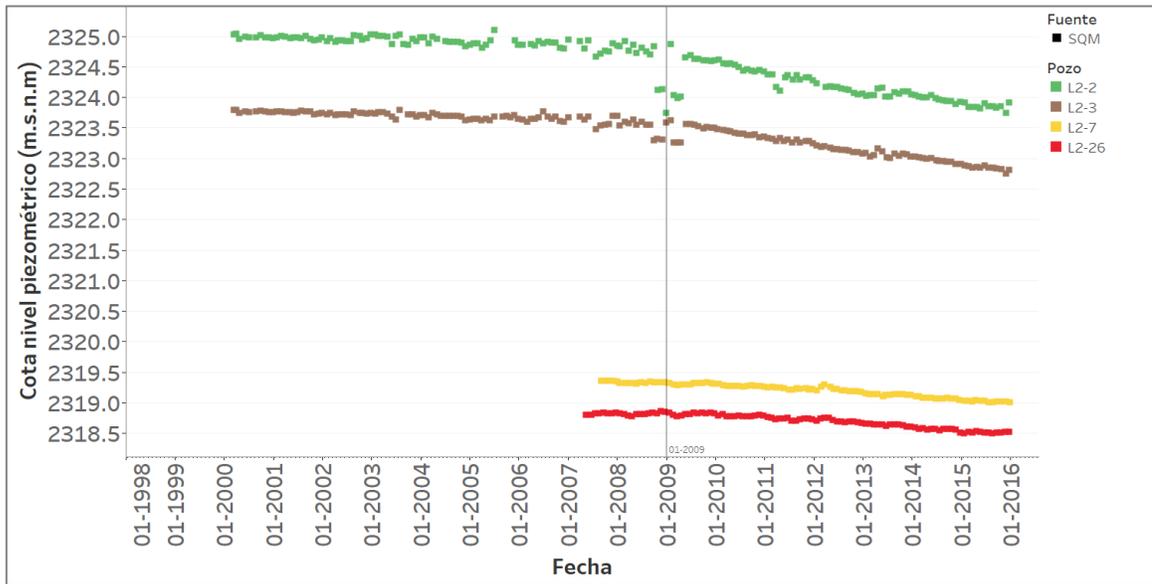


Figura 5-34: Evolución temporal de la cota piezométrica en el acuífero aluvial Salar de Atacama (inmediaciones del Pozo Allana).

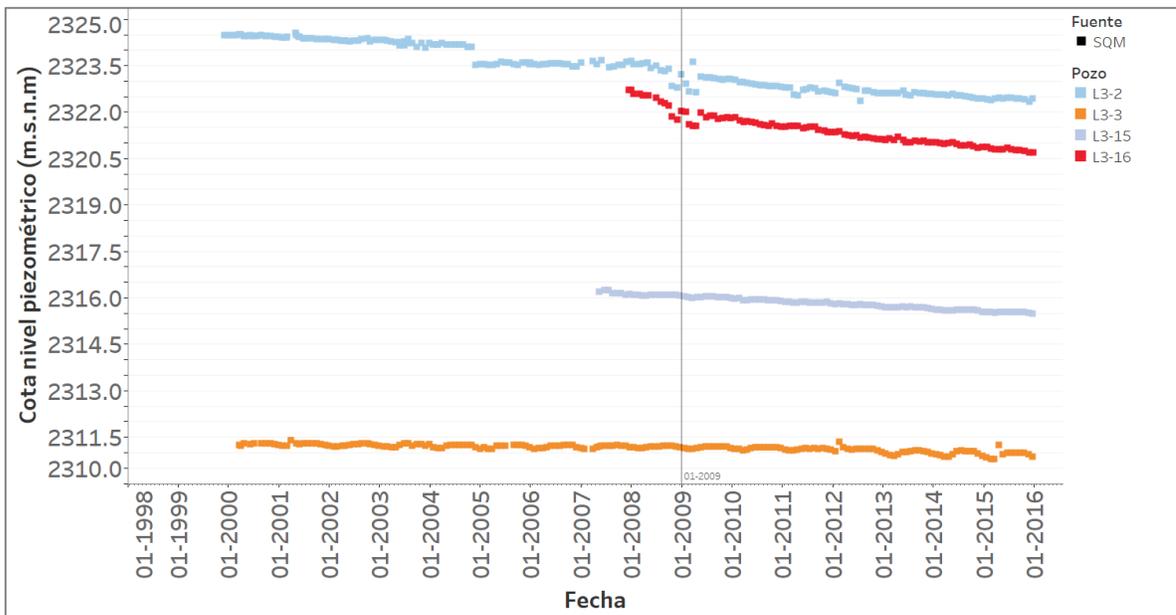


Figura 5-35: Evolución temporal de la cota piezométrica en el acuífero aluvial Salar de Atacama (inmediaciones del Pozo Camar-2).

Núcleo del Salar de Atacama, área de extracción.

En la Figura-5-36 se observa la evolución temporal del nivel piezométrico desde 1997 hasta finales de 2015 de los datos extraídos CSIC (2017) y SGA (2015), realizados para las mineras SQM y Rockwood Lithium, respectivamente.

En general, los pozos que se encuentran en el sector occidental del núcleo muestran un descenso del nivel. Entre ellos destaca el pozo M2-C con una tasa de descenso, desde 1997 hasta 2012, de 0,2 m/año y entre los años 2012 y 2015, se incrementa la tasa a 2 m/año. Lo anterior puede ser debido al aumento de la extracción de salmuera por parte de SQM establecido en el RCA 226/2006, de 1.250 a 1.500 l/s. En este pozo el nivel ha descendido alrededor de 8 m a lo largo del periodo monitoreado (desde el año 1997).

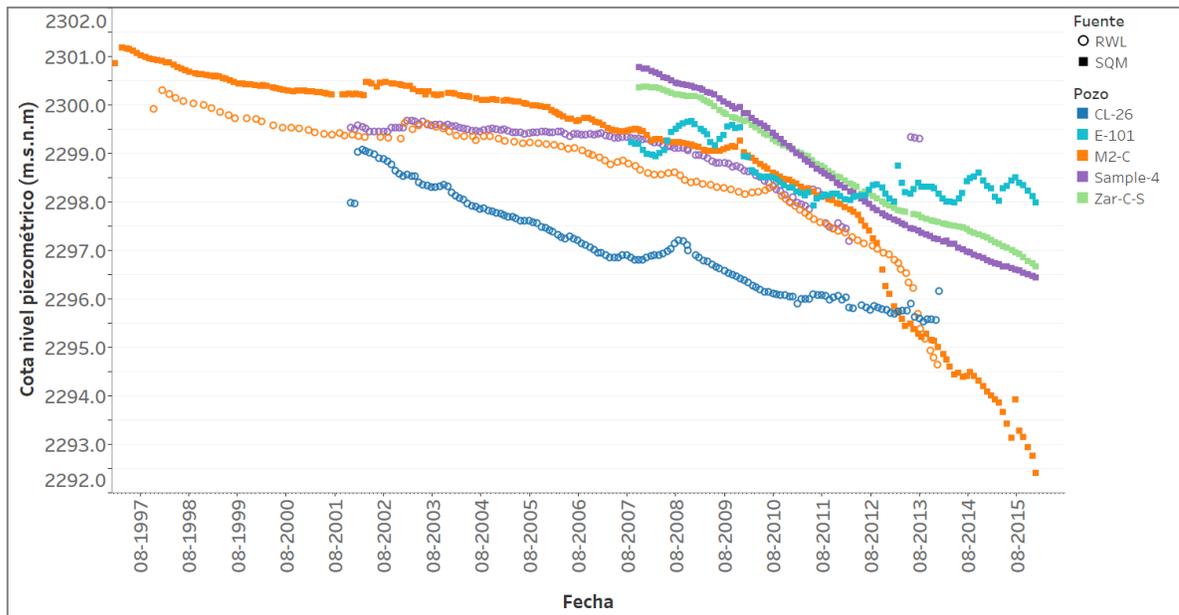


Figura-5-36: Gráfico con variación de las cotas piezométricas en la zona de influencia del cono de bombeo generado por SQM.

En términos generales y a partir del análisis espacial y temporal de la cota piezométrica realizado hasta el momento, se observa que en el área de extracción autorizada de SQM, las tasas de descenso, desde el año 2000 (periodo previo a los eventos máximos de recarga) y hasta 2015 (año hasta el que llegan las mediciones) están comprendidas entre 1 m/año y 0,2 m/año, mientras que en el resto del núcleo del salar, la tasa es de entre 0,02 y 0,06 m/año.

5.4.3 Funcionamiento del flujo en la zona de estudio

En este capítulo se presenta el estudio de la piezometría de agosto de 1986 (Hydrotechnica, 1987), correspondiente al núcleo del salar y de agosto de 2013, del núcleo y de los acuíferos que lo bordean, realizada por Amphos 21 en el presente proyecto.

En agosto de 1986 el Salar de Atacama era explotado por la Sociedad Chilena del Litio, con 48,6 l/s de extracción anual, en las inmediaciones del borde sureste del núcleo (actuales instalaciones de Rockwood Lithium), mientras que en agosto de 2013, se explotaba por SQM y Rockwood Lithium, con caudales de extracción significativamente mayores. Además, cabe tener en cuenta que existen extracciones de agua en el acuífero de Monturaqui-Negrillar-Tilopozo por parte de MEL, CMZ y Rockwood Lithium y también en el acuífero aluvial del borde este por parte de SQM, principalmente. Teniendo en cuenta lo anterior, la extracción en la cuenca al año 2013 asciendía a 3.000 l/s.

5.4.3.1 Piezometría año 1986

El mapa de isopiezas de agosto de 1986 Hidrotechnica (1987) (Figura 5-37) se elaboró a partir de datos de nivel en 38 sondajes perforados en el interior del salar que, además, fueron monitoreados semanalmente.

En el mapa se reconoce un área de menor cota piezométrica (2.299,3 m s.n.m.), similar a un cono de descenso, que en usencia de bombeos en el sector donde se dibuja (al oeste del sistema de falla Salar y próximo a la península de Chépica) se cree que podría ser un efecto natural provocado por la evaporación del nivel freático. En la piezometría no se señala el posible efecto del bombeo de la Sociedad Chilena del Litio, pero debido al bajo caudal, podría ser de baja influencia.

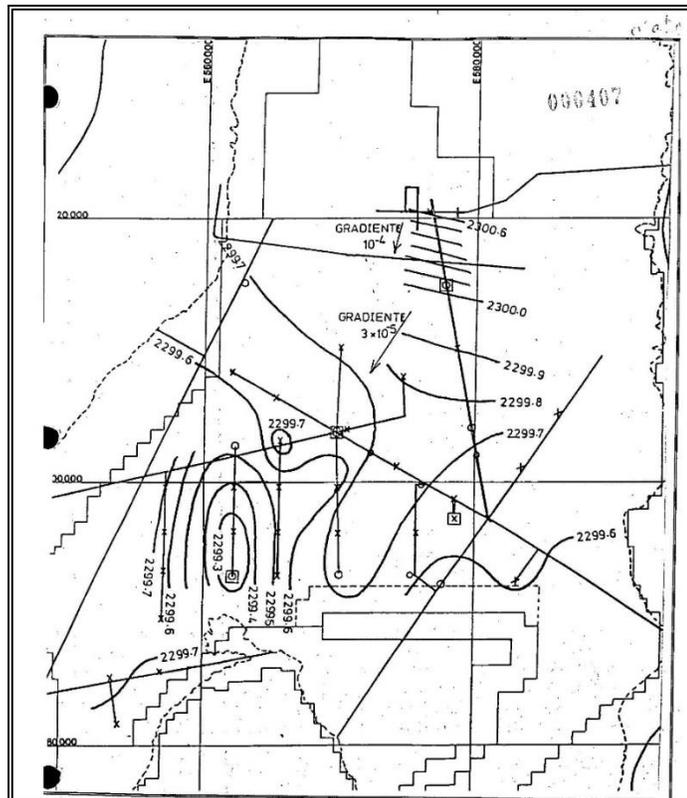


Figura 5-37: Mapa piezométrico del nivel de salmuera (m s.n.m.) a 12-08-1986 (Hydrotechnica, 1987).

5.4.3.2 Piezometría año 2013

El mapa de isopiezas se ha elaborado a partir de las cotas piezométricas de agosto de 2013. Se ha seleccionado el año 2013 debido a que se dispone de un mayor número de datos en la cuenca y porque el mes de agosto es un periodo en el que no se producen precipitaciones. Por lo tanto, se puede observar nivel piezométrico base, en ausencia de incrementos de nivel debido a la recarga.

El mapa de isopiezas se ha elaborado a nivel de cuenca con una equidistancia de 10 m, en función de los registros disponibles (Figura 5-38) y se presenta, además, las isopiezas del núcleo del Salar de Atacama con mayor detalle en la Figura 5-39, con una equidistancia de 1 m, debido a que el gradiente es muy pequeño.

Las fuentes de información de los datos, a partir de los cuáles se ha elaborado la piezometría, son las siguientes:

- CSIC (2017). Cuarta Actualización del Modelo Hidrogeológico del Salar de Atacama. SQM Salar S.A.

- SGA (2015). Adenda V: EIA Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama. Rockwood Lithium.
- CPH (2017). Adenda 3: EIA Planta de Producción de sales de potasio. SLM NX Uno de Peine.
- Golder (2017). Modelo Hidrogeológico Conceptual y Numérico para el Acuífero de Monturaqui-Negrillar-Tilopozo. Minera Escondida Ltda.

En el Anexo I se presentan la BBDD de niveles con los registros utilizados para realizar el mapa de isopiezas.

En términos generales, las direcciones de flujo subterráneo son convergentes al núcleo del salar y provienen del norte (desde el delta de San Pedro, acuífero aluvial y depósitos evaporíticos de la zona marginal norte), a lo largo del borde este (acuífero aluvial), sureste (acuífero MNT) y suroeste (aportes menores desde la parte sureste de Cordillera de Domeyko) (Figura 5-38).

Por el oeste, donde se encuentra la Formación San Pedro que aflora en la Cordillera de la Sal, no se ha identificado una entrada de agua subterránea significativa, debido a que las discontinuidades que aportan permeabilidad a la unidad geológica (estratificación, fallas y ejes de pliegues) tienen una orientación norte-sur y por lo tanto, el agua subterránea debe transmitirse en dicha dirección y no hacia el núcleo, que se encuentra al este de la cordillera.

El gradiente hidráulico de los acuíferos que recargan el salar está comprendido entre 0,0008 (borde norte) y 0,0086 (acuífero MNT). La máxima cota piezométrica identificada se encuentra en el acuífero MNT a 3.050 m s.n.m., mientras que la mínima se observa a lo largo del perímetro del núcleo del salar, a 2.300 m s.n.m.

La explotación de salmuera en el núcleo del salar genera dos conos de depresión del nivel en este sector. El cono de depresión de mayor envergadura corresponde al que se genera en el sector occidental del núcleo, al oeste del Cordón de Lila. La zona deprimida refleja una morfología elipsoidal en superficie, cuyo eje más largo tiene una orientación noreste-suroeste y aproximadamente 20 Km de longitud. La morfología de la zona deprimida debe estar influenciada posiblemente por la distribución espacial de la permeabilidad y la posición del campo de pozos de bombeo. La mínima cota piezométrica en el cono de depresión es de 2.295 m s.n.m.

El segundo cono de depresión se encuentra al este del Cordón de Lila. Las dimensiones de dicha zona deprimida son aproximadas ya que existen menos datos para generar las isopiezas en este sector, pero se estima que el diámetro del cono puede llegar a ser, al menos, de 4 Km de diámetro. La mínima cota piezométrica en la zona más deprimida es de 2.299 m s.n.m.

En el acuífero MNT también se genera una zona deprimida en la parte alta del acuífero (sector Monturaqui), que según el mapa de isopiezas tiene un diámetro máximo de 2 Km en dirección NE-SW.

En la cuenca, el nivel de agua se encuentra más profundo en la parte alta del Acuífero MNT (con 150 m de profundidad promedio) y en el acuífero del borde norte (a 40 m). En el acuífero aluvial del borde este se encuentra alrededor de 20 m de profundidad, con respecto a la superficie.

A medida que el flujo de agua subterránea se mezcla con la salmuera del núcleo (zona marginal), se forma una cuña salina, bien identificada en el borde este y sureste del salar, y el nivel de agua subterránea del acuífero se encuentra más somero, alrededor de 2 m, incluso puede llegar a aflorar el nivel freático.

La recarga de los acuíferos que bordean el núcleo se genera por infiltración de agua de lluvia y nieve (deshielo) desde la cordillera, que puede producir escorrentía o percolación en el aluvial, mientras que el núcleo del salar es recargado principalmente por los acuíferos colindantes y en menor grado, por agua de lluvia que se infiltra directamente.

La descarga se produce por bombeo del acuífero aluvial (MNT, borde norte y este), evaporación de la superficie freática en la zona marginal y en la parte del núcleo del salar donde el nivel se encuentra a menos de 2 m de profundidad con respecto a la superficie y finalmente, por bombeo de salmuera en el acuífero del núcleo del salar. Cabe destacar que existen zonas donde se produce evaporación de la superficie freática cuando ésta se encuentra entre 2 y 4 m (Golder, 2017).

Teniendo en cuenta la piezometría del año 1986 en el núcleo del salar (Figura 5-37) y los descensos que se presentan en el acuífero MNT desde el año 1995 hasta 2015, se interpreta que, en términos generales, desde el año 1986 hasta 2013 (Figura 5-38) el nivel ha descendido en la área deprimida del sector occidental del núcleo, un promedio aproximado de 4 m. Localmente, los descensos pueden ser mayores (pozo M2-C, Figura-5-36).

En el acuífero de Monturaqui, desde 1995 hasta 2015 se ha producido un descenso del nivel entre 0,1 m y 30 m. El máximo descenso se encuentra en el campo de bombeo de Monturaqui y el mínimo, aguas abajo, en la zona marginal.

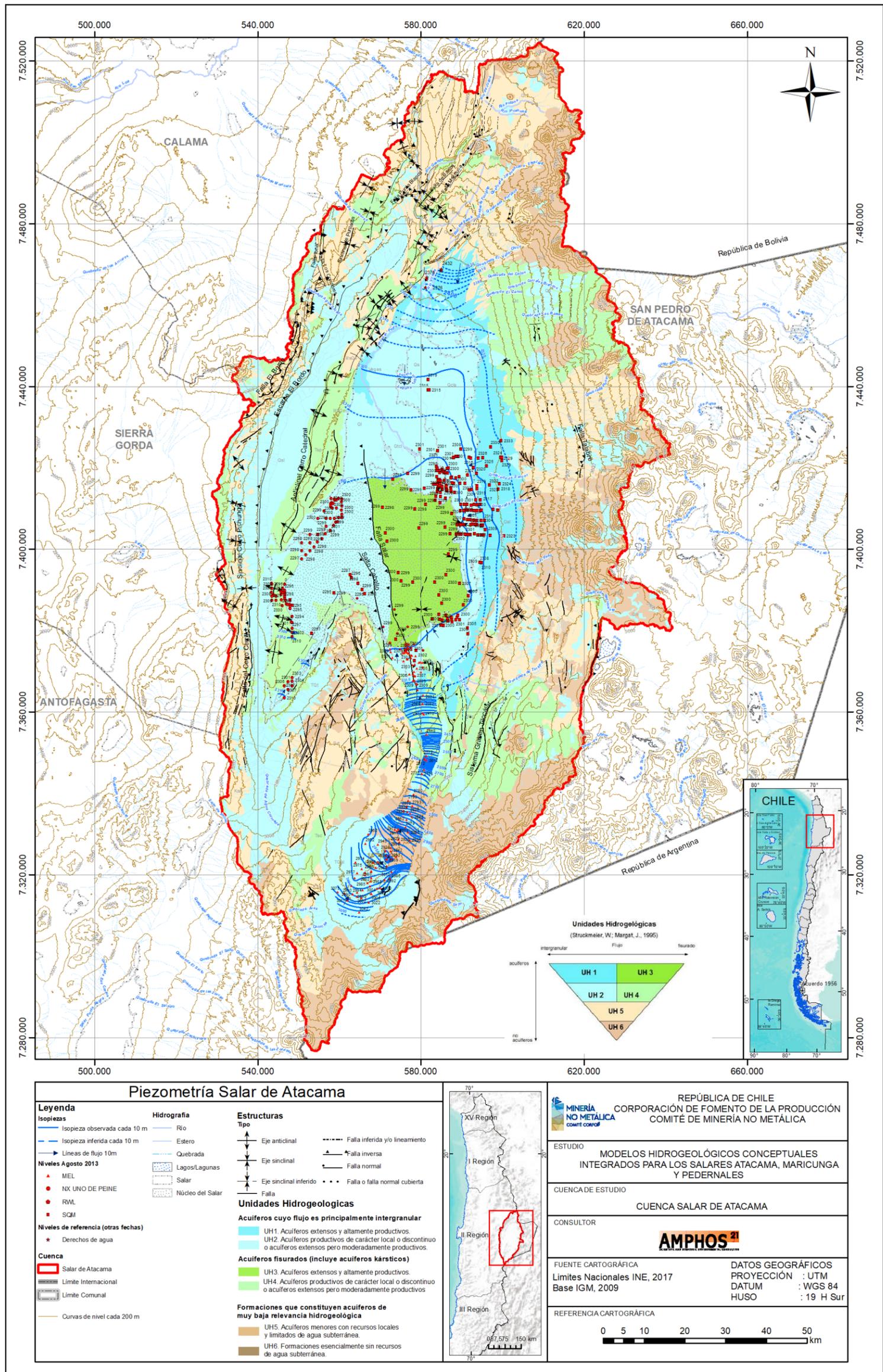


Figura 5-38: Mapa piezométrico de la Cuenca Salar de Atacama (agosto de 2013). Equidistancia de 10 m.

Fuente: elaboración propia.

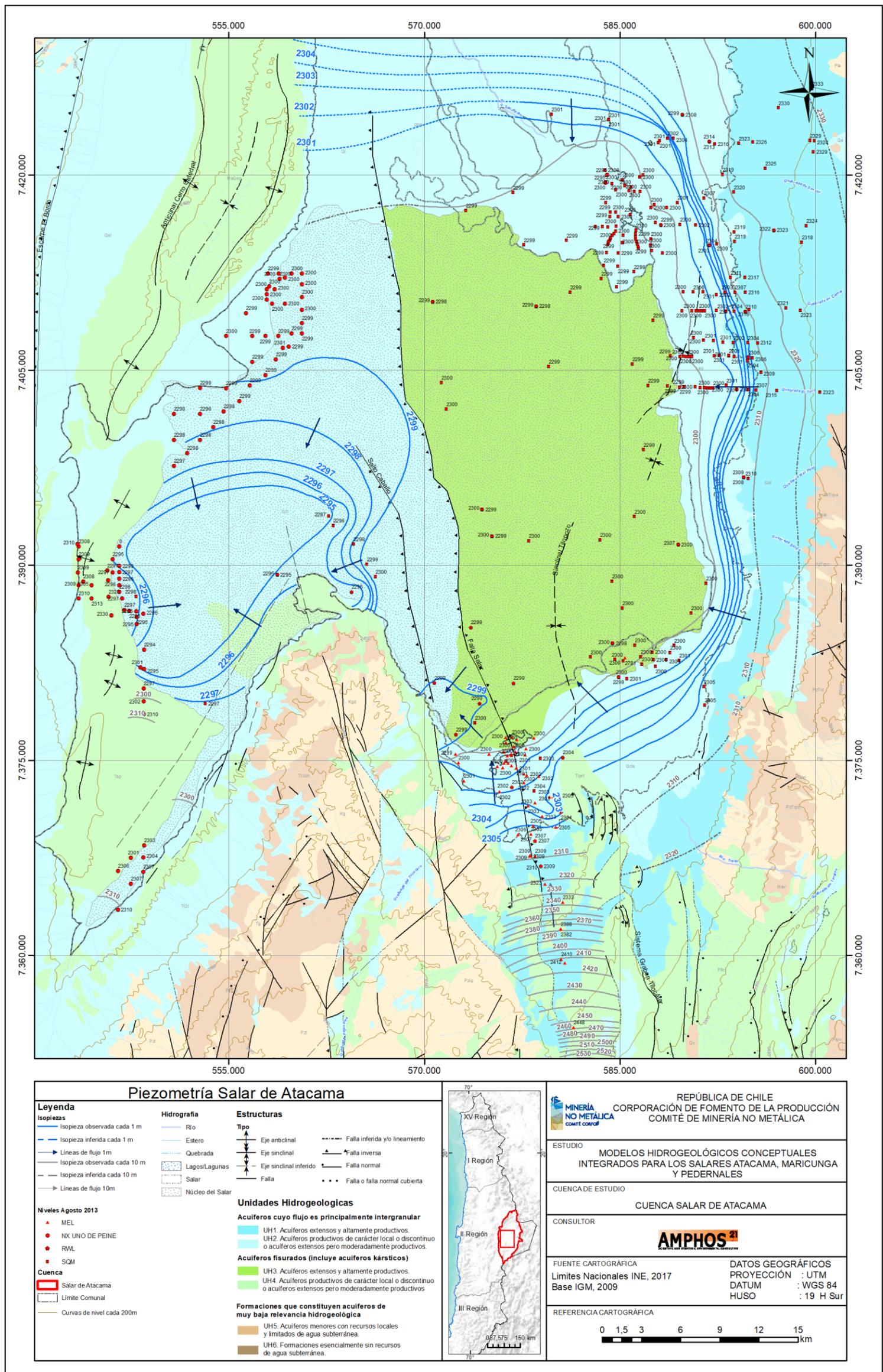


Figura 5-39: Mapa piezométrico del núcleo del Salar de Atacama y el acuífero del borde este (agosto de 2013). Equidistancia de 1 m.

Fuente: elaboración propia

En la Figura 5-40 y Figura 5-41 se presentan dos perfiles hidrogeológicos conceptuales los acuíferos definidos y el nivel piezométrico. La primera figura corresponde a un perfil este-oeste del Salar de Atacama, mientras que la segunda es un corte realizado en el acuífero MNT, de dirección sureste-noroeste.

- Perfil Hidrogeológico Conceptual Salar de Atacama: el perfil representa una sección este-oeste de 100 Km de longitud, representativa de la zona central de la cuenca. Está basado en el perfil sísmico 1g016 (Rubilar, 2015).

En la zona central del perfil se encuentra el núcleo del Salar de Atacama y la Zona Marginal, donde se encuentran los depósitos salinos evaporíticos holocenos que conforman acuíferos fisurados moderadamente productivos (UH 4). Esta unidad hidrogeológica presenta potencias cercanas a 1.100 m en la parte central, acuniéndose hasta 750 m en el margen oeste del núcleo y hasta 500 m en la Zona Marginal. Sobreyaciendo a la UH 4 y con una potencia próxima a los 50 m, las evaporitas conforman acuíferos moderadamente a altamente productivos. De esta forma, el núcleo occidental del Sistema de Falla Salar (SFS) se comporta como una UH 2, mientras que el oriental de la SFS corresponde a un acuífero kárstico UH 3. Al este de la Zona Marginal y desde la superficie con una potencia estimada de 600 m se encuentra el acuífero aluvial del borde este, que está formado por sedimentos detríticos holocenos, principalmente de grano grueso, que conforman la UH 1.

La base de las evaporitas del holoceno está en contacto con materiales del mioceno que son unidades hidrogeológicas esencialmente sin recursos de agua subterránea y por tanto UH 6.

En el oeste del perfil se representa la Cordillera de la Sal, el Llano de la Paciencia y la Cordillera Domeyko. Estas morfoestructuras están formadas en superficie por secuencias sedimentarias y volcanosedimentarias que van del Mioceno al Holoceno y conforman acuíferos UH 4 u UH 5. Estos materiales en profundidad pasan a acuíferos de menor potencial hidrogeológico y/o sin recursos hídricos asociados, formando las unidades hidrogeológicas UH 5 y UH 6. En la parte superficial del Llano de la Paciencia existe un acuífero aluvial de potencia desconocida ya que no existen sondajes, pero se estima que puede ser entre decimétrica a métrica, que se clasifica como unidad hidrogeológica UH 2.

El este del perfil discurre por la Cordillera Occidental y el Arco volcánico actual y está formado principalmente por secuencias volcánicas y volcanoclásticas que van del Paleozoico al Holoceno y por edificios volcánicos del Pleistoceno-Holoceno. Estos materiales se caracterizan por no contener recursos de agua y por tanto son clasificados como UH 6. En superficie se han definido algunos de estas secuencias volcanoclásticas como unidades hidrogeológicas UH 5.

Además, en el perfil se incluye el nivel piezométrico que es variable a lo largo de la cuenca. En el núcleo del salar se sitúa a 2 m de profundidad aproximadamente, llegando hasta los 150 m en la zona este del acuífero aluvial.

- Perfil Hidrogeológico Conceptual Acuífero Monturaqui-Negrillar-Tilopozo (MNT): este perfil tiene una extensión en dirección sureste-noroeste de aproximadamente 36 km y está situado en la zona sur del acuífero MNT y sigue el eje del mismo. Está basado en el perfil geológico A-A´ de Golder (2017).

A lo largo de todo el perfil se representa una potente capa de sedimentos detríticos de grano grueso, con moderada a nula consolidación, que corresponde a la formación Quebrada Salín y que tienen una edad comprendida entre el Mioceno-Plioceno. Sobreyaciendo a la formación Quebrada Salín se disponen materiales detríticos del Holoceno, tanto de tipo aluvial, como formados por la unidad Colapso Socompa. Entre todos conforman un acuífero detrítico moderadamente productivo UH 2, llamado acuífero MNT. Estos depósitos tienen, a lo largo del perfil, una potencia próxima a los 300 m, aunque aguas abajo aumenta hasta 450 m. Intercalados entre estos depósitos aparecen capas de varias decenas de metros de potencias formadas por ignimbritas y sedimentos finos que de menor permeabilidad (UH 5).

Subyaciendo a los materiales antes descritos, se encuentran secuencias volcánicas y sedimentarias paleozoicas y cretácicas que se caracterizan por no contener recursos de agua subterránea y por tanto, se incluyen en la unidad hidrogeológica UH 6, forman el basamento del acuífero.

Por último, coronando los altos topográficos, del perfil, se reconocen materiales volcánicos recientes que se caracterizan por no contener agua y como en el caso anterior, se pueden clasificar como unidad hidrogeológica UH 6.

En cuanto al nivel piezométrico se encuentra a una profundidad próxima a 100 m, a lo largo de todo el perfil, profundizando hasta casi 200 m en el extremo sur del perfil.

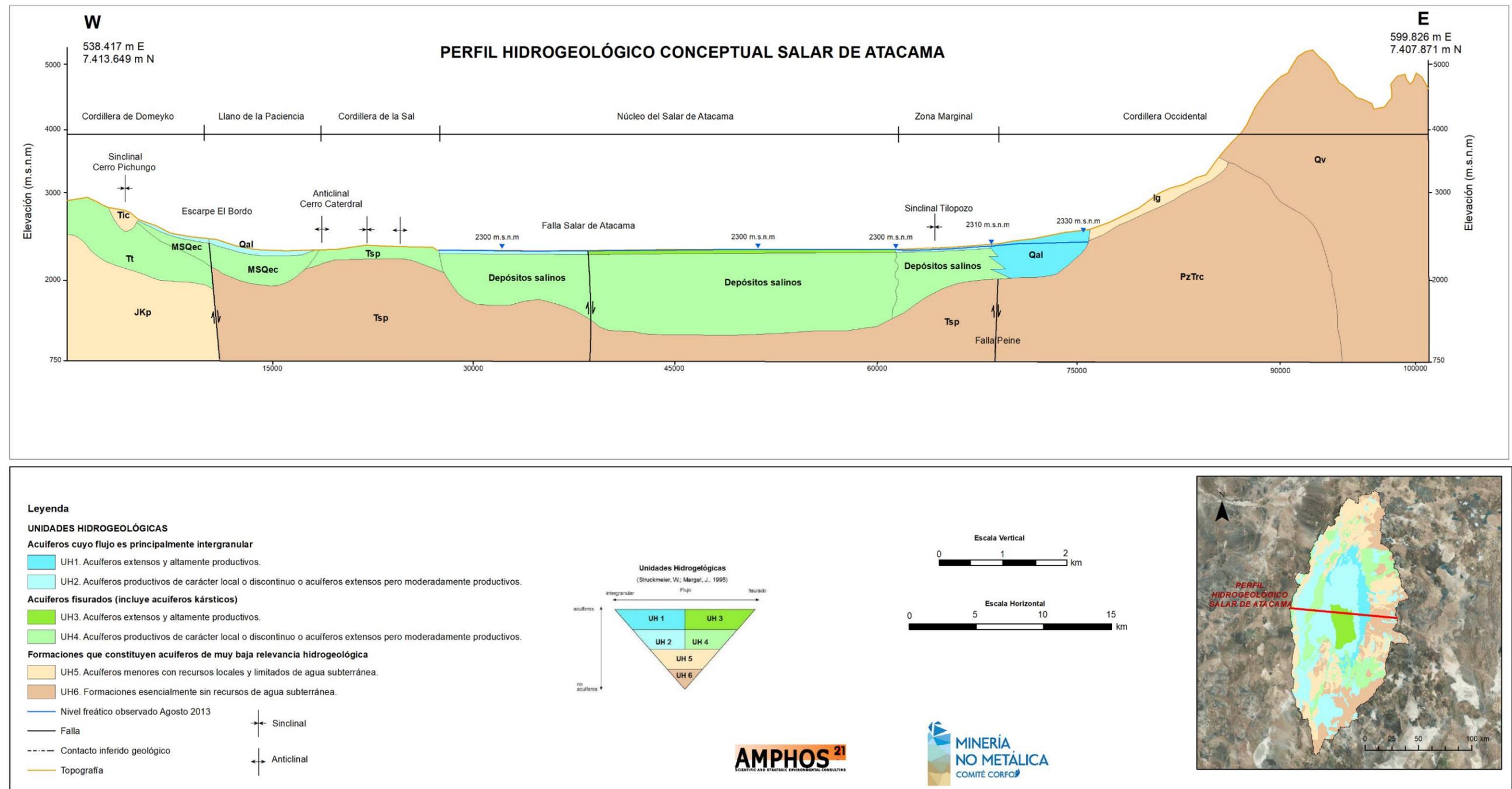


Figura 5-40. Perfil hidrogeológico conceptual de la cuenca de Salar de Atacama.

Fuente: elaboración propia.

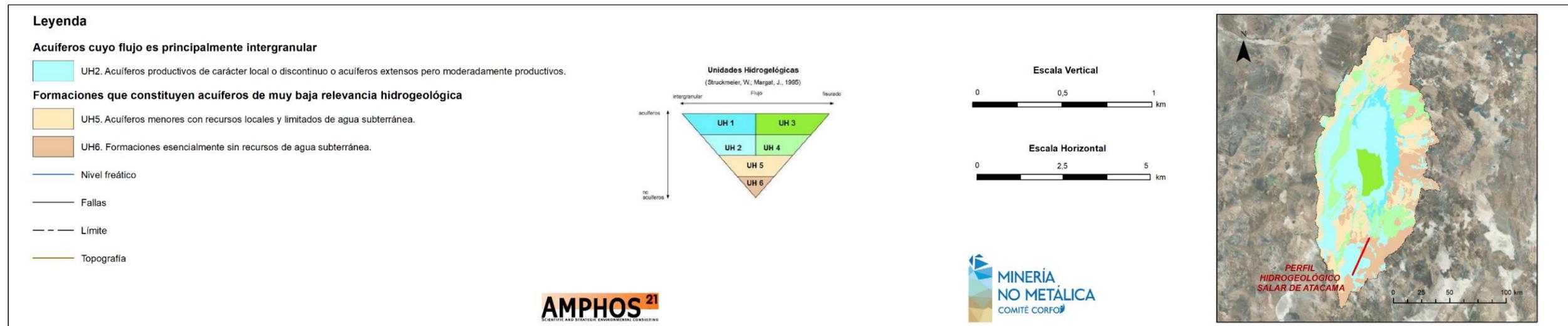
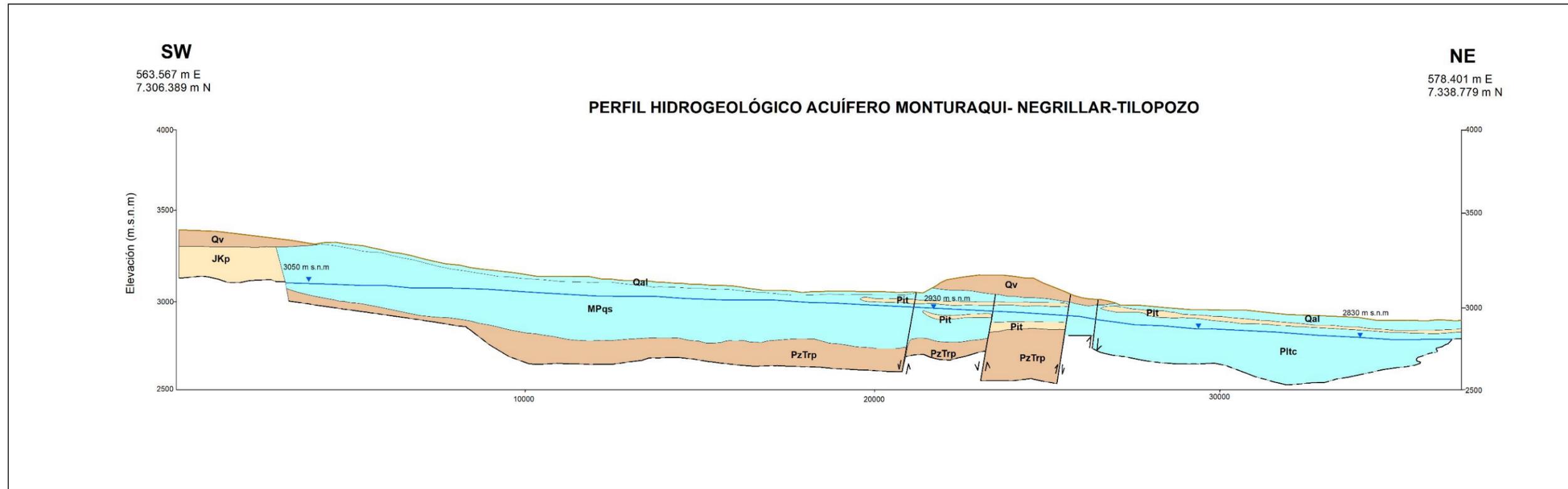


Figura 5-41. Perfil hidrogeológico conceptual del sector de Monturaqui Negrillar Tilopozo.

Fuente: Elaboración propia.

5.5 Funcionamiento de los sistemas lagunares

En el presente capítulo se detalla el funcionamiento de los principales sistemas lagunares del área de estudio: Lagunas La Punta – La Brava, Sistema Peine, Aguas de Quelana y Sistema Soncor.

La información se ha extraído principalmente de SGA (2015), cuyo estudio ha consistido en un reconocimiento de la estratigrafía, mediante la perforación de piezómetros someros y multipiezómetros, análisis hidroquímico e isotópico, perfiles de conductividad eléctrica en pozos, así como medición de las superficies lagunares, tratamiento de imágenes satelitales LANDSAT y análisis de antecedentes previos.

Los sistemas lagunares anteriormente nombrados se encuentran todos ellos en la zona marginal. En la zona marginal se encuentra la transición entre el acuífero de salmuera (núcleo de halita) y los acuíferos de agua dulce-salobre (Acuífero aluvial y acuífero de MNT). En dicha zona de contacto se produce una interfaz o cuña salina debido al contraste de densidad entre ambos fluidos. La salmuera se mantiene en profundidad porque es más densa que el agua dulce-salobre y sobre ésta se produce una zona la mezcla entre la salmuera y el agua dulce-salobre.

El nivel piezométrico en la zona marginal se encuentra somero e incluso puede llegar a aflorar debido al cambio topográfico existente entre la zona marginal (relativamente llana) y el borde este-sur (sector con mayor pendiente que la zona marginal) y al contraste de densidad entre la salmuera y el agua dulce-salobre.

En la zona marginal se produce una intensa evaporación de la superficie freática y de la lámina libre de agua, debido a que el nivel de agua se encuentra cerca de la superficie topográfica e incluso aflora. Los sistemas lagunares que se forman en la zona marginal se forman generalmente cuando el caudal de agua subterránea que se descarga en superficie es mayor que la evaporación. Cabe destacar que en la zona marginal también se forman vega, como las vegas de Tilopozo en el sistema de lagunas La Punta- La Brava).

5.5.1 Lagunas del sistema La Punta-La Brava

Las Lagunas de La Punta y La Brava se comunican directamente entre ellas a través de un canal natural de ancho variable situado entre los puntos B y D (Figura 5-42).

El nivel de agua en las lagunas, así como el nivel freático en los pozos de monitoreo de alrededor de éstas, presentan variaciones cíclicas del nivel controladas por la evaporación y no están afectados por el descenso del nivel piezométrico observado en los bordes del núcleo del salar (ver capítulo 5.4.2), ya que no se observan tendencias de descenso del nivel de agua. Adicionalmente SGA (2015) ha concluido que existe una dirección de flujo desde el NE y SE (Figura 5-42), correspondientes a las áreas donde se produce la recarga de las lagunas. Tanto las aguas superficiales de las lagunas

como las subterráneas son de facies tipo clorurada y/o sulfatada sódica y además, el $\delta^{18}O$ del acuífero de Monturaqui-Negrillar es similar al de las áreas de recarga de las lagunas (ver puntos Laguna La Brava Punto C y TPZ-7S o P-05) (Figura 5-43)

De esta forma, se concluye que el sistema de lagunas La Punta-La Brava se recarga de manera continua por el acuífero dulce-salobre (Acuífero MNT) y que existe un nivel de rebalse que provoca que los niveles se mantengan relativamente estables. En menor medida, la recarga de las lagunas también se produce desde el Cordón de Lila.

En las inmediaciones de las lagunas se producen descargas del nivel de agua que pueden alimentar las lagunas (surgencias) (Figura 5-44) o el agua puede acumularse, retenerse y evaporarse.

Ocasionalmente se produce un mayor caudal de entrada a las lagunas, después de períodos húmedos y coincidiendo con la época invernal, lo que produce flujos sub-superficiales hacia el Núcleo que alcanzan el límite con la costra de cloruros formando los “open pools”, donde se evapora y disuelve la costra, enriqueciéndose en sales disueltas, convirtiéndose finalmente en salmuera (SGA, 2015).

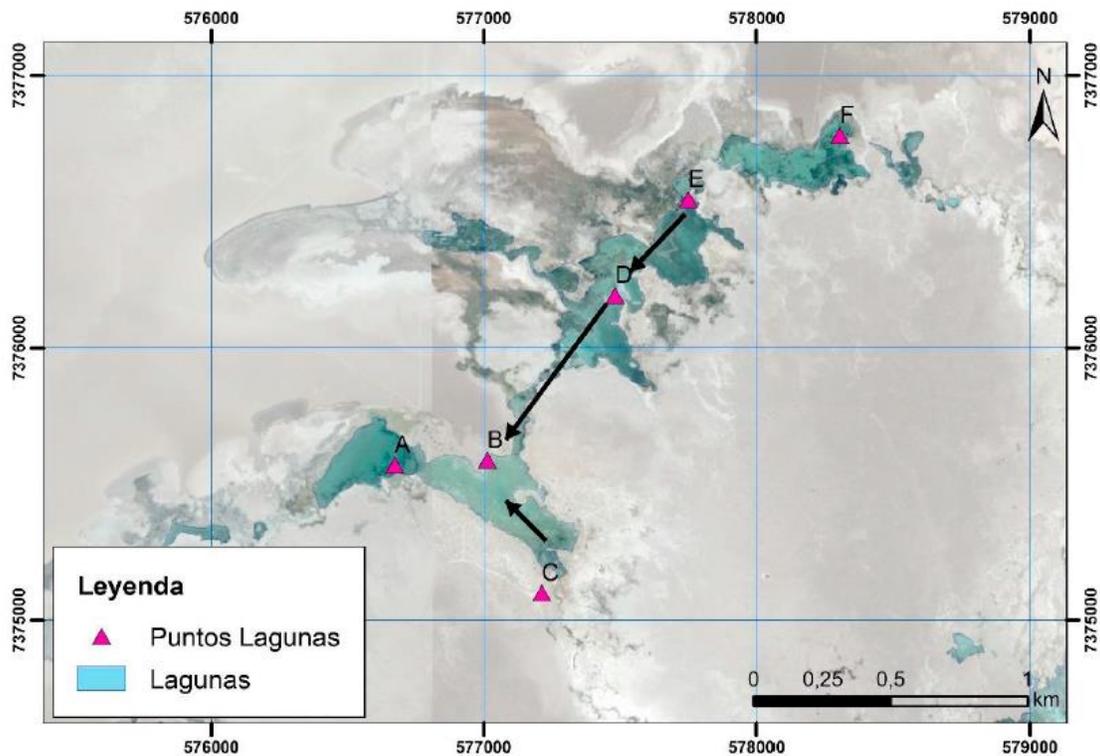


Figura 5-42: Situación de las regilllas de las lagunas La Punta-La Brava.

Fuente: extraído de SGA (2015).

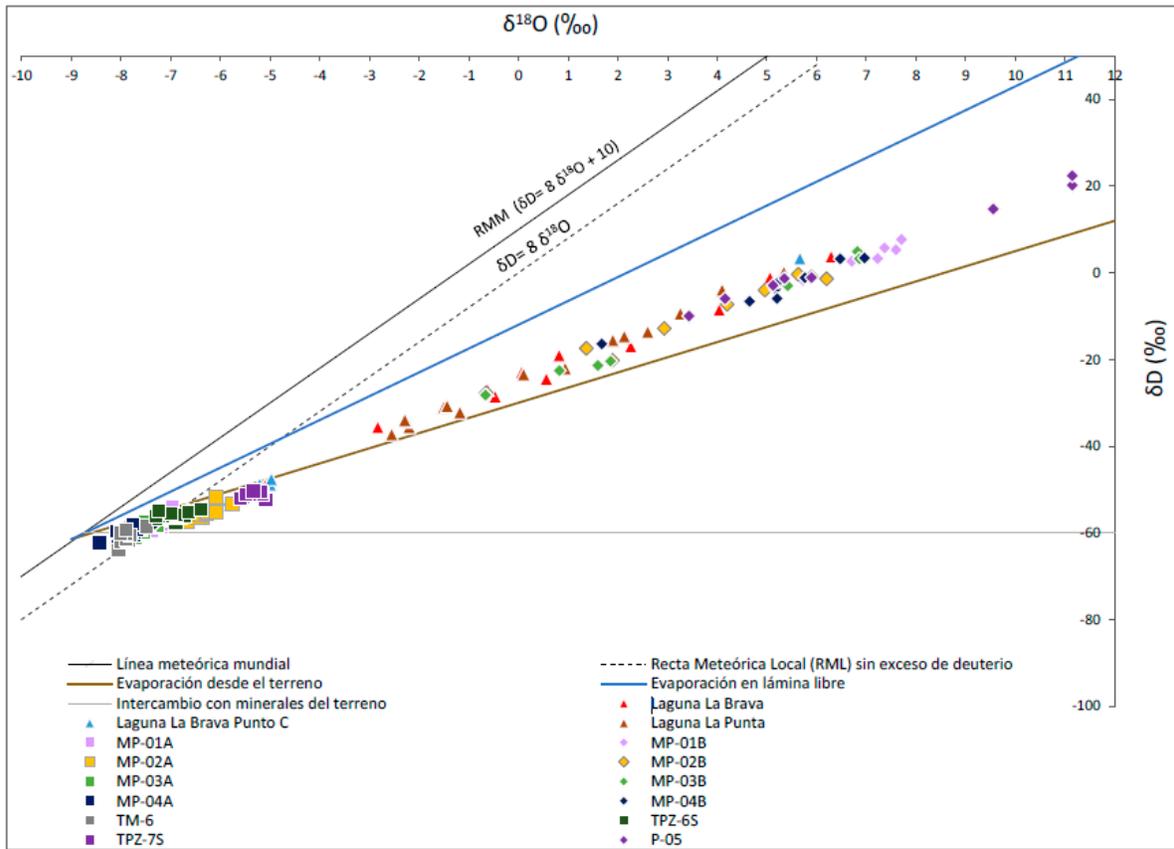


Figura 5-43: Análisis isotópico del sistema de las lagunas La Punta-La Brava.

Fuente: extraído de SGA (2015).

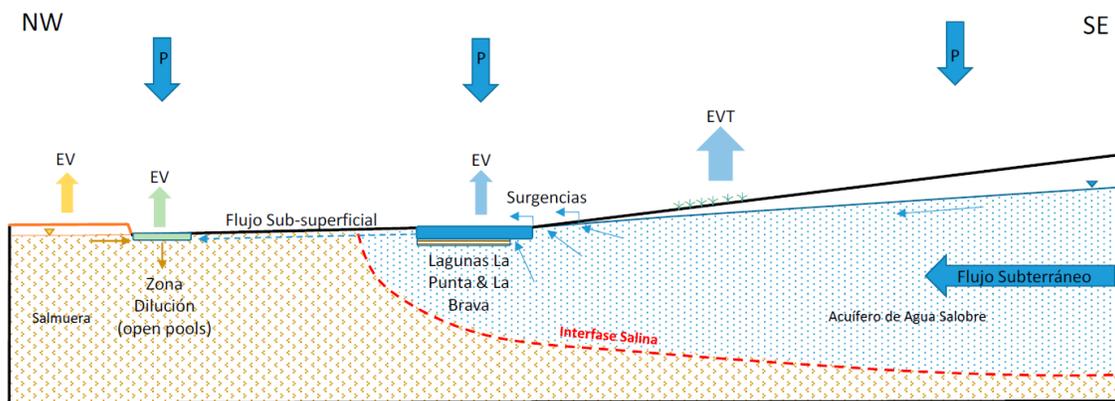


Figura 5-44: Modelo conceptual del funcionamiento de las lagunas del sistema La Punta-La Brava.

Fuente: extraído de SGA (2015).

5.5.2 Lagunas del sistema Peine

El sistema lagunar Peine, también denominado sistema Salada-Saladita está compuesto por las Lagunas Salada, Saladita e Interna Figura 5-45. Las lagunas Salada y Saladita se ubican en la zona marginal, mientras que la Laguna Interna se ubica en el núcleo.

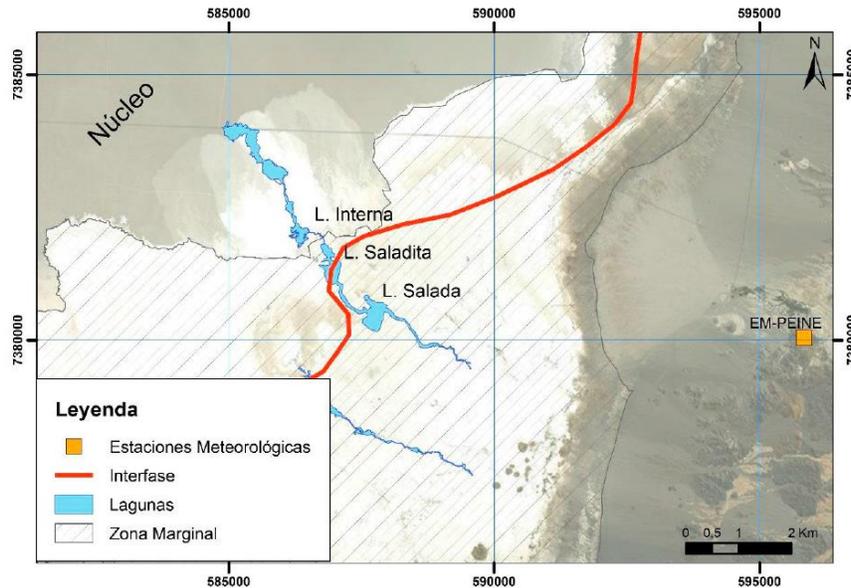


Figura 5-45: Mapa de ubicación de las lagunas del Sistema Peine.

Fuente: extraído de SGA (2015).

La recarga de las lagunas de este sistema se produce principalmente por agua subterránea proveniente del sureste, relativamente poco mineralizada y de contenido isotópico más ligero que las aguas del núcleo del salar. El agua subterránea forma una surgencia (manantial) en el punto donde el nivel freático del acuífero de agua dulce-salobre intercepta la superficie topográfica (Figura 5-46). Dichas surgencias ocurren a lo largo de 2 km hacia el sur de la Laguna Salada. El agua subterránea que aflora discurre superficialmente y forma un canal natural hasta llegar a la Laguna Salada.

El agua acumulada de la Laguna Salada se traspasa naturalmente hacia la Saladita y finalmente hacia la Laguna Interna, mediante canales de ancho variable y muy poco espesor de lámina de agua. Durante este trayecto el agua de las lagunas sufre procesos de evaporación. A partir del balance hídrico realizado por SGA (2015) de dicho sistema, se ha cuantificado que las aguas de la laguna Interna se infiltran al núcleo del salar (alrededor de 5,70 l/s).

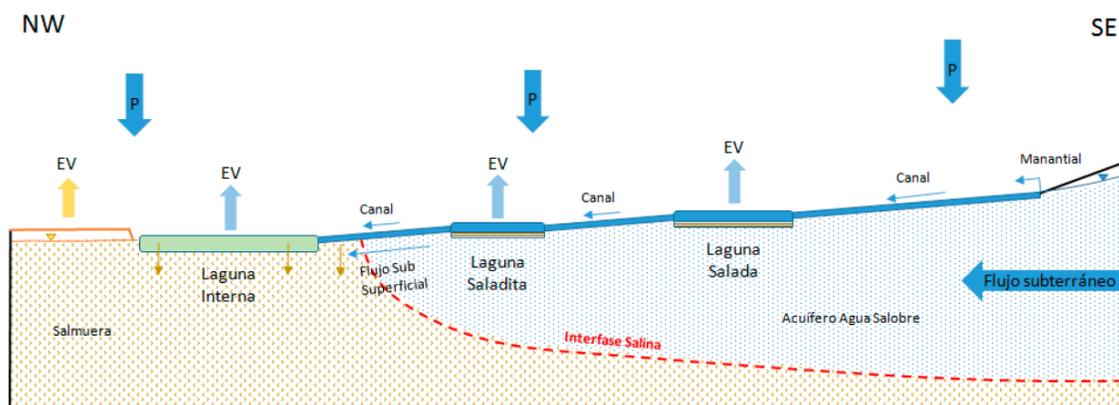


Figura 5-46: Modelo conceptual del funcionamiento de las lagunas del sistema Peine.

Fuente: extraído de SGA (2015).

SGA (2015) ha interpretado la interfase salina mediante geofísica y monitoreo de conductividad eléctrica de las aguas subterráneas, entre la Laguna Interna y la Laguna Saladita.

Finalmente, SGA (2015) concluye que a partir del análisis de los niveles de aguas subterráneas a un lado y otro de la interfase, se puede afirmar que no se observa relación entre la evolución de los niveles del acuífero y de las lagunas del Sistema Peine, con la evolución de los de la salmuera del núcleo. Esto indica que el acuífero de agua salobre y las lagunas situadas sobre el mismo, están desconectadas de la salmuera del Núcleo de manera subterránea, siendo su única conexión los canales que conectan la Laguna Saladita con la Laguna Interna.

5.5.3 Aguas de Quelana

Este sistema lagunar se sitúa sobre la zona marginal en el este del Salar de Atacama y está conformado por un conjunto de lagunas de poca profundidad, situadas al pie de los depósitos aluviales que conectan con las Quebradas de Camar y El Toro (Figura 5-47).

Según el análisis que realiza SGA (2015), la entrada de agua a las lagunas del Sistema Aguas de Quelana, se produce a través de afloramientos situados al este de las mismas, en cuyos alrededores se desarrolla vegetación.

En este sistema no se aprecia la presencia de canales que alimenten los cuerpos de agua, a diferencia de lo que sucede en los sistemas Peine y Soncor. Esto estaría indicando que las surgencias de agua subterránea se producen en las mismas lagunas o muy cerca de ellas.

Teniendo en cuenta la información analizada se puede afirmar que el funcionamiento hidrogeológico del Sistema Aguas de Quelana es similar al del sistema de La Punta y La Brava.

Las lagunas de este sistema son alimentadas por aguas subterráneas del acuífero aluvial del borde Este, que a su vez es alimentado por las quebradas de Camar, Cucala y El Toro (Figura 5-48).

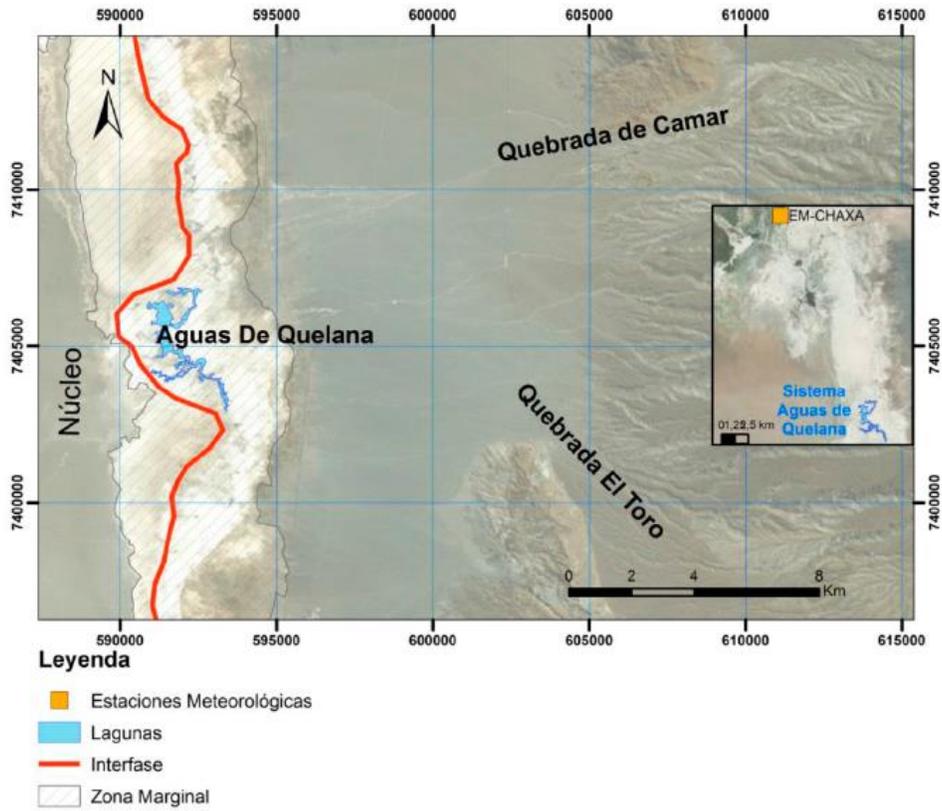


Figura 5-47: Mapa de ubicación de las lagunas del sistema Aguas de Quelana.

Fuente: extraído de SGA (2015).

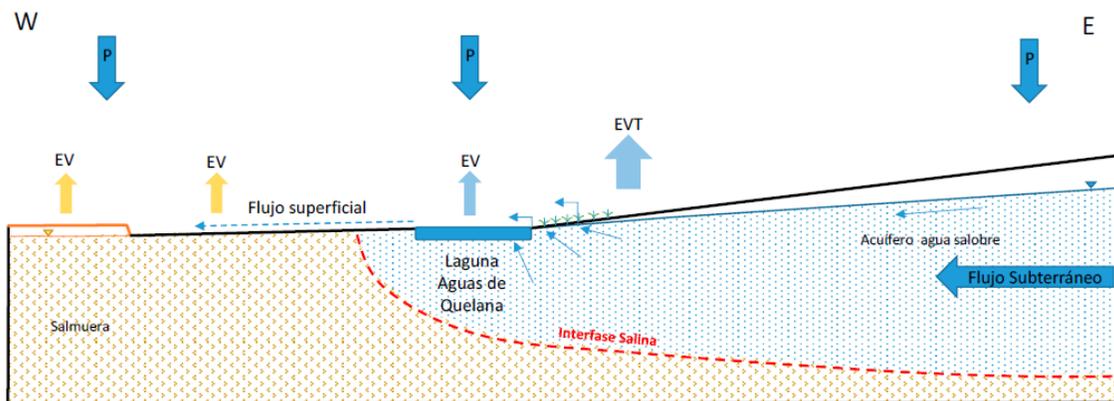


Figura 5-48: Modelo conceptual del funcionamiento de las lagunas del sistema Aguas de Quelana.

Fuente: extraído de SGA (2015).

5.5.4 Lagunas del sistema Soncor

El Sistema Soncor se sitúa en la el sector Norte de la Zona Marginal del Salar de Atacama, al Sureste del delta del río San Pedro.

Se compone de las lagunas de Chaxa, Barros Negros y Puilar, cuya ubicación se aprecia en Figura 5-49. La Laguna Chaxa se alimenta desde el Norte a través del Canal del Burro Muerto y descarga hacia el Sur por otro canal, hacia la Laguna de Barros Negros.

Las lagunas de Barros Negros y Chaxa se sitúan sobre el acuífero de salmuera, mientras que la Laguna Puilar está en las proximidades de la interfase salina, que en esta zona se dispone en dirección norte-sur, perpendicular a la dirección de los flujos de entrada de agua salobre desde los depósitos aluviales del borde este del Salar (SGA, 2015).

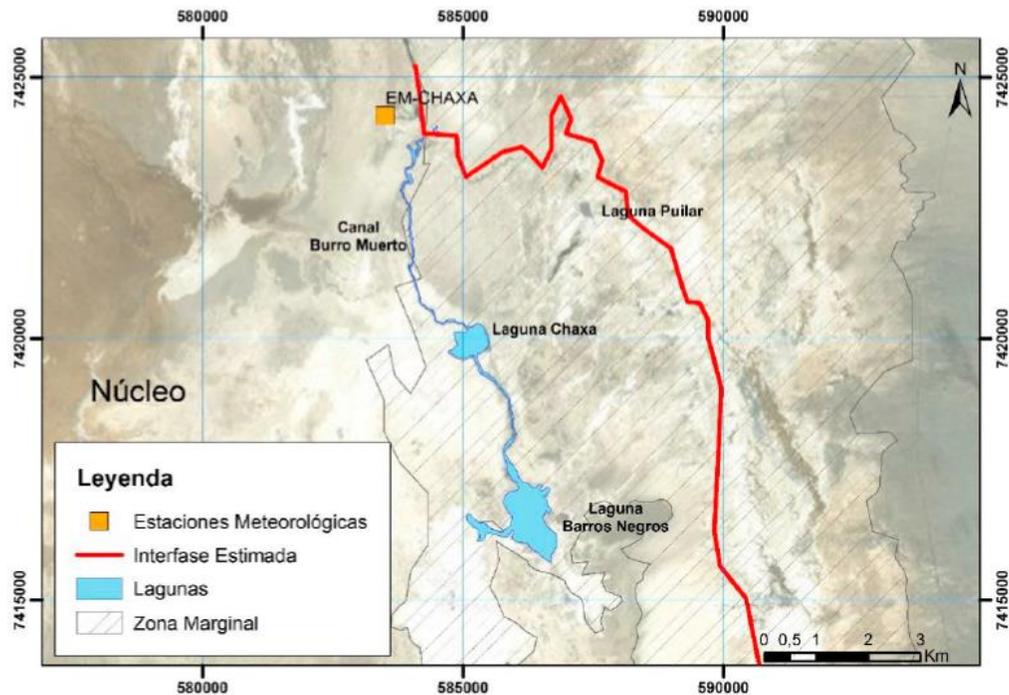


Figura 5-49: Mapa de ubicación de las lagunas del sistema Soncor.

Fuente: extraído de SGA (2015).

La piezometría del Sistema Soncor realizada por Salas et al., (2010) muestra como recibe la recarga subterránea de la zona aluvial situada al este y al noreste de las lagunas.

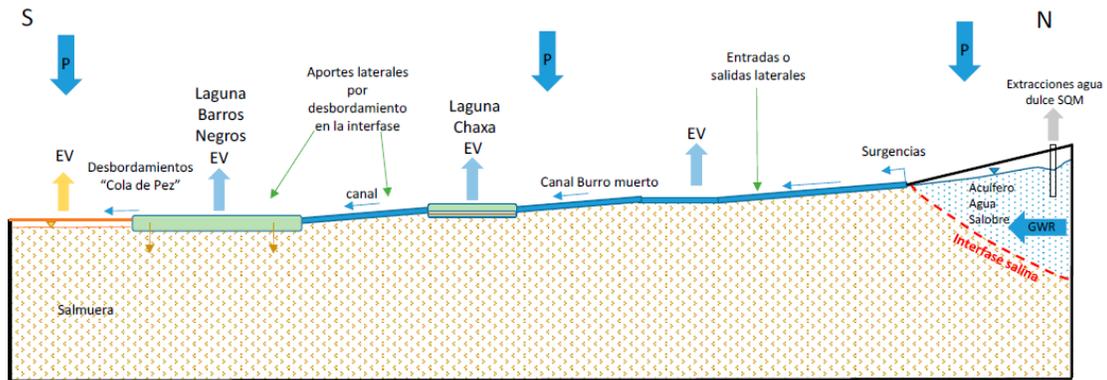


Figura 5-50: Modelo conceptual del funcionamiento de las lagunas del sistema Soncor.

Fuente: extraído de SGA (2015).

Según las conclusiones extraídas por SGA (2015) las lagunas de este sistema son alimentadas por agua subterránea que ingresa al sistema proveniente de los acuíferos situados al Norte y Este. En la zona donde la interfase salina intercepta con el terreno se producen desbordamientos del agua que fluye hacia el Oeste de manera superficial y subsuperficial. La mayor parte de estos flujos se concentra en el canal de Burro Muerto que acaba desembocando en la Laguna Chaxa, mientras otros desbordamientos alcanzan el canal que une la Laguna Chaxa con la Laguna Barros Negros y la propia Laguna de Barros Negros.

Una vez alcanza los canales mencionados, el agua fluye en dirección Sur y comienza a sufrir proceso de evaporación, pasando primero por la Laguna Chaxa, después Barros Negros, y finalmente termina saliendo del Sistema por la zona de desbordamiento "Cola de Pez" e infiltrándose en el Núcleo (Figura 5-50).

5.6 Volumen de almacenamiento

En base al Modelo Hidrogeológico Conceptual elaborado en el área de estudio se ha estimado el volumen de agua almacenada en cada acuífero identificado (VA_i) y posteriormente, se ha obtenido el volumen total de agua almacenada en la cuenca (VT), a partir de la suma del volumen de agua almacenada en cada acuífero. De esta forma, el cálculo del volumen de agua en la cuenca se ha realizado mediante la siguiente ecuación:

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

El volumen de agua en el acuífero se ha obtenido mediante el volumen obtenido en el modelo 3D Leapfrog (ver capítulo 5.3.3) bajo el nivel piezométrico (espesor saturado) y se ha multiplicado dicho volumen por el coeficiente de almacenamiento o porosidad efectiva asociado, según si el acuífero es libre o confinado (S_i) (capítulo 5.1). En la Tabla 5-16 se muestra el volumen de cada sistema acuífero y el valor de porosidad o coeficiente de almacenamiento utilizado para el cálculo.

El volumen almacenado en la cuenca estaría comprendido entre 33.400 y 64.000 hm³ (Tabla 5-16), según se utilicen los valores mínimos o máximos de porosidad/coeficiente de almacenamiento, respectivamente. Los valores de porosidad efectiva son aproximados y se han establecido rangos para observar las posibles variaciones del volumen almacenado. En futuros estudios se recomienda ajustar dichos cálculos con nuevas mediciones.

Acuíferos	Volumen (VA) (hm ³)	Coeficiente de almacenamiento (S)/ porosidad efectiva		Volumen de almacenamiento (hm ³)	
		Mín.	Max.	Mín.	Max.
Acuífero aluvial borde este + aluvial borde norte	209.410	0,08	0,12	16.753	25.129
Acuífero Monturaqui-Negrillar-Tilopozo (MNT) + aluvial borde sur	72.279	0,08	0,15	5.782	10.842
Acuífero superficial Salar de Atacama	100.490	0,05	0,09	5.023	9.041
Acuífero intermedio Salar de Atacama	281.970	0,02	0,06	5.639	16.918
Acuífero profundo Salar de Atacama	1.959.100	0,0001	0,001	196	1.959
Volumen total en la cuenca (VT)				33.395	63.892

Tabla 5-16: Cálculo de volumen de almacenamiento.

Fuente: elaboración propia

6. Hidrogeoquímica e isótopos

En este capítulo se presenta el estudio hidroquímico e isotópico de la cuenca del Salar de Atacama.

6.1 Información disponible

Para la caracterización hidroquímica e isotópica de la cuenca Salar de Atacama se ha recopilado información de distintas fuentes, con lo cual se ha realizado una base de datos con un total de 245 puntos y 1289 analíticas (ver BBDD Hidroquímica en Anexo I). Los estudios revisados y la información disponible en cada uno de ellos, se detalla en el capítulo 2.7, 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 8 sectores, los cuales se describen en el Capítulo 5, del presente informe, y se muestran en la Figura 6-2 : Sector Cordillera, Borde Este, Zona Norte, Zona Noroeste, Cordón de Lila, Acuífero MNT, Zona Marginal y Núcleo del salar.

Por otro lado, se ha definido un noveno sector, denominada Fuera de Cuenca, que corresponde a la situación de todos aquellos puntos recopilados que se localizan fuera del área de la cuenca del Salar

de Atacama, pero próximos, totalizando 405 analíticas. Corresponden a puntos muestreados en el estudio de Risacher et al. (1999) en la II Región y no fueron considerados para los análisis de este informe, a excepción de las muestras de nieve y lluvia recolectadas debido a su importancia para la caracterización del agua de recarga.

Por último, en la base de datos de hidroquímica (ver BBDD Hidroquímica en Anexo I).se muestra, para cada punto la siguiente información:

- Ubicación: coordenada, fechas de monitoreo tipo y subtipo de punto al cual fue clasificado y el sector donde se emplaza.
- Parámetros físicos: temperatura, pH, Eh, Ce, salinidad, sólidos totales, alcalinidad, dureza, oxígeno disuelto, entre otros.
- Concentraciones de cationes y aniones disueltos y totales y por último el balance iónico calculado en porcentaje.

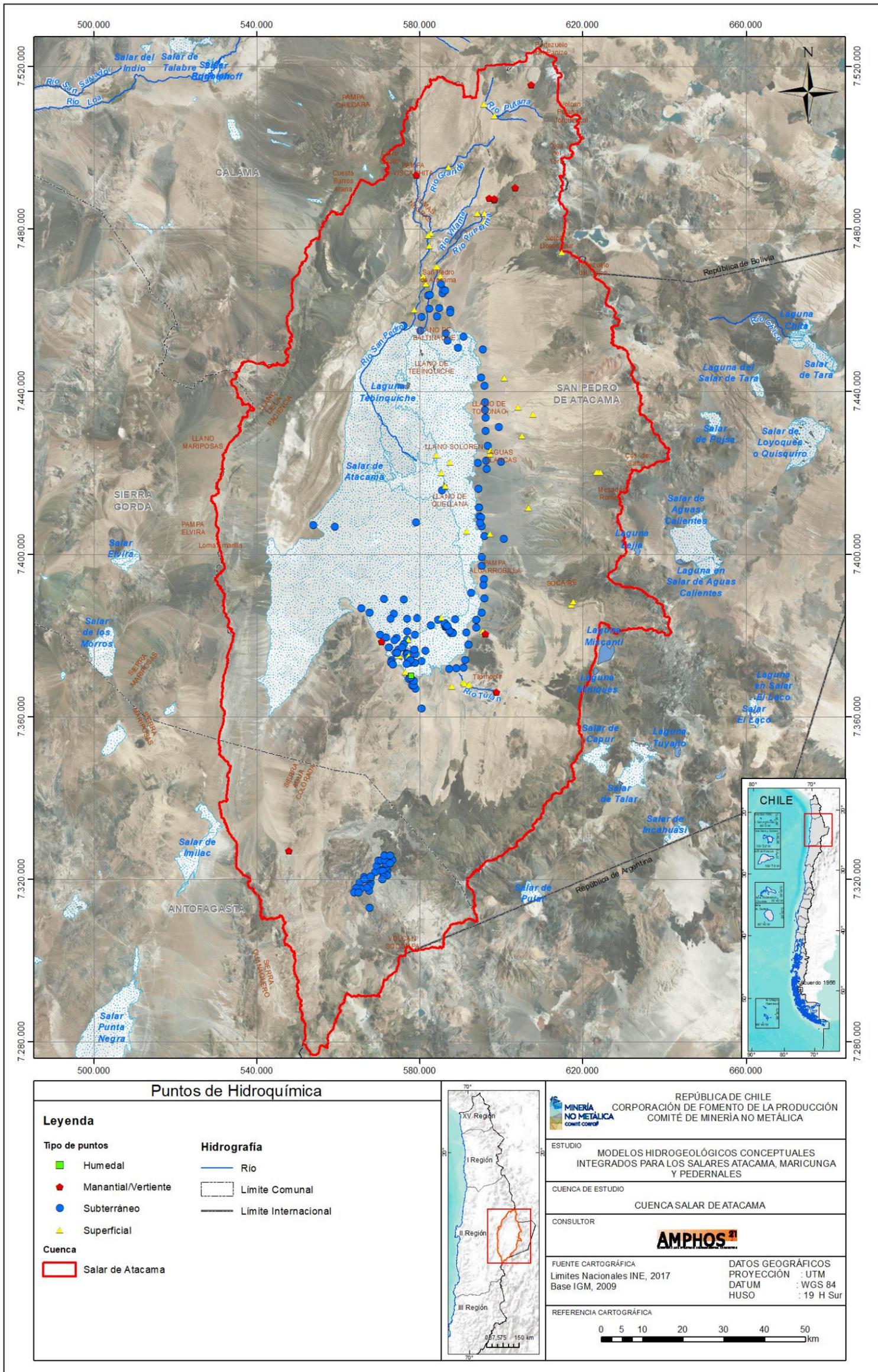


Figura 6-1: Tipos de Punto con datos de hidroquímica.
Fuente: elaboración propia a partir de información de terceros.

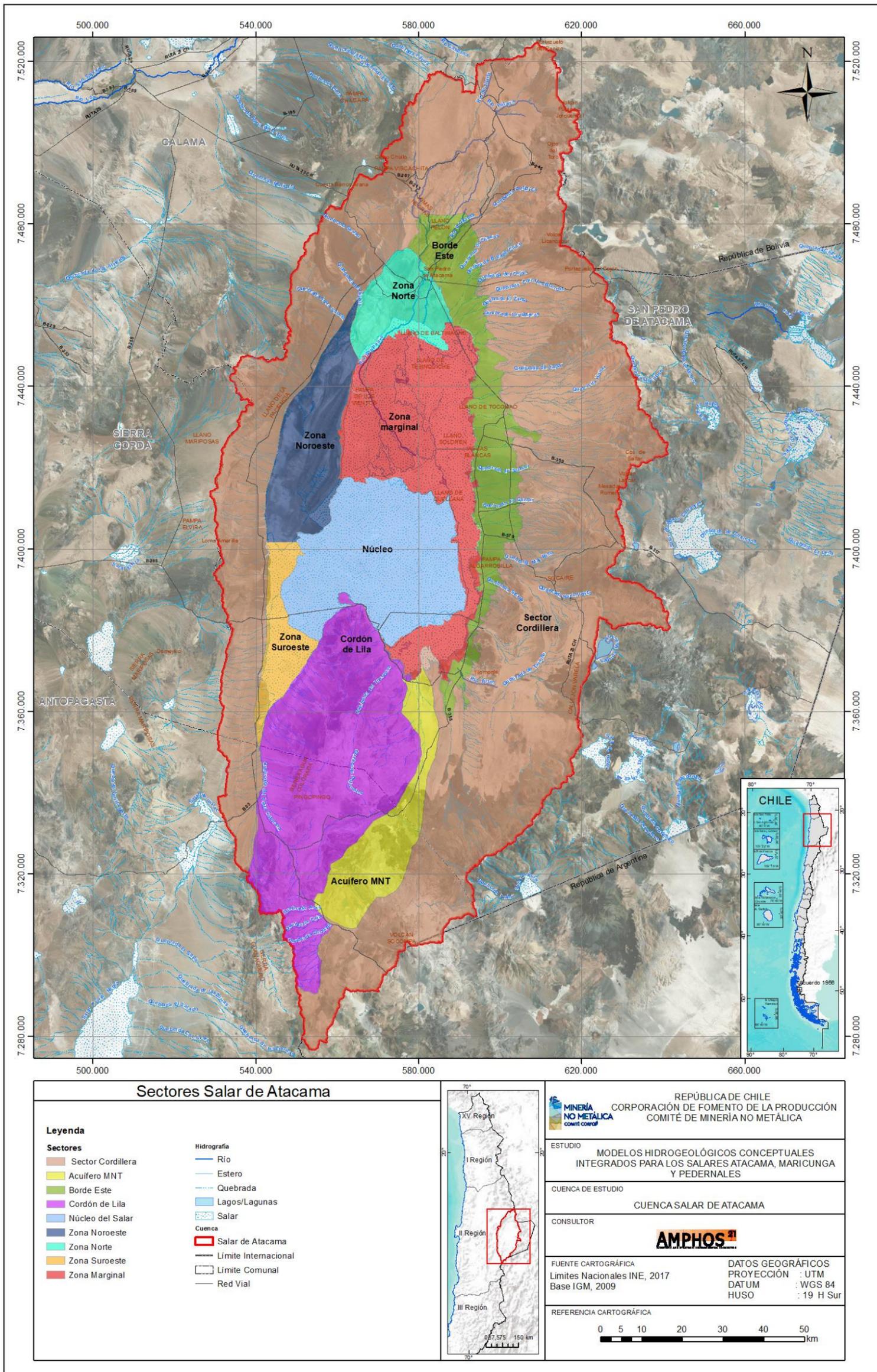


Figura 6-2: Sectorización Hidroquímica.

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 y totales) que se han tenido en cuenta son Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , B^{3+} , Al^{3+} , Fe^{2+} , Mn^{2+} , Cu^{2+} y Zn^{2+} , mientras que los aniones (disueltos) son: SO_4^{2-} , Cl^- , HCO_3^- , CO_3^{2-} , NO_3^- , NO_2^- , F^- , Br^- y 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.

De esta manera y considerando que el total de analíticas con BI fuera de rango es de 318, se admitieron 27 muestras de este grupo debido a la similitud con analíticas previas del mismo punto, a que presentaban la todos los componentes mayoritarios y poseían un error <20%.

Por otra parte, cabe mencionar que existen 68 muestras que presentan un BI dentro del rango admitido; sin embargo, no contienen la analítica completa de los elementos mayoritarios. El error de balance dentro del rango es solamente una coincidencia de cálculo para estas muestras, por lo que se han clasificado como no admitidas y no pueden utilizarse para la caracterización de facies mediante diagramas Piper.

Finalmente y luego de la validación de datos antes mencionada, se cuenta con un total de 930 analíticas para ser procesadas y analizadas en los siguientes capítulos.

6.4 Parámetros físico-químicos

Atendiendo a la temperatura, se tienen registros desde 1959 hasta 2014, obteniéndose una temperatura promedio de 18,8°C. Se observa que el promedio es superior en los puntos de tipo subterráneo, humedal y manantial que son próximos a 20°C, mientras que la temperatura promedio en los puntos de tipo subterráneo es de 16.3°C.

Las temperaturas mínimas registradas en las aguas de la zona de estudio, están comprendidas entre 0°C y 2°C y corresponden a muestras superficiales, tomadas en junio 1993, en el río Puripica, en el río Putana y en el río San Pedro. En este último punto, también se midió una temperatura cercana a 0°C en junio de 2011. Todos estos ríos se sitúan en la zona norte de la cuenca.

Por su parte, las máximas temperaturas corresponden al pozo M-24 y fue de 36°C, tomada en febrero de 1993. Este pozo está situado en el Sector de Monturaqui, y la temperatura fue tomada a una profundidad próxima a los 125 m (en los pozos próximos también se registran temperaturas superiores a 30°C). También se registraron temperaturas próximas a los 35°C en el manantial termal corriente Puritama, en junio de 2013, y en la laguna Aguas de Quelana, en enero de 2014; encontrándose ambas en la zona norte de la cuenca.

En cuanto al pH, se tienen registros desde 1966 hasta 2014. Estas medidas se han realizado tanto en terreno, como en laboratorio, con rangos que varían entre 6,5 y 8,8, siendo el promedio de 7,5.

El valor promedio de las aguas superficiales corresponde a un pH de 8,0, que es unas décimas superior al promedio de las aguas subterráneas, que es de 7,3, de los manantiales que es de 7,6 o de los humedales que es de 7,0. Cabe mencionar que todos los registros corresponden al rango de pH neutro.

Si atendemos a la conductividad eléctrica (CE) se observa que se tienen registros desde 1963 a 2008. Ésta depende directamente de la concentración de sólidos disueltos en el agua (TSD). Estos parámetros muestran una amplia diversidad de valores desde 259 $\mu\text{S}/\text{cm}$ hasta 658.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, reflejando la heterogeneidad de los valores y sectores muestreados, tal como se observa en la

Figura 6-4. Los valores más bajos ($< 1.500 \mu\text{S}/\text{cm}$) se han medido en puntos superficiales próximos a San Pedro de Atacama y en aguas subterráneas al sur del acuífero de MNT. Los valores de CE entre 1.501 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 4.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ se han registrado, principalmente, aguas abajo de los valores anteriores. Por otro lado, los valores entre 4.001 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 10.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, se disponen principalmente en la zona marginal sureste y fueron detectados en puntos subterráneos. Los valores por encima de 10.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ se midieron tanto en la zona marginal, como en el núcleo del salar, incluso en estas zonas, el 2% de los registrados son valores superiores a 250.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Por tanto, se puede concluir que tanto el núcleo del salar, como la zona marginal tienen valores de conductividad eléctrica

similares y muy altos. Cabe mencionar que los manantiales (zona de cordillera) tienen una CE entre 4.000 y 6.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

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. Así las aguas de la zona de la Cordillera y del acuífero MNT, que se disponen en las cotas más elevadas, presentan la menor concentración de sólidos disueltos. A medida que desciende la cota y, de manera convergente, al núcleo del salar, las aguas se van enriqueciendo en sólidos disueltos, tal como indican los registros del borde este y la zona marginal. Todas estas aguas con concentraciones medias descargan en el núcleo del salar (depocentro), donde aumentan, hasta valores $>250.000 \mu\text{S}/\text{cm}$, indicando procesos reiterativos de evaporación y reconcentración mineral.

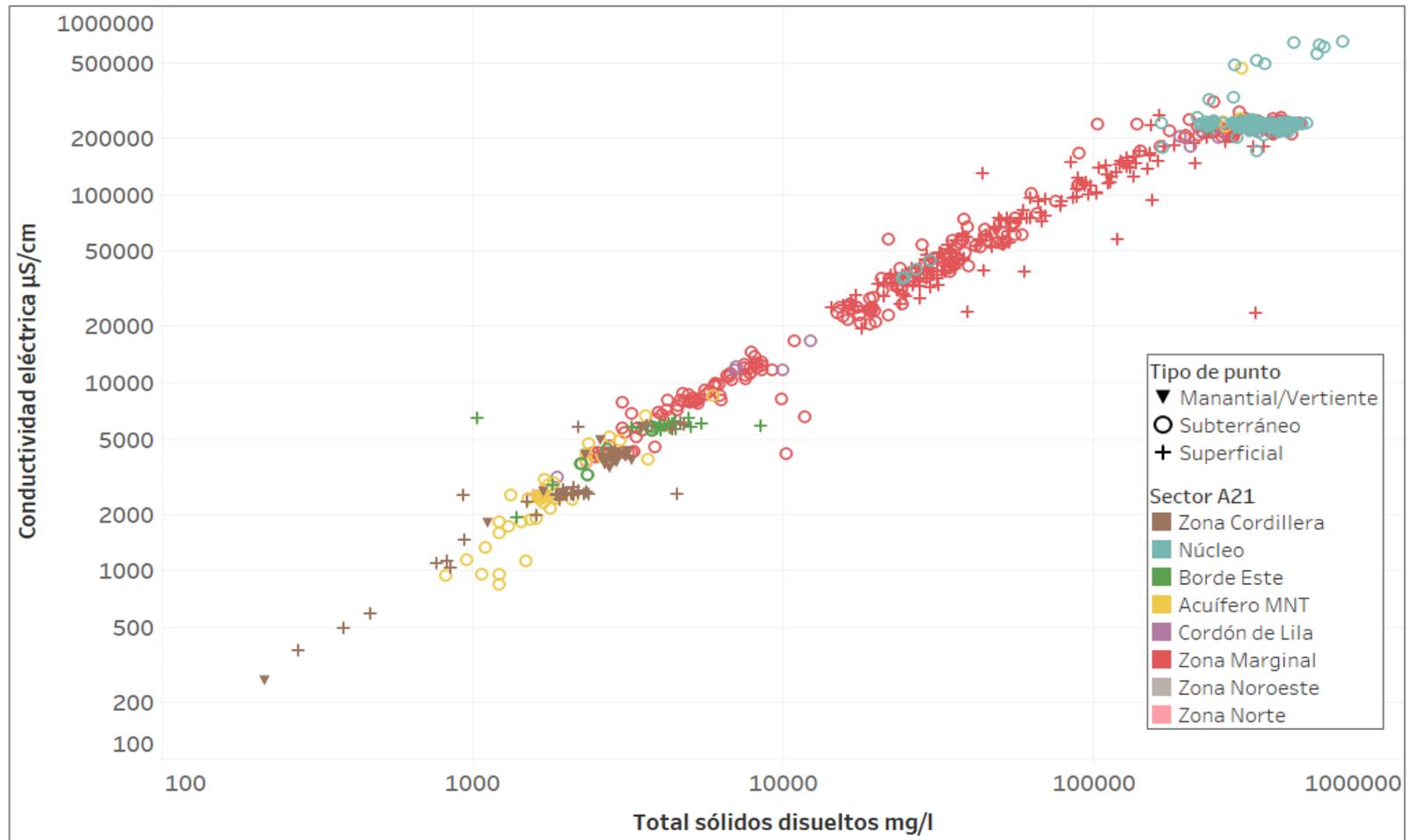


Figura 6-3: Relación entre la CE y TDS.

Fuente: elaboración propia a partir de información de terceros.

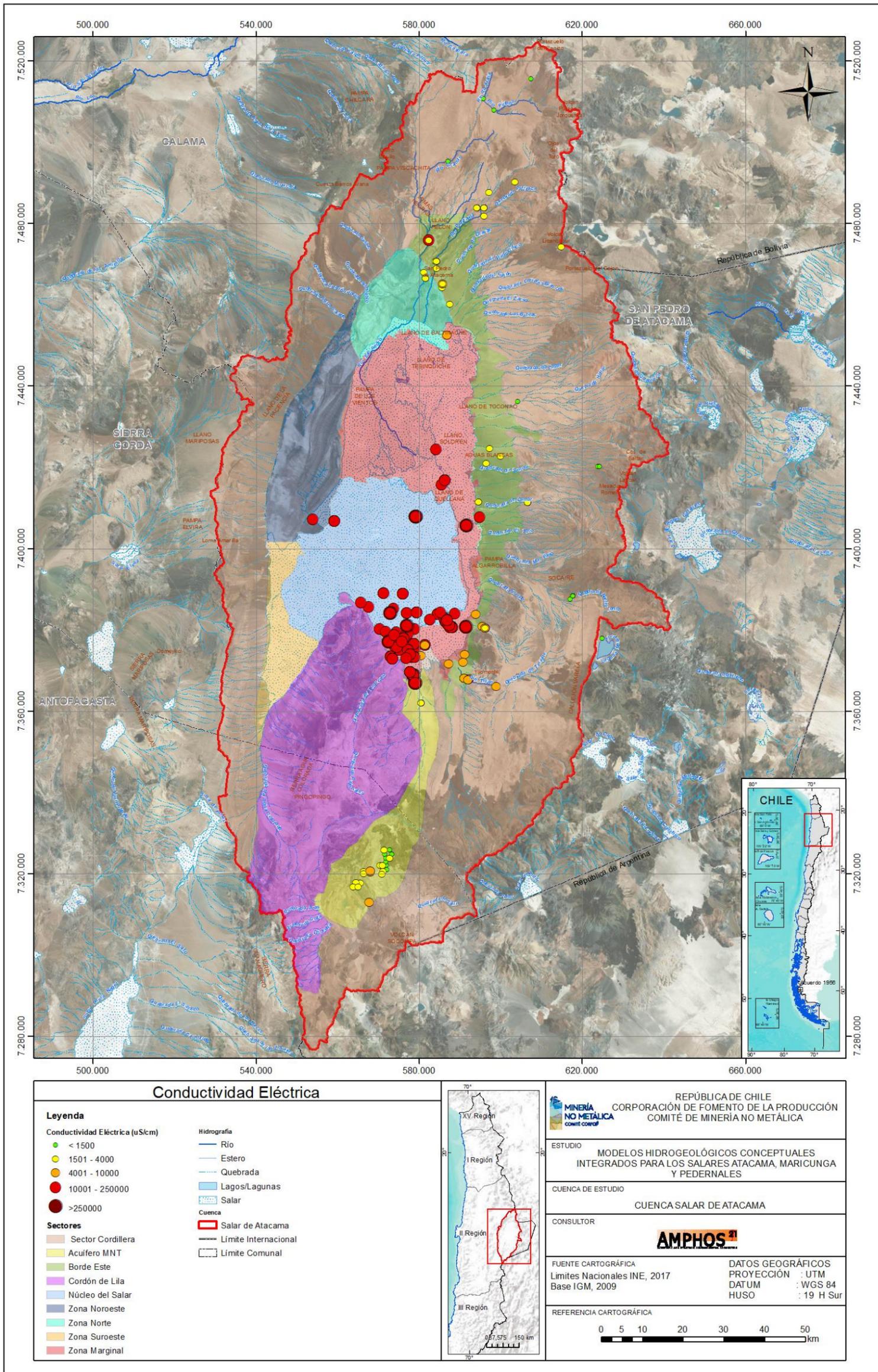


Figura 6-4: Distribución espacial de la CE
Fuente: elaboración propia a partir de información de terceros

6.5 Componentes mayoritarios y facies

A continuación, se presentan las facies hidroquímicas de las aguas en la zona de estudio, las cuales se han definido en base a las concentraciones de sus parámetros mayoritarios. La manera gráfica de observar esto es a través del diagrama Piper, el cual permite determinar las facies hidroquímicas de las aguas mediante la distribución de concentraciones relativas de los cationes mayoritarios disueltos (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} , y K^{+}) y los aniones mayoritarios disueltos Cl^{-} , HCO_3^{-} , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} y NO_3 , ambas en [meq/l].

Cabe mencionar que los datos utilizados poseen un rango de fechas desde 1956 hasta el 2014, 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 muestra el diagrama de Piper para todas las aguas de la cuenca, clasificadas en función de la tipología de punto. En éste se observa una composición heterogénea asociada, probablemente, a diversos procesos ocurridos a lo largo de las distintas líneas de flujo (ej. precipitación, disolución, mezcla de aguas, evaporación) y diferentes orígenes de la fuente.

Si se analiza el diagrama en general, se observa que las aguas subterráneas en su mayoría son cloruradas sódicas con tendencia al ión sulfato. Por su parte, las aguas superficiales son clorudadas sódicas a sulfatadas magnésicas-cálcicas, mientras que los manantiales tienen una tendencia a clorurado-sulfatado sódico-cálcico.

Con el objetivo de identificar si las variaciones de composición y origen de cada tipo de punto están asociadas a la distribución espacial de la muestra, se ha realizado un diagrama de Piper para cada sector de estudio, los cuales se describen a continuación.

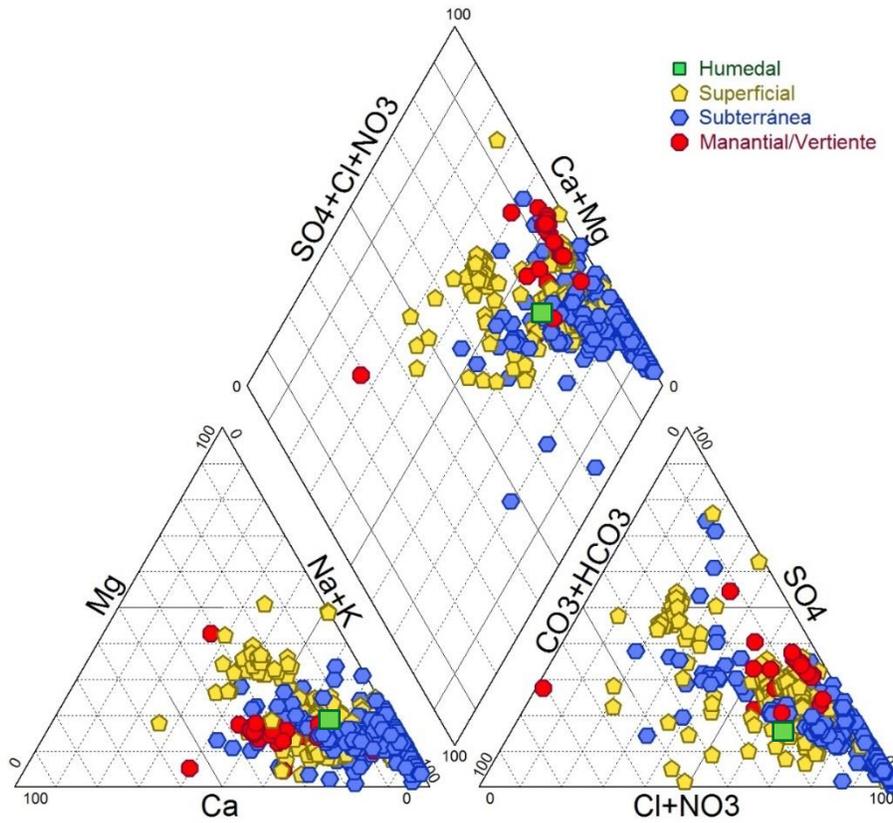


Figura 6-5: Diagrama de Piper de todas las aguas empleadas en la cuenca Salar de Atacama.

Fuente: elaboración propia.

6.5.1 Sector Acuífero MNT

En la Figura 6-6 se muestra el diagrama de Piper para las aguas del sector Acuífero MNT clasificadas en función del tipo de punto.

Las aguas analizadas de este sector corresponden, únicamente, a puntos subterráneos. Se observa que, en general, las aguas se clasifican como cloruradas sódicas con tendencia al ion bicarbonato y sulfato.

Aquellos puntos del sector sur del Acuífero MNT (MPW-17, 18, 19, 20) poseen aguas con concentraciones similares de sulfato, cloruro y bicarbonato, con tendencia a sulfatadas sódicas, mientras que las aguas del sector norte poseen una tendencia hacia el ión cloruro. La composición intermedia del Acuífero MNT sugiere mezcla de aguas sin un origen claro. Sin embargo, es posible indicar que, a medida que las aguas siguen una línea de flujo hacia el norte, hacia el salar, éstas se van enriqueciendo relativamente más en cloruro que en los otros iones.

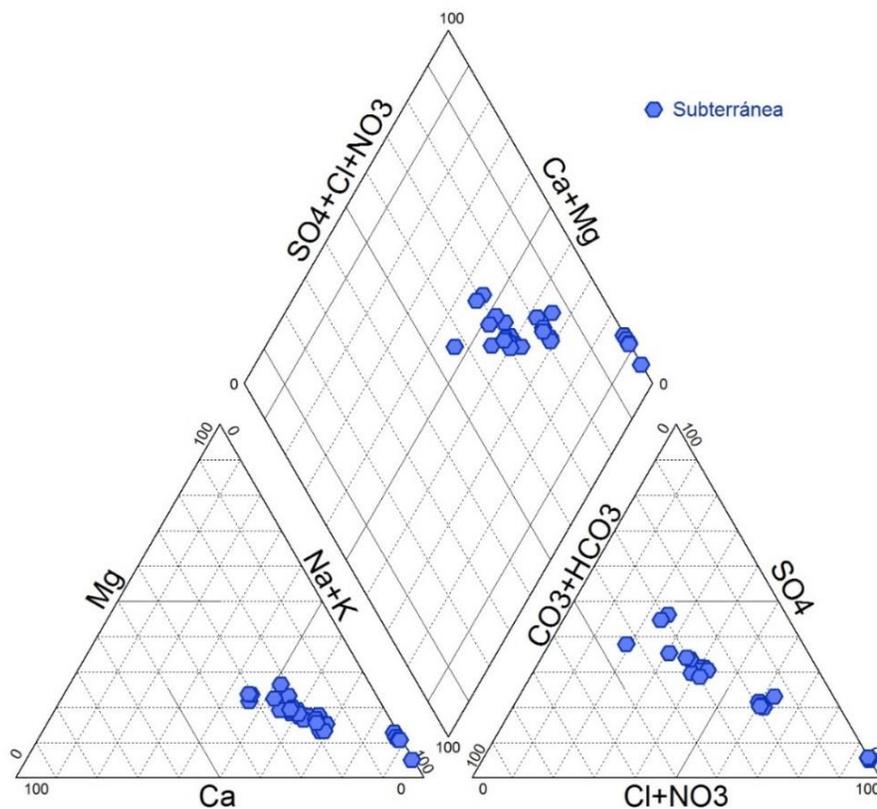


Figura 6-6: Diagrama de Piper de las aguas emplazadas en el sector Acuífero MNT.

Fuente: elaboración propia.

6.5.2 Sector Borde Este

A partir del diagrama de Piper de la Figura 6-7, es posible observar que tanto las aguas superficiales como subterráneas son del tipo cloruradas sódicas. No obstante, es posible apreciar que, comparativamente, las aguas superficiales tienden al ion sulfato, mientras que las subterráneas al ion cloruro.

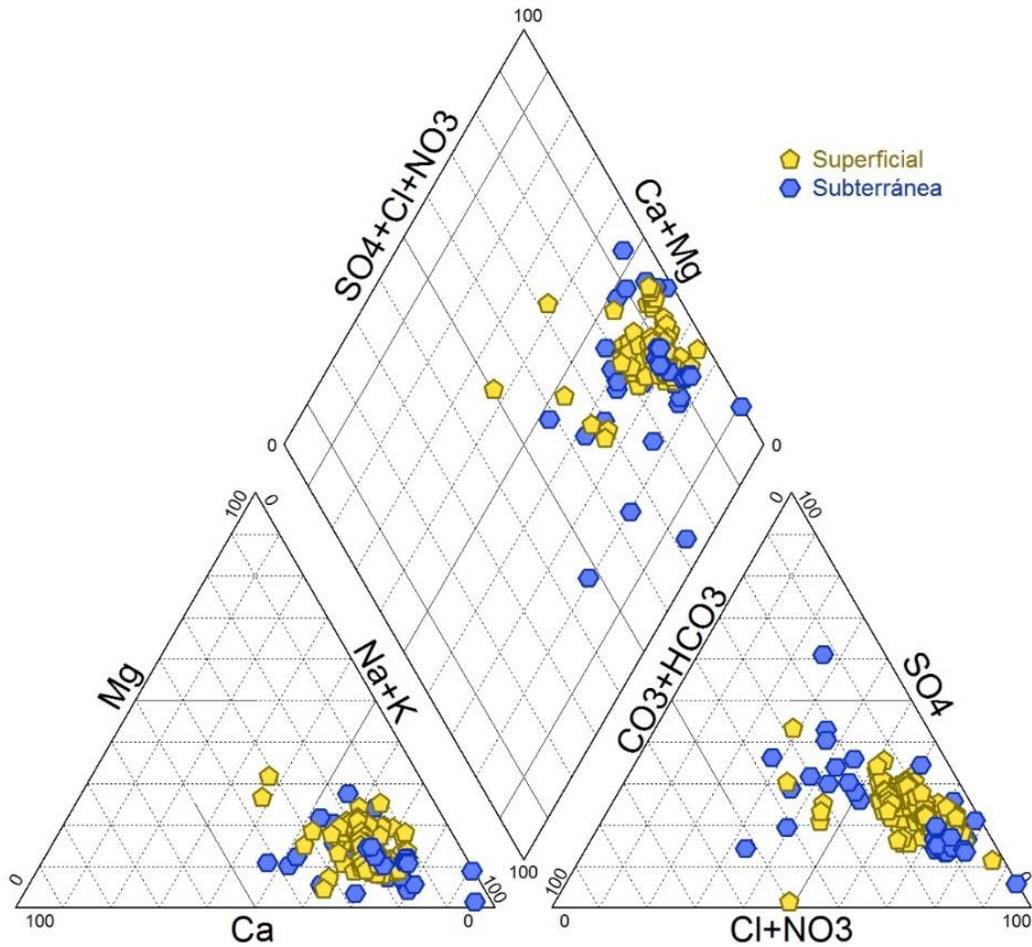


Figura 6-7: Diagrama de Piper de las aguas empleadas en el sector Borde Este.

Fuente: elaboración propia.

6.5.3 Zona Cordillera

En la Figura 6-8 se presenta el diagrama de Piper de las aguas subterráneas emplazadas en el sector Cordillera.

En ésta se observa que la composición de las aguas superficiales es, principalmente, clorurada-sulfatada sódica con tendencia a los cationes magnesio y calcio. A su vez, las aguas provenientes de manantiales/vertientes, se agrupan como cloruradas-sulfatadas sódicas, pero con mayor contenido de calcio y menor magnesio que las superficiales.

Destaca el manantial ATA-24, ubicado en el extremo sector norte de la cuenca, con composición bicarbonatada cálcica. Además, las muestras superficiales ATA-9 y ATA-8, localizadas en el extremo oriental, poseen también una fuerte componente bicarbonatada. Esta observación sugiere que los puntos distribuidos en los sectores altos de la cuenca presentan composiciones similares a las del agua lluvia (bicarbonatada), representando puntos de recarga y con poca afectación de procesos que diferencien su química.

Otro punto particular es el ATA-25 cuya composición es sulfatada cálcica. Dada su ubicación (laguna aislada en el volcán Licancabur), no es de extrañar que en sus aguas exista una predominancia del ion sulfato. Esto se debe, muy probablemente, a una influencia volcánica e interacción con gases ricos en azufre como el H_2S y SO_2 .

En general, las composiciones intermedias indican que las aguas han sufrido procesos de mezcla durante su trayecto entre aguas de distintos orígenes.

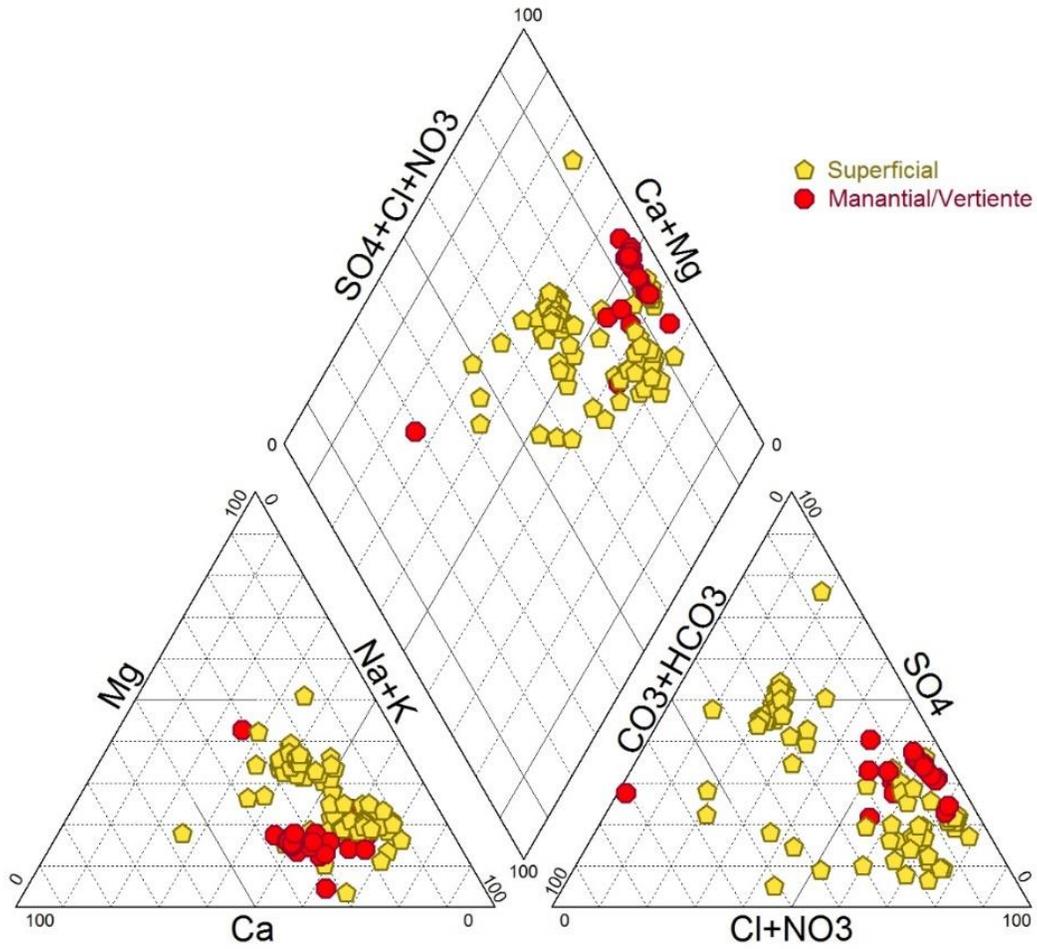


Figura 6-8: Diagrama de Piper de las aguas emplazadas en el sector Cordillera.

Fuente: elaboración propia.

6.5.4 Sector Cordón de Lila

A partir de la Figura 6-9, es posible identificar que las aguas subterráneas se clasifican como cloruradas sódicas. Cabe mencionar, que los pozos analizados de este sector se localizan muy cercanos a la Zona Marginal pudiendo estar influenciados por la cuña salina.

Por otra parte, el único manantial/vertiente analizado se ubica en el sur del Cordón de Lila (ATA-19) y presenta una composición sulfatada cálcica muy diferente a la exhibida por los pozos. Esto podría indicar que los orígenes y procesos posteriores, a lo largo del recorrido de las aguas del sector, son distintos entre sí.

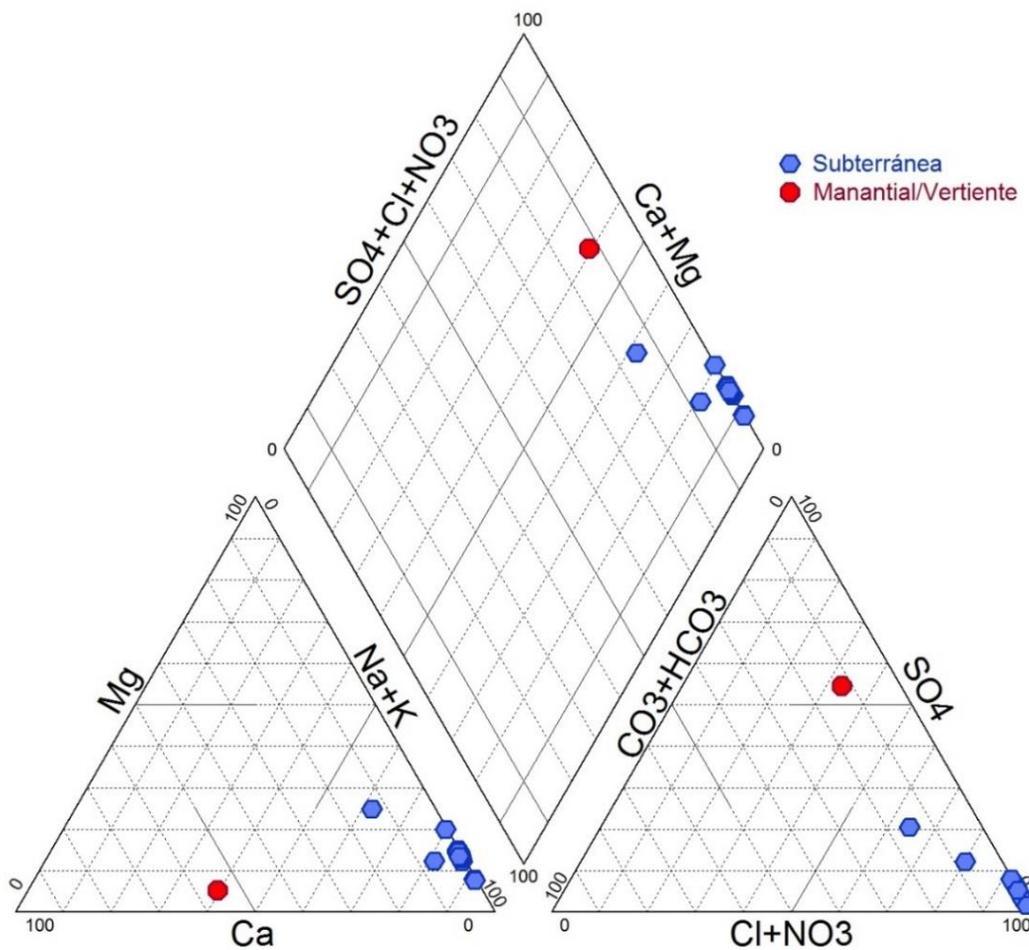


Figura 6-9: Diagrama de Piper de las aguas emplazadas en el sector Cordón de Lila

Fuente: elaboración propia.

6.5.5 Sector Núcleo

En la Figura 6-10 se representa, mediante un diagrama de Piper, la concentración relativa de los parámetros mayoritarios en las aguas del sector Núcleo.

En ella se observa que las aguas subterráneas emplazadas en torno al núcleo del salar son del tipo cloruradas sódicas con una alta concentración de cloruro y sodio y variable entre magnesio y calcio con predominancia del primero.

Solamente la muestra A-13, ubicada en el límite del núcleo con la zona Marginal, muestra un comportamiento levemente diferente, con mayor concentración de sulfato y calcio que el resto de las aguas.

Únicamente, la única muestra superficial de este sector (Laguna Avance), cuya simbología está por debajo de los demás puntos, es de tipo clorurada sódica.

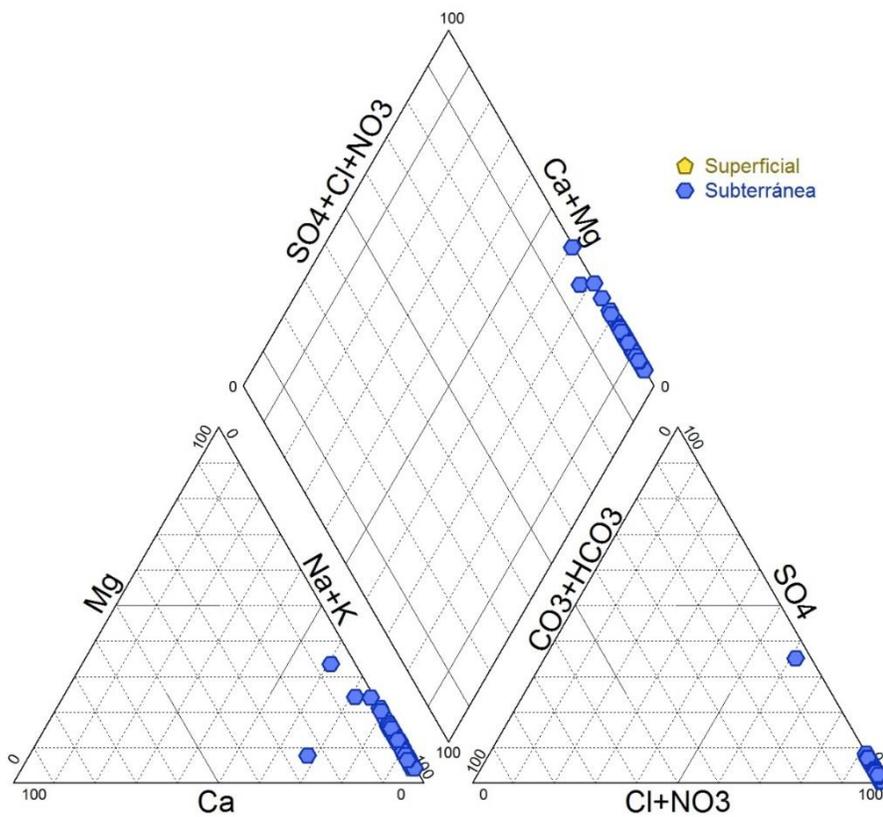


Figura 6-10: Diagrama de Piper de las aguas emplazadas en el sector Núcleo.

Fuente: elaboración propia.

6.5.6 Zona Marginal

A partir de la Figura 6-11 es posible distinguir que todas sus aguas son del tipo cloruradas sódicas. Las excepciones corresponden a los puntos A-57, A-65 y a la Laguna Aguas de Quelana, cuyas aguas se clasifican como sulfatadas sódicas con tendencia al calcio en el caso de los primeros dos y con tendencia al magnesio; en el último. Dada la distribución espacial de estas muestras (extremo oriental de la Zona Marginal) y considerando que sus composiciones son similares a las del Borde Este, se sugiere una influencia preponderante de este sector en la química de estos puntos.

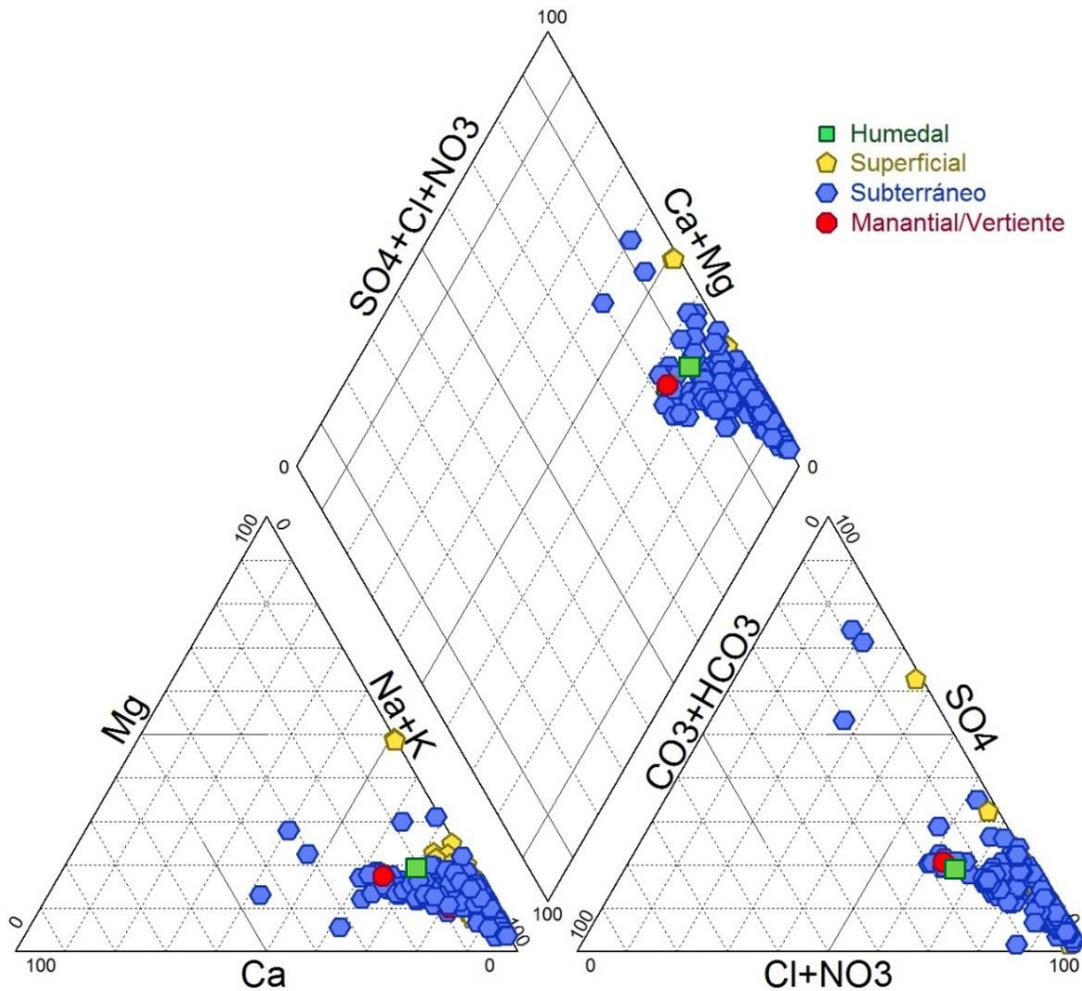


Figura 6-11: Diagrama de Piper de las aguas emplazadas en la zona Marginal.

Fuente: elaboración propia.

6.5.7 Zona Norte y Zona Noroeste

En base a la Figura 6-12 se puede distinguir que sus aguas son del tipo clorurada sódica. El único punto de la Zona Noroeste (S-2) presenta mayores concentraciones relativas de cloruro respecto a los puntos de la Zona Norte. Estos últimos se localizan casi al llegar al salar y sus composiciones reflejan que el agua de recarga, proveniente de la Zona Cordillera, ya ha tenido un recorrido suficiente para enriquecerse en elementos conservativos como el cloruro.

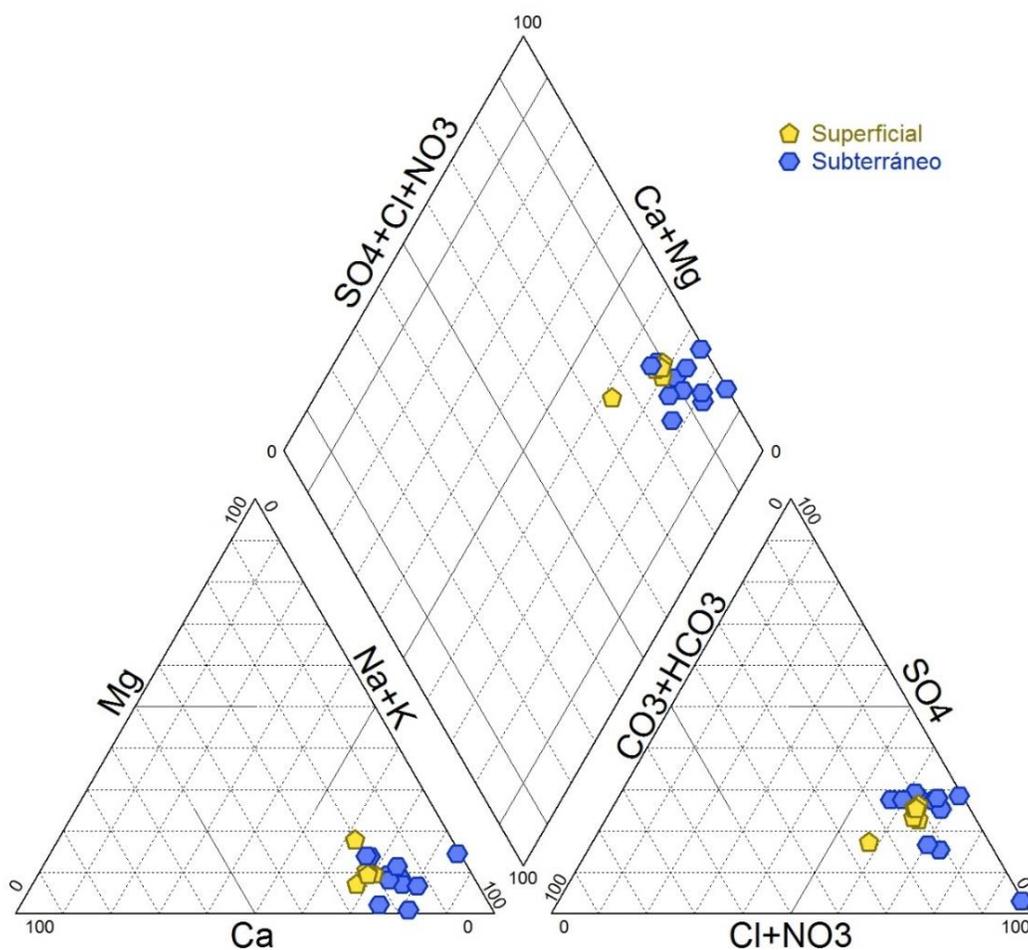


Figura 6-12: Diagrama de Piper de las aguas emplazadas en las zonas Norte y Noroeste.

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 han realizado la Tabla 6-2 y la Tabla 6-3, 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. El registro de datos abarca desde 1956 hasta 2014.

Se observa que en la cuenca Salar de Atacama las concentraciones de los mencionados parámetros son muy heterogéneas, dependiendo del sector y tipo de punto. Esta variación puede deberse a distintos procesos como evaporación, dilución o distintas zonas de recarga. Una observación importante son los altos valores de estos parámetros si se comparan con las concentraciones de los mismos en otras cuencas, siendo varios órdenes superiores.

Sector	Tipo de punto	N° de muestras	Boro disuelto (mg/l)			Tipo de punto	N° de muestras	Litio disuelto (mg/l)		
			Min	Max	Promedio			Min	Max	Promedio
Sector Cordillera	Superficial	38	1	14	5,58	Superficial	41	0	5,4	0,72
	Manantial/Vertiente	4	5,9	39,85	16	Manantial/Vertiente	25	0,03	3,9	0,91
Acuífero MNT	Subterráneo	1	9,3	9,3	9,3	Subterráneo	23	0,8	1037	151,05
Zona Norte	Subterráneo	3	3	17,5	9,03	Subterráneo	9	0	4,44	2,23
	Superficial	1	205	205	205	Superficial	2	0,35	0,4	0,37
Borde Este	Subterráneo	15	7	23	14,62	Subterráneo	31	0	612	21,5
	Superficial	69	1	22	7,22	Superficial	27	0	3,8	1,14
Zona Marginal	Subterráneo	30	9,1	670	149,63	Subterráneo	245	0	1480	410,02
	Superficial	16	32	306	74,96	Superficial	165	1,51	4610	265,58
	-	-	-	-	-	Manantial/Vertiente	2	3,7	71,5	37,6
	-	-	-	-	-	Humedal	1	4,96	4,96	4,96
Núcleo del salar	Subterráneo	11	216	741,16	432,62	Subterráneo	116	0	1928	972,09
	Superficial	-	-	-	-	Superficial	1	128	128	128
Cordón de Lila	-	-	-	-	-	Subterráneo	1	2,37	2,37	2,37
	-	-	-	-	-	Manantial/Vertiente	1	0,15	0,15	0,15

Tabla 6-2: Concentraciones litio (Li) y Boro (B).

Fuente: elaboración propia.

Sector	Tipo de punto	N° de muestras	Potasio disuelto (mg/l)			Tipo de punto	N° de muestras	Magnesio disuelto (mg/l)		
			Min	Max	Promedio			Min	Max	Prom.
Sector Cordillera	Superficial	83	6,1	72,56	28,03	Superficial	83	30,39	171,15	90,25
	Manantial/Vertiente	17	0,27	47,6	27,36	Manantial/Vertiente	18	64,3	103	80,7
Acuífero MNT	Subterráneo	23	25	2626	3770,06	Subterráneo	23	54,3	6614	1232,49
Zona Norte	Subterráneo	1	56	56	56	Subterráneo	1	63	63	63
	Superficial	4	14	32	18,75	Superficial	4	29	54	36,75
Borde Este	Subterráneo	8	46	12560	1617,25	Subterráneo	8	15	6910	902,75
	Superficial	135	1,08	205	31,28	Superficial	135	26,7	302	59,8
Zona Marginal	Subterráneo	232	28,8	35833	7042,84	Subterráneo	232	71,3	12495	3064,17
	Superficial	201	300	42774	3732,99	Superficial	201	401	31952	2160,56
	Manantial/Vertiente	-				Manantial/Vertiente	-			
	Humedal	-				Humedal	-			
Núcleo del salar	Subterráneo	115	2622	44088	17001,7	Subterráneo	115	2566	23128	7961,43
	Superficial	1	6025	6025	6025	Superficial	1	2849	2849	2849
Cordón de Lila	Subterráneo	1	59,3	59,3	59,3	Subterráneo	1	102	102	1025
	Superficial	-								

Tabla 6-3: Concentraciones de potasio (K) y magnesio (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 se caracterizará cada parámetro individualmente. 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 de las concentraciones de boro, litio, magnesio y potasio, se analizaron a partir de 801 analíticas que corresponden a 1 punto de tipo manantial/vertiente, 34 puntos subterráneos y 22 puntos de tipo superficial. Todos estos puntos poseen al menos 6 registros y la gran mayoría fueron muestreados entre los años 2013 y 2014.

A partir de la información presentada, se observa que las concentraciones en B, Li, K y Mg, que se han registrado a lo largo de toda la cuenca y, principalmente, en el núcleo del salar y zona marginal, no tienen variaciones significativas a lo largo de los años, tanto para puntos de tipo superficial como subterráneo.

En cuanto a las aguas superficiales, se observa que muestran pequeñas fluctuaciones estacionales en las concentraciones de los parámetros mencionados, siendo máximas entre los meses de octubre

a febrero y mínimas entre marzo y septiembre. Estas variaciones pueden ser atribuidas a los procesos de evaporación desde la lámina libre, cuyo efecto queda reflejado en diversas lagunas de la zona marginal. La

Figura 6-13 muestra la evolución temporal a lo largo de los años 2013 y 2014, de los promedios mensuales de concentración para los cuatro elementos (B, Li, Mg y K) de diversas lagunas localizadas de la zona marginal. Las lagunas Chaxas y Barros Negros se sitúan en el noreste de la zona marginal, la laguna Aguas de Quelana al este de la misma, mientras que la laguna Interna, La Brava, La Punta, Salada y Saladita se localizan en el sureste de la zona marginal.

En cuanto a los puntos subterráneos, únicamente se han registrado incrementos significativos en una serie de seis pozos (MP-01, MP-02, MP-03, MP-04, MP-05, MP-06, MPS-A), situados en el sureste de la zona marginal. En estos pozos se instalaron para cada uno de ellos, tres piezómetros, de los que se tienen registro en dos, para cada uno de ellos. En los piezómetros cuya habilitación ranurada es más somera no existe variación de las concentraciones a lo largo del periodo registrado. Sin embargo, en los piezómetros cuyo ranurado no comienza en superficie existe un incremento significativo en la concentración tanto del B, Li, K, como del Mg. En la Figura 6-14, se representa la evolución temporal de los piezómetros MP-01A (piezómetro somero) y del MP-01B (piezómetro profundo), que refleja lo antes expuesto, así como la variación de concentración entre los dos piezómetros.

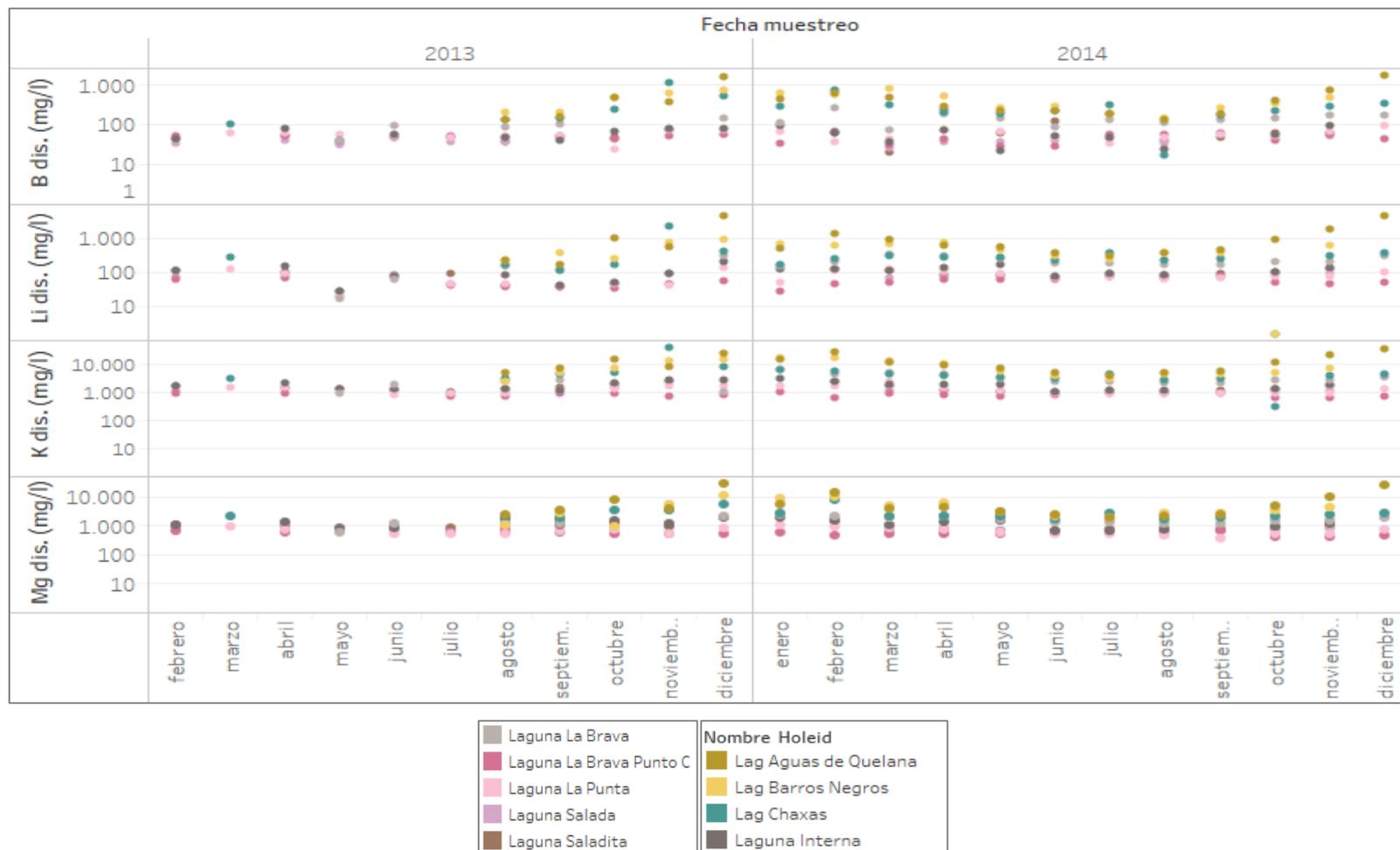


Figura 6-13: Evolución temporal del B, Li, K y Mg disuelto en las lagunas de la zona Marginal.

Fuente: elaboración propia.

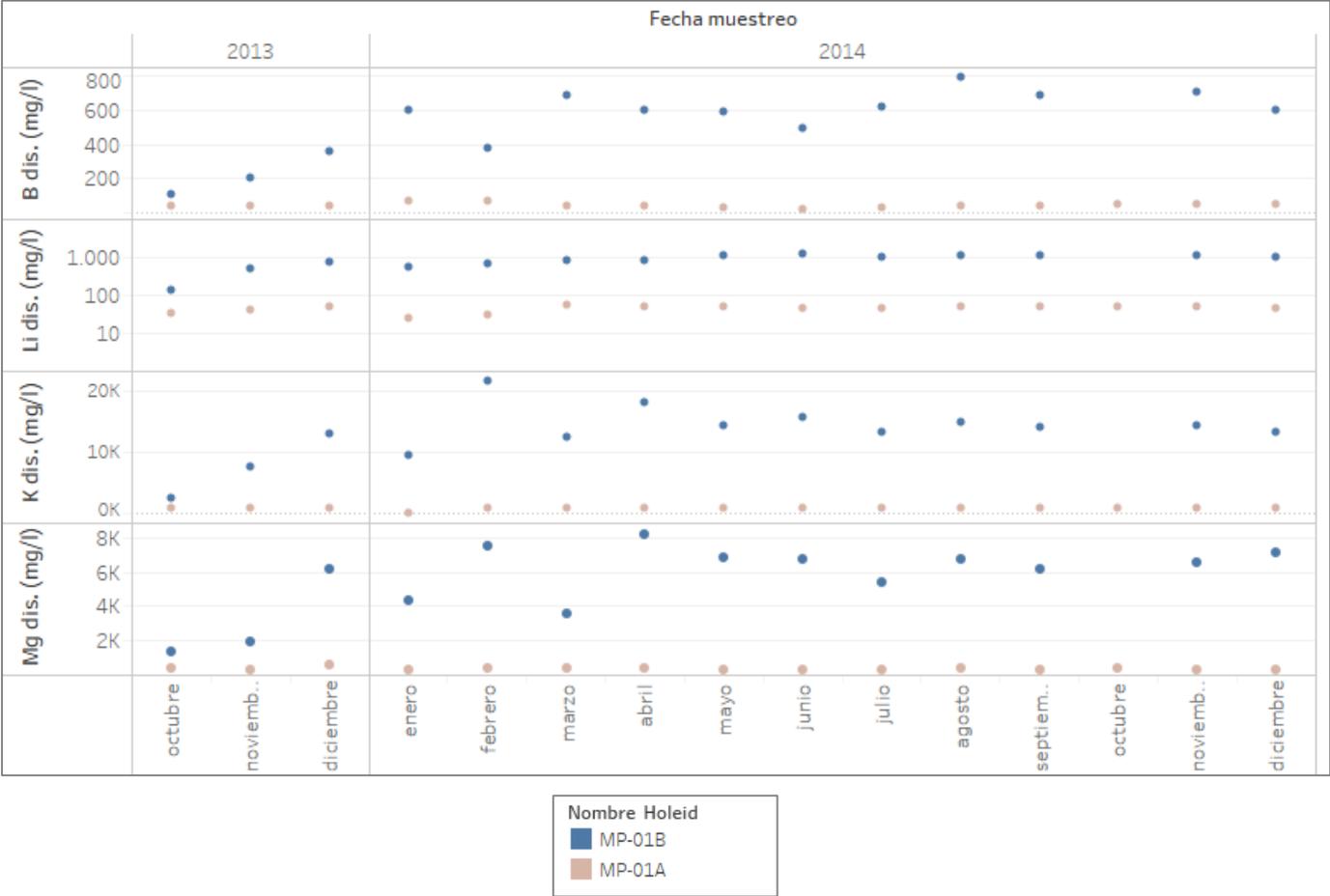


Figura 6-14: Evolución temporal del B, Li, K y Mg disuelto en los piezómetros MP-01A y MP-01B situados en el sureste de la zona Marginal.

Fuente: elaboración propia.

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 6-15 se presenta un gráfico con la concentración promedio 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 de la zona marginal y en las aguas subterráneas tanto de la zona marginal, como del núcleo del salar; mientras que las menores concentraciones se distribuyen en los sectores más elevados de la cuenca (zona Cordillera, acuífero MNT y Borde Este).

Para un mejor análisis espacial de los cuatro elementos se han realizado las Figura 6-16, Figura 6-17, Figura 6-18 y Figura 6-19. En ellas se representa las concentraciones promedio, de cada uno de los cationes representativos del salar, para el periodo 2013 a 2014.

Tal y como se observa, la distribución espacial del B, Li, K y Mg es similar a lo largo de toda la cuenca, según los datos de que se dispone. Así, las mayores concentraciones se encuentran tanto en el núcleo del salar, como en la zona marginal y se han detectado tanto en aguas superficiales, como en aguas subterráneas. Estos promedios máximos coinciden con los valores mayores a 200 mg/l para el B, 100 mg/l para el Li y 1.000 mg/l tanto para el Mg, como para el K. Por otro lado, se han registrado valores muy superiores a los promedios antes mencionados, para cada uno de los parámetros, siendo los registros en la laguna Aguas de Quelana (situada al este de la zona marginal) los más elevados.

En cuanto a las concentraciones promedio mínimas para los 4 elementos, éstas se distribuyen en las zonas de recarga del sector Cordillera y el acuífero MNT (del resto de sectores de recarga, no se disponen datos). Estos valores pertenecen, principalmente a aguas superficiales de tipo manantiales/vertientes y esteros. Estos promedios mínimos coinciden con valores inferiores a 30 mg/l para el B, a 15 mg/l para el Li, a 150 mg/l para el Mg y 100mg/L para el K.

Tal como se comentó en el capítulo 6.6.1, en el sureste de la zona marginal (Figura 6-16, Figura 6-17, Figura 6-18 y Figura 6-19), hay 6 pozos (MP-01, MP-02, MP-03, MP-04, MP-05, MP-06, MPS-A) con dos piezómetros cada uno a diferentes profundidades. Los piezómetros más someros registran concentraciones muy bajas en B, Li, K y Mg, mientras que los piezómetros más profundos registran concentraciones con valores mayores a 100 mg/l para el B, 500 mg/l para el Li y 5.000 mg/l tanto para el Mg, como para el K. Una posible explicación, podría ser que los piezómetros someros registren aguas del acuífero MNT, mientras que los más profundos registran aguas de la cuña salina.

En la zona noroeste, se tiene registro de un único punto, que es de tipo subterráneo, en el que las concentraciones para los cuatro cationes coinciden con los valores mayores a 100 mg/l para el B, 500 mg/l para el Li 5.000 mg/l tanto para el Mg y 15.000 mg/l o para el K. Esto puede ser debido tanto a que en este punto las aguas llegan enriquecidas por discurrir por la Cordillera de la Sal, como porque exista una intrusión de la cuña salina en esta área, o por los dos motivos en conjunto.



Figura 6-15: Concentración de B, Li, Mg y K según tipología y sector geográfico.

Fuente: elaboración propia.

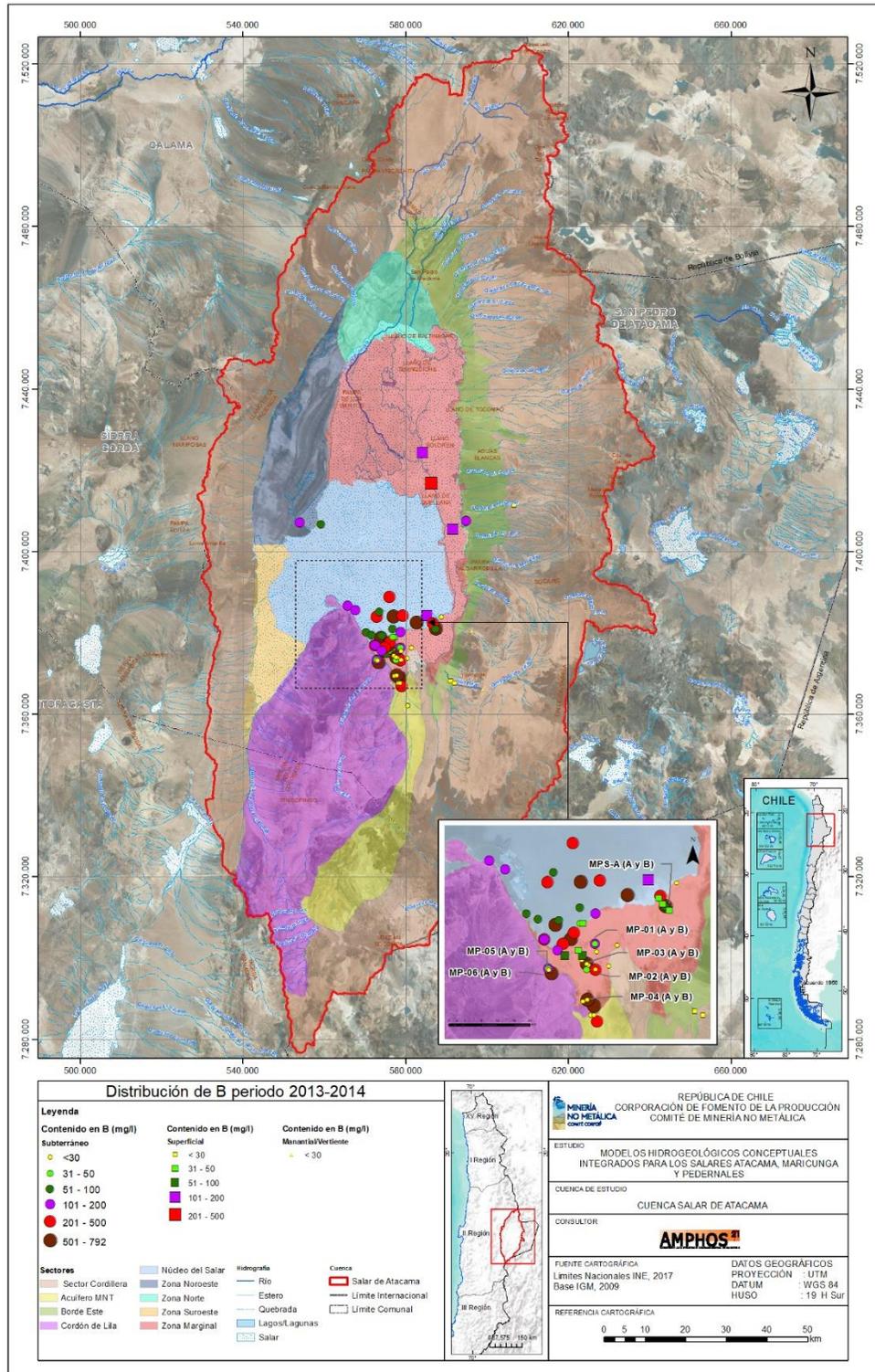


Figura 6-16: Distribución de boro (Bo).

Fuente: elaboración propia.

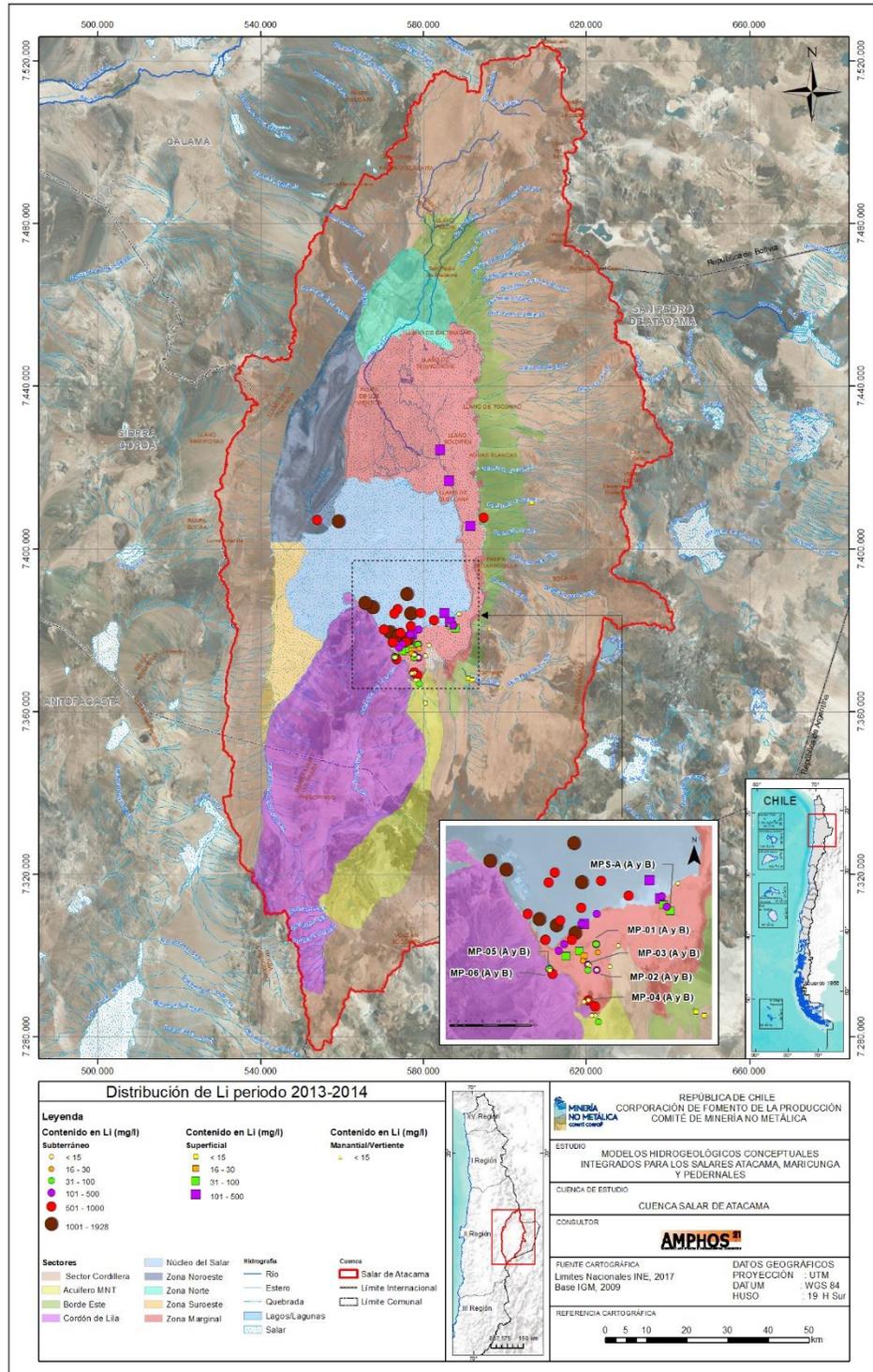


Figura 6-17: Distribución de litio (Li).

Fuente: elaboración propia.

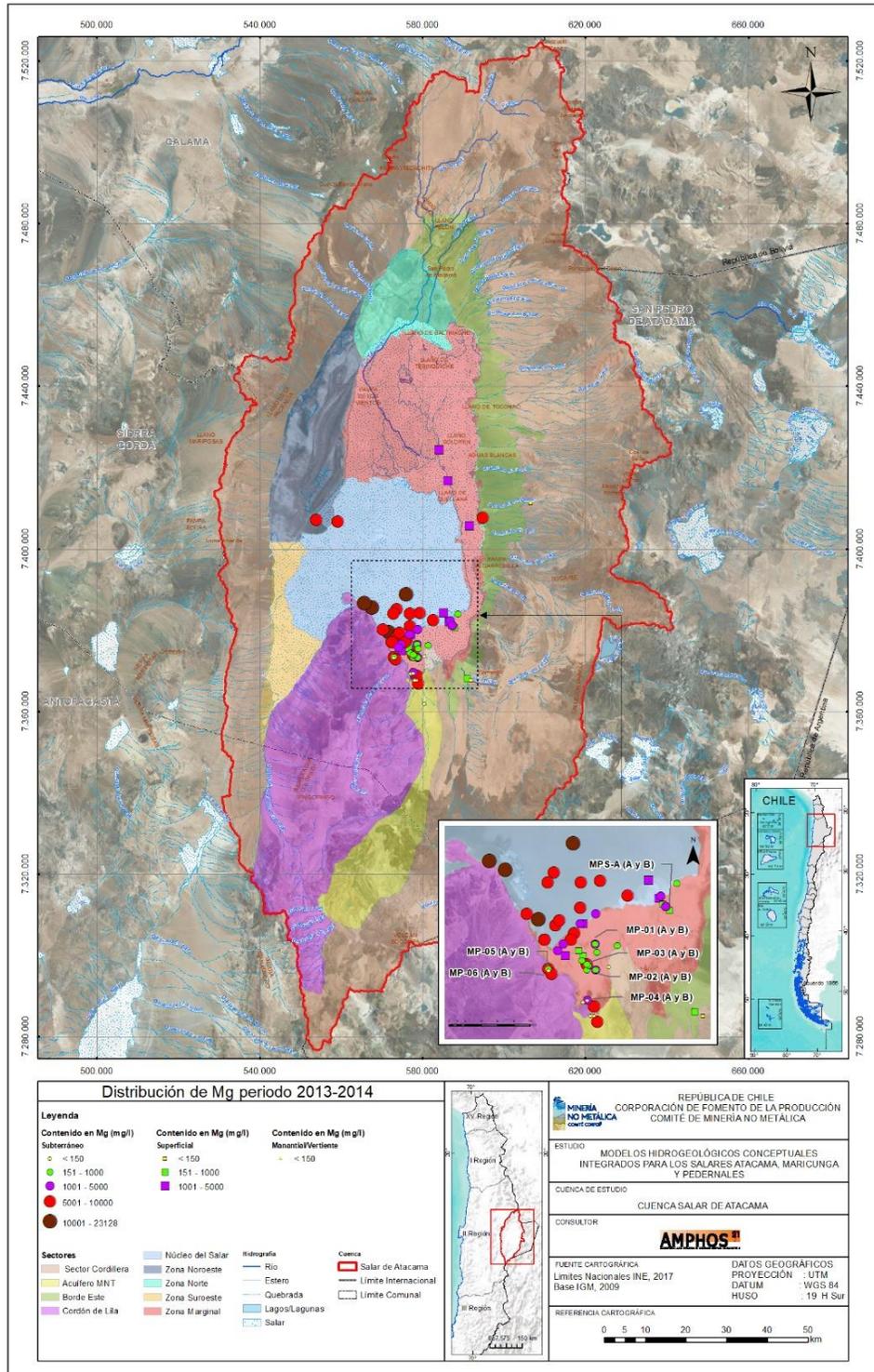


Figura 6-18: Distribución de magnesio (Mg).

Fuente: elaboración propia.

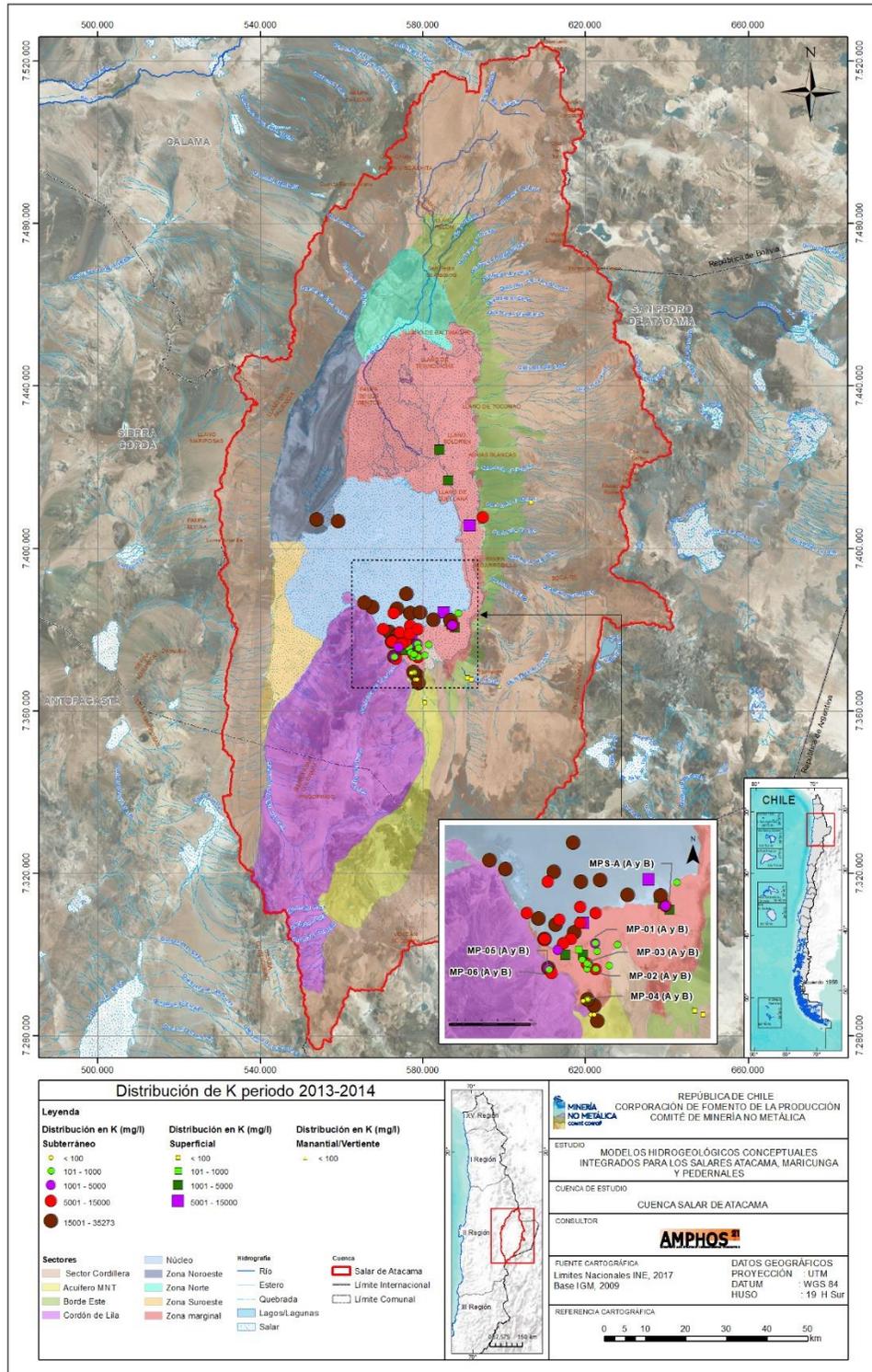


Figura 6-19: Distribución de potasio (K).

Fuente: elaboración propia.

6.7 Isótopos

La interpretación de datos isotópicos es de 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 δD) y $\delta^{18}\text{O}$. Para el respectivo análisis, se han utilizado 756 analíticas desprendidas de 97 puntos de los antecedentes recopilados, de las cuales **6 corresponden a puntos de precipitación (nieve y lluvia) distribuidos fuera de la cuenca, pero considerados en el análisis.**

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.

6.7.1 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, 4 mediciones de $\delta^{18}\text{O}$ y de $\delta^2\text{H}$. En base a dicha restricción, se analizará un total de 43 muestras, las cuales se han clasificado según su ubicación y tipo de punto, tal como se indica en la Tabla 6-4.

Cabe mencionar que, en las zonas Noroeste, Norte y Suroeste no se poseen muestras que posean al menos 4 registros de mediciones isotópicas, por lo que no se podrá analizar la evolución temporal de las aguas en estos sectores. Destaca la Zona Marginal con 27 muestras que poseen 4 o más registros de mediciones de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$, seguida del sector Núcleo del Salar con 8 muestras.

A continuación, se describe la evolución temporal de $\delta^{18}\text{O}$ en las aguas de cada uno de los sectores. Cabe mencionar que el comportamiento evolutivo del $\delta^{18}\text{O}$ es similar al del $\delta^2\text{H}$, por lo que solo se analizará el del ^{18}O .

Sector	Muestras con 4 o más mediciones de isótopos ^{18}O y ^2H			
	Totales	Subterráneas	Superficiales	Manantiales
Cordillera	3	-	2	1
Acuífero MNT	3	3	-	-
Borde Este	1	-	1	-
Cordón de Lila	1	1	-	-
Núcleo del Salar	8	8	-	-
Zona Marginal	27	18	9	-
Zona Noroeste	0	-	-	-
Zona Norte	0	-	-	-
Zona Suroeste	0	-	-	-

Tabla 6-4: Cantidad de muestras, clasificadas en base a su ubicación y tipo de punto, con al menos 4 mediciones de isótopos $\delta^{18}\text{O}$ y δD .

- Sectores Acuífero MNT, Borde Este, Cordón de Lila y Zona Cordillerana

En la Figura 6-20 se ilustra la evolución temporal de las concentraciones de $\delta^{18}\text{O}$ para los sectores Acuífero MT, Borde Este, Cordón de Lila y Zona Cordillerana.

En ella se observa que en los sectores Borde Este y Zona Cordillerana, las aguas superficiales y los manantiales o vertientes presentan una composición con bajo enriquecimiento en isótopos pesados ($\delta^{18}\text{O}$ varía entre -9 y -7‰) y las fluctuaciones de $\delta^{18}\text{O}$ son poco significativas y corresponden a variaciones estacionales. Es importante notar que, en el sector Zona Cordillerana la composición isotópica de las aguas superficiales (Quebrada Camar y Anterrepresa Tilomonte) es más enriquecida en isótopos pesados que la de vertiente (Vert. Peine). Sin embargo, la diferencia es menor de 2‰ lo cual indica, probablemente, que las aguas superficiales, aunque han sufrido procesos de evaporación, ésta no se ha producido por un tiempo prolongado.

En la Figura 6-20 también se observa que el punto MP-06B, de tipo subterráneo y ubicado en el límite entre el sector Cordón Lila y el sector del Núcleo del Salar, posee variaciones en su composición isotópica correspondientes, muy probablemente, a variaciones estacionales. Estas variaciones se asocian a periodos de mayor precipitación (meses invernales y meses estivales donde se genera el invierno altiplánico) y a periodos de deshielo, en los cuales se genera recarga de aguas menos enriquecidas (aguas de precipitación) hacia el acuífero.

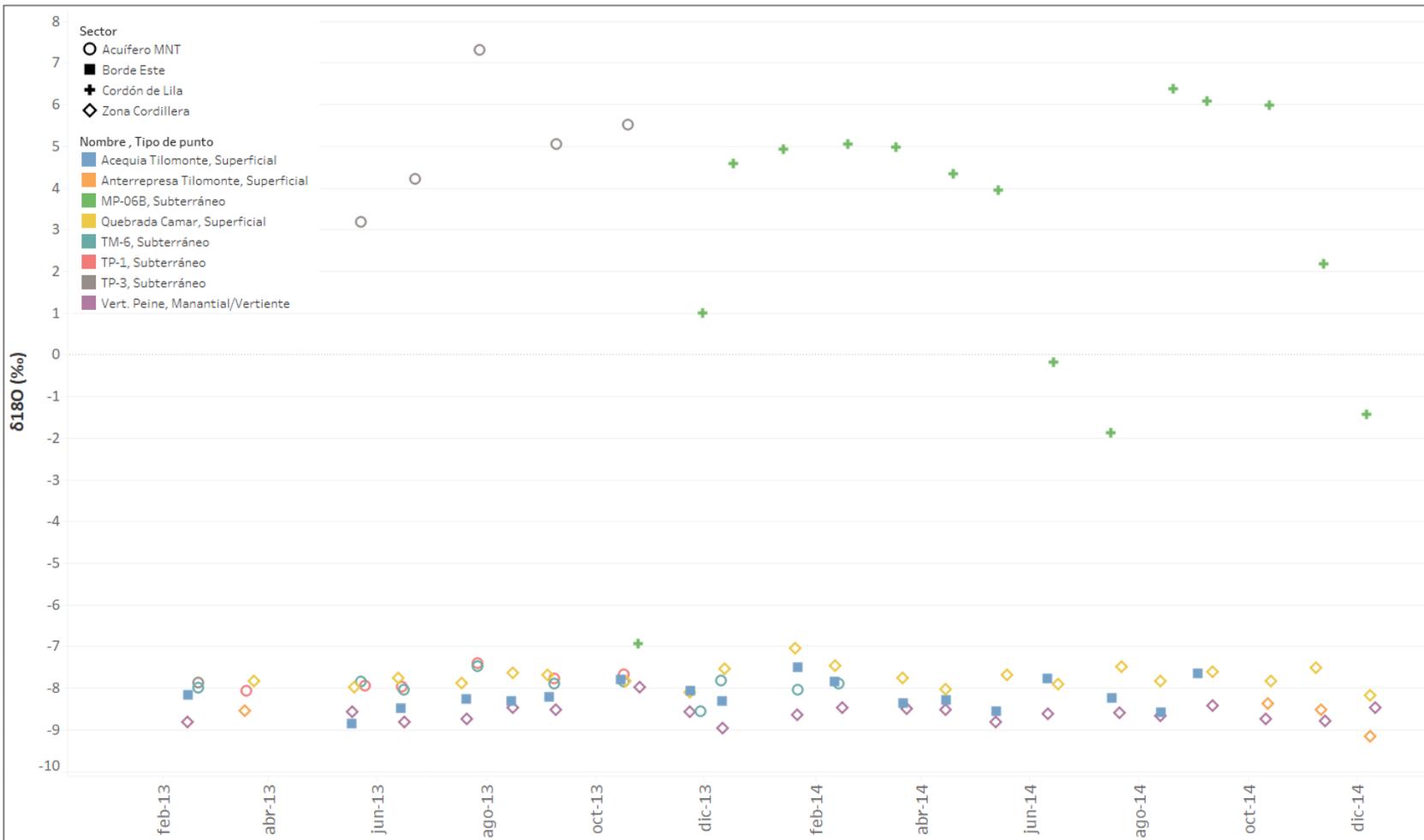


Figura 6-20: Evolución temporal de $\delta^{18}O$ de las aguas en los sectores Acuífero MT, Borde Este, Cordon de Lila y Zona Cordillera.

Los puntos de aguas subterránea TM-6 y TP-1, ubicados en el sector Acuífero MNT y de profundidad cercana a los 100 m, poseen valores de $\delta^{18}\text{O}$ en torno a los -8‰ y las variaciones en su composición isotópica son poco significativas y asociadas a fluctuaciones estacionales. Sin embargo, entre ambos puntos existe un piezómetro denominado TP-3 de mayor profundidad (~1.200 m) en el cual se observa una variación significativa entre la primera medición de febrero de 2013, en la cual se midió un valor cercano a -8‰, y las 5 siguientes medidas entre mayo y octubre de 2013, en las cuales se han medido valores de entre 3 y 7,4‰. Esta anomalía isotópica en este punto podría deberse a que las aguas medidas en las últimas campañas están tomadas de un acuífero más profundo con mayor tiempo de residencia, y por ende, más enriquecido en isótopos pesados, mientras que en la primera medición se muestreó agua más somera similar a la muestreada en los puntos TM-6 y TP-1. Otra explicación podría ser que existiera mezcla con otras aguas o errores en la medición.

- Sector Zona Marginal

En la Figura 6-21 se ilustra la evolución temporal de las aguas subterráneas en el sector Zona Marginal. En ella se observa, a grandes rasgos y en función de los valores de $\delta^{18}\text{O}$, dos grupos de puntos.

El primero de ellos se compone de puntos de profundidad somera con valores de $\delta^{18}\text{O}$ inferiores a -4‰, tales como MP-01A, MP-02A y TPZ-7S, todos ellos ubicados en la parte sur de este sector. Estos puntos muestran variaciones poco significativas asociadas a variaciones estacionales.

Por su parte, el segundo grupo corresponde a los puntos de mayor profundidad con valores de $\delta^{18}\text{O}$ que fluctúan entre los 0 y 8‰. En éstos las fluctuaciones de la composición isotópica son significativas, pero no muestran una tendencia clara, lo cual se deba probablemente a mezcla de aguas entre el acuífero profundo y acuífero somero o a flujos regionales con diferentes composiciones.

Por otro lado, en la Figura 6-22, se ilustra la evolución temporal de las aguas superficiales de las lagunas emplazadas en el sector Zona Marginal. En ésta se observa que, en general, las aguas superficiales presentan grandes fluctuaciones asociadas a las condiciones climáticas, con composiciones más enriquecidas en isótopos pesados durante los meses estivales debido, muy probablemente, a la mayor tasa de evaporación en lámina libre, y a composiciones más empobrecidas en isótopos pesados en los meses invernales debido a la menor tasa de evaporación.

- Zona Núcleo del Salar

En la Figura 6-23 se presenta el gráfico con la evolución isotópica de $\delta^{18}\text{O}$ en los puntos de agua subterránea emplazados en el núcleo del Salar de Atacama.

En esta figura se observa que las aguas muestran fluctuaciones asociadas posiblemente a variaciones en las composiciones de las aguas que recargan esta zona, asociadas a variaciones estacionales y/o a diferentes proporciones de mezclas.

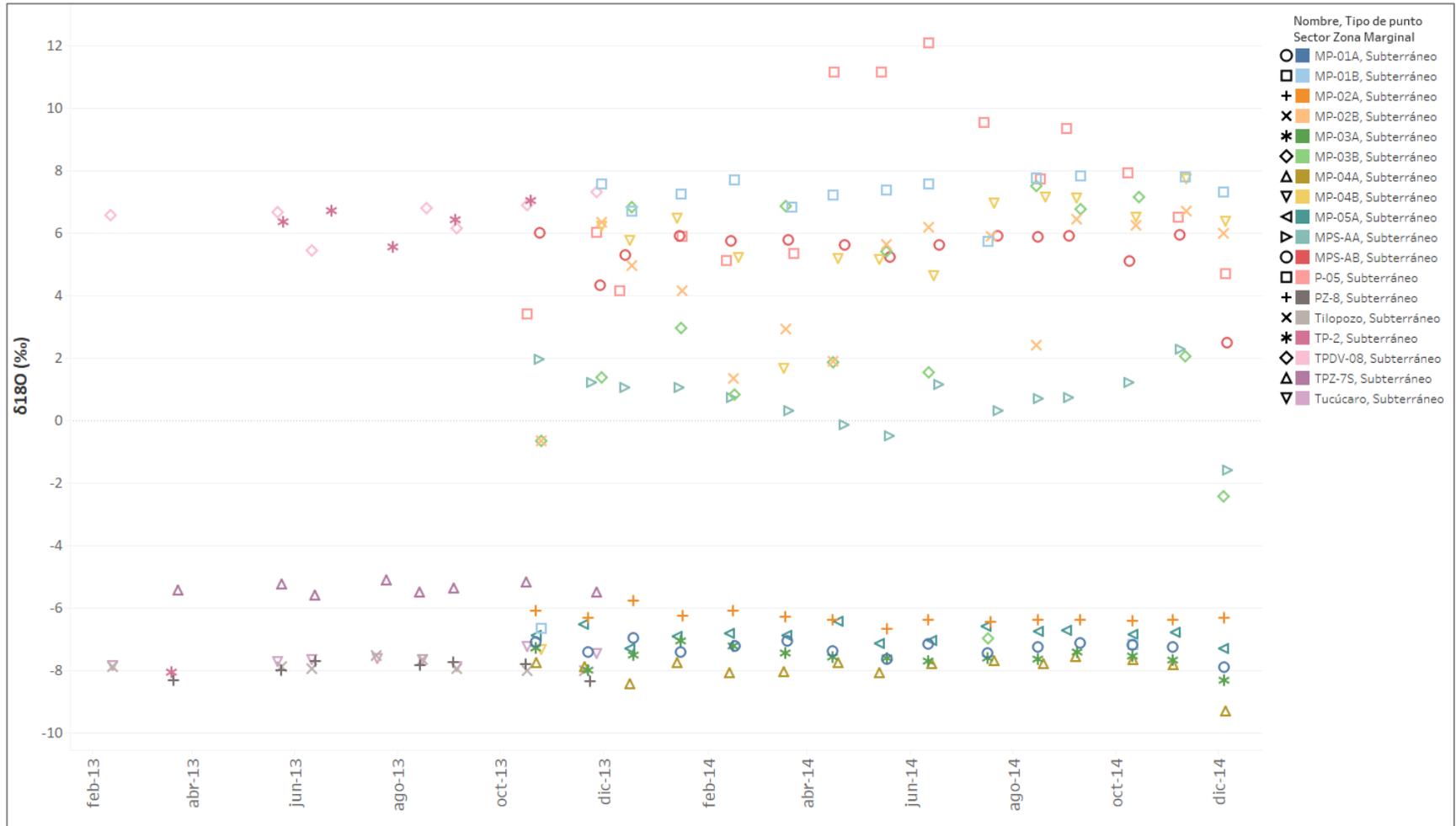


Figura 6-21: Evolución temporal de $\delta^{18}O$ de las aguas subterráneas del sector Zona Marginal.

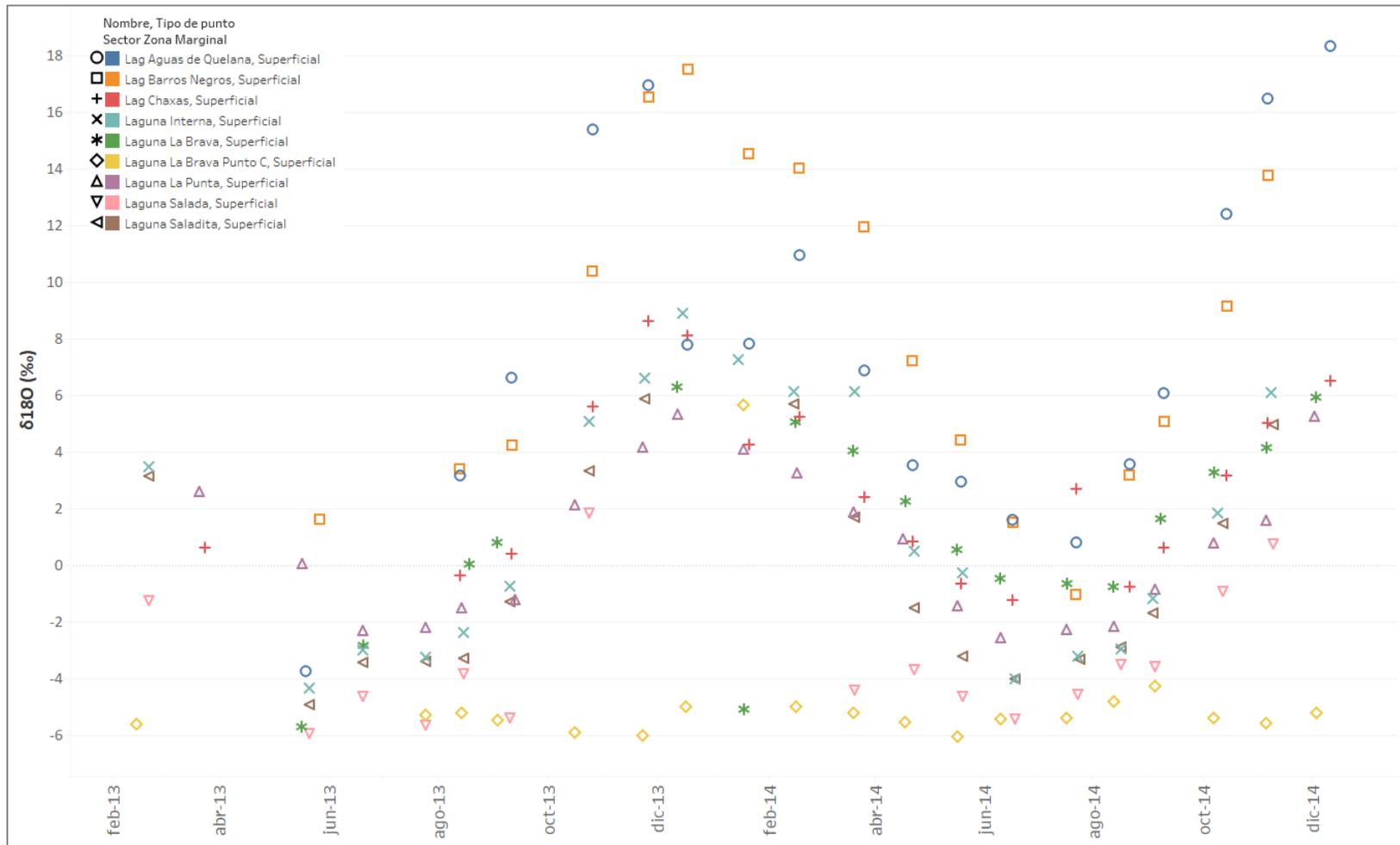


Figura 6-22: Evolución temporal de $\delta^{18}O$ de las aguas superficiales del sector Zona Marginal.

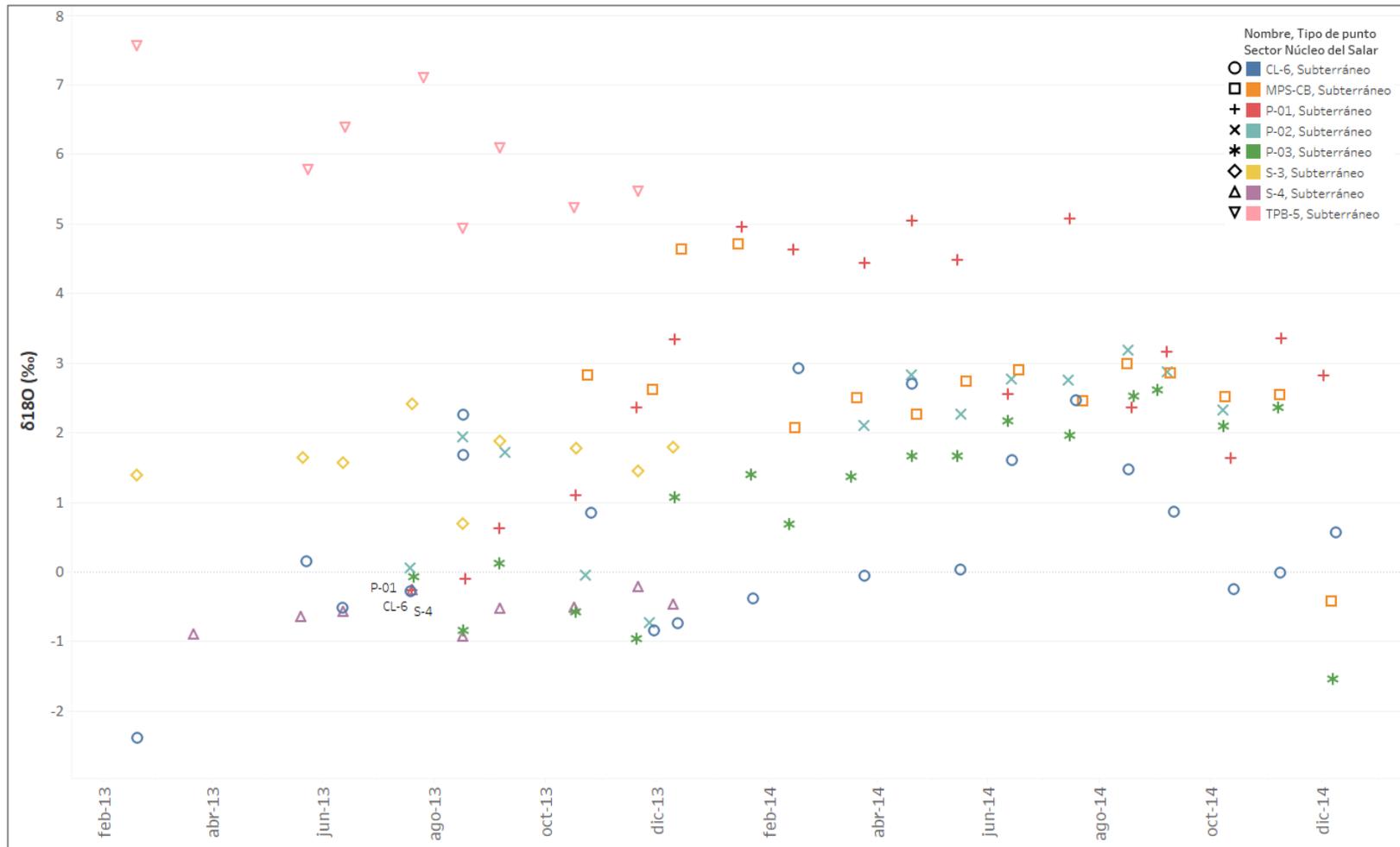


Figura 6-23: Evolución temporal de δ18O de las aguas subterráneas del sector Núcleo del Salar.

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

Para el análisis de 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:

$$\text{MWL:} \quad \delta D = 8 \cdot \delta^{18}\text{O} + 10$$

$$\text{LMWL:} \quad \delta D = 7,8 \cdot \delta^{18}\text{O} + 9,7$$

$$\text{MWL s/D:} \quad \delta D = 8 \cdot \delta^{18}\text{O}$$

Por lo tanto, las muestras tomadas en la cuenca Salar de Atacama 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. Cabe destacar que se han reconocido muestras isotópicas de precipitación fuera de la tendencia general y que se estudiará con detalle durante el proceso de la Etapa III.

En la Figura 6-24 se presenta la composición isotópica $\delta^2\text{H}$ versus $\delta^{18}\text{O}$ de todas 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 los puntos muestran una tendencia de pendiente entre 4 y 5, es posible sugerir que los procesos dominantes que afectan a la zona de estudio se pueden asociar a evaporación desde una superficie libre, a evaporación 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 tanto las aguas de la Zona Cordillera como del Borde Este se encuentra agrupadas y se distribuyen entre las rectas LMWL y MWL sin exceso de deuterio (MWL s/D), con tendencia hacia la primera. Los valores observados, empobrecidos en isótopos pesados, presentan composiciones isotópicas similares a las muestras de precipitación, sugiriendo una baja o nula afectación de procesos que produzcan fraccionamiento en esta zona. Por tanto, la Zona Cordillera y el Borde Este, pueden considerarse como zonas de recarga desde los sectores altos de la cuenca, con aguas diluidas (bajas conductividades eléctricas) y empobrecidas isotópicamente, indicando una línea de flujo de oriente a poniente.

No obstante, se distinguen 2 excepciones en las zonas recién descritas: ATA-25 y L12-1. Ambos puntos muestran valores altamente enriquecidos en $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$. En el caso de ATA-25, esta irregularidad se explica, fácilmente, debido a que el lugar del muestreo corresponde a una laguna aislada, ubicada en la cima del volcán Licancabur, la que se encuentra afectada por procesos de

evaporación que producen fraccionamiento. Respecto al punto L12-1, éste presenta valores de conductividad que sobrepasan los 230.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, siendo mucho mayor que su entorno (puntos 59, 60, A-60; 2.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$), indicando que sus aguas pertenecen al sistema del salar con composiciones isotópicas que se asemejan mucho más a los puntos de la Zona Marginal y reflejando un enriquecimiento isotópico asociado a evaporación.

El único punto que representa la Zona Noroeste (S-2) muestra una composición isotópica levemente enriquecida en relación a las descritas con anterioridad. Dada su ubicación sobre un abanico aluvial en el curso inferior de una quebrada que nace desde la Cordillera de la Sal, no es de extrañar que sus aguas hayan sido afectadas por procesos de evaporación e interacción con las rocas del entorno durante su trayecto.

Las aguas de la Zona Marginal presentan una gran variabilidad en su composición isotópica, en donde los puntos más enriquecidos corresponden a las lagunas Aguas de Quelana y Barros Negros. Existe una tendencia en que aquellos puntos más empobrecidos se localizan en el margen exterior de la Zona Marginal, mientras que aquellos más enriquecidos tienden a situarse hacia el sector del Núcleo. Esto sugiere que las aguas más marginales están aún influenciadas por una mezcla con aguas de recarga isotópicamente empobrecidas (ej. Zona Cordillera y Borde Este), mientras que las aguas localizadas más hacia el interior indican mayor preponderancia de procesos de evaporación y residencia en el acuífero.

Por otra parte, en el sector Cordón de Lila solamente se disponen de 3 puntos con información isotópica, todos ellos localizados en el límite con la Zona Marginal, por lo que su interpretación se asemeja y extrapola a la de esta última zona.

En cuanto a los puntos ubicados en el Núcleo, se observa una distribución con menos variabilidad que la Zona Marginal y con una preferencia evidente hacia valores enriquecidos en $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$. Existe, también, una tendencia, en donde las aguas más enriquecidas se localizan cercanas a la Zona Marginal y no en el mismo núcleo, indicando que el proceso dominante en esta interfaz es la evaporación.

La zona del Acuífero MNT muestra dos subgrupos con diferencias isotópicas indiscutibles, indicando una línea de flujo hacia el salar. Por una parte, los puntos del sector sur se agrupan muy cercanos a la MWL s/D y reflejan valores empobrecidos isotópicamente, similares a las zonas de recarga antes descritas (Borde Este, Zona Cordillera). Contrariamente, el punto TP-3, ubicado en el límite con la Zona Marginal, muestra valores altamente enriquecidos. Más aún, el punto TM-6, localizado unos 5 km aguas arriba de TP-3, muestra composiciones isotópicas similares a las aguas de recarga del sector sur, apuntando a que el enriquecimiento posiblemente se debe a una mezcla de aguas de recarga con aguas del salar y a una preponderancia de procesos de evaporación al llegar a esta transición. Adicionalmente, es posible proponer una línea de flujo del agua de sur a norte.

Por último, se consideraron las muestras de aguas correspondientes a Precipitación (nieve y lluvia) **localizadas fuera de la cuenca**, pero que se incorporaron al análisis por su importancia en la caracterización de las aguas de recarga. Cabe notar que las muestras presentan valores isotópicos empobrecidos y algunas de ellas se disponen por sobre la MWL (AC3.F025, VAR.F001 y TEC.F001), mientras que el resto se ajusta a la MWL y LMWL (Figura 6-25).

Adicionalmente, es posible apreciar que aquellas muestras de precipitación líquida (LAC.P001 y ASC.P001) se encuentran menos enriquecidas que las de nieve, sugiriendo que estas últimas han sido afectadas por procesos de sublimación y consecuente enriquecimiento isotópico.

Finalmente, no es posible asociar una recta meteórica en concreto para las aguas de recarga pues las muestras de precipitación que se tienen no son representativas de la cuenca del Salar de Atacama, sino que de otras cuencas aledañas.

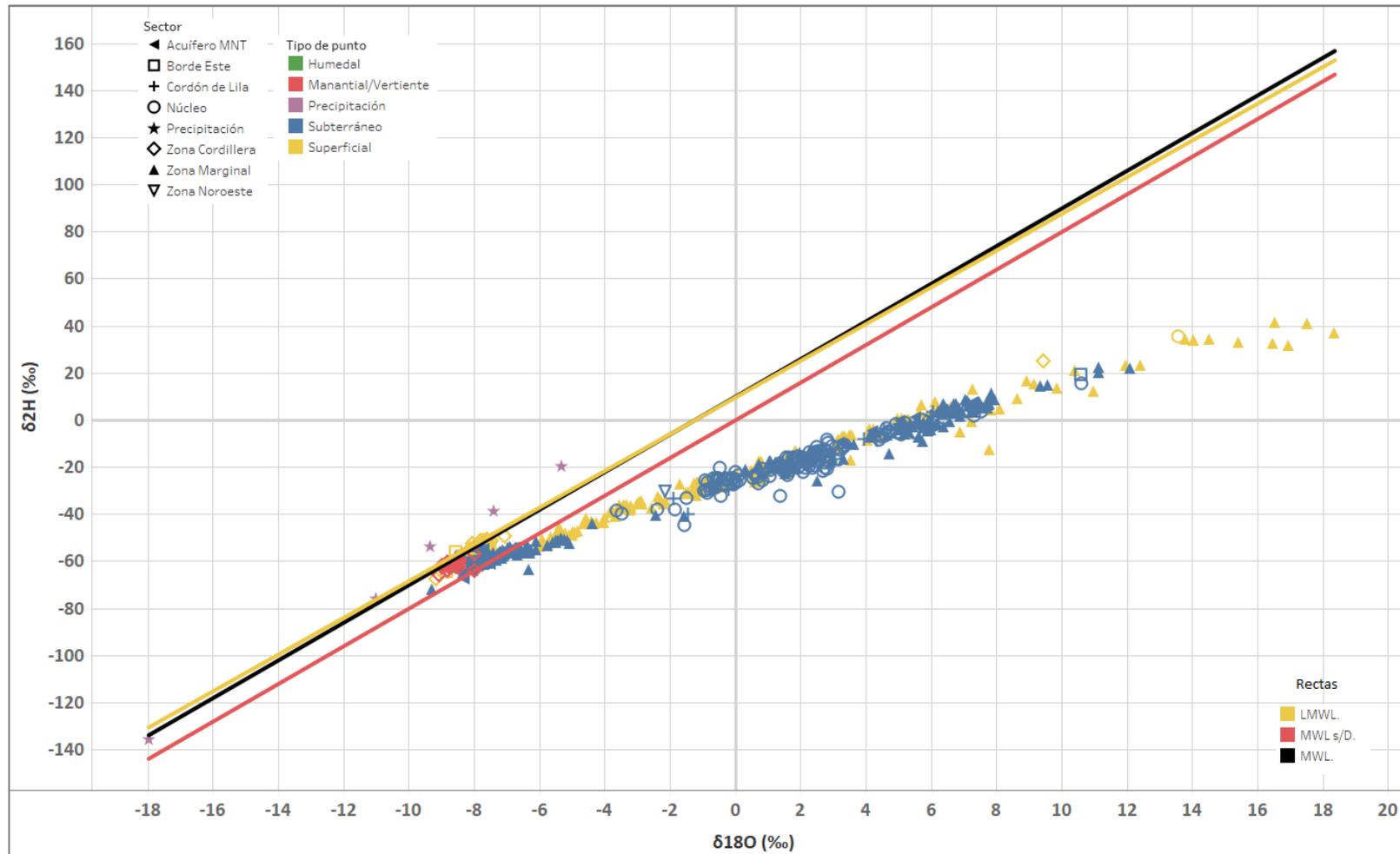


Figura 6-24: Composición isotópica δ^2H v/s $\delta^{18}O$ de las aguas analizadas.

Fuente: elaboración propia.

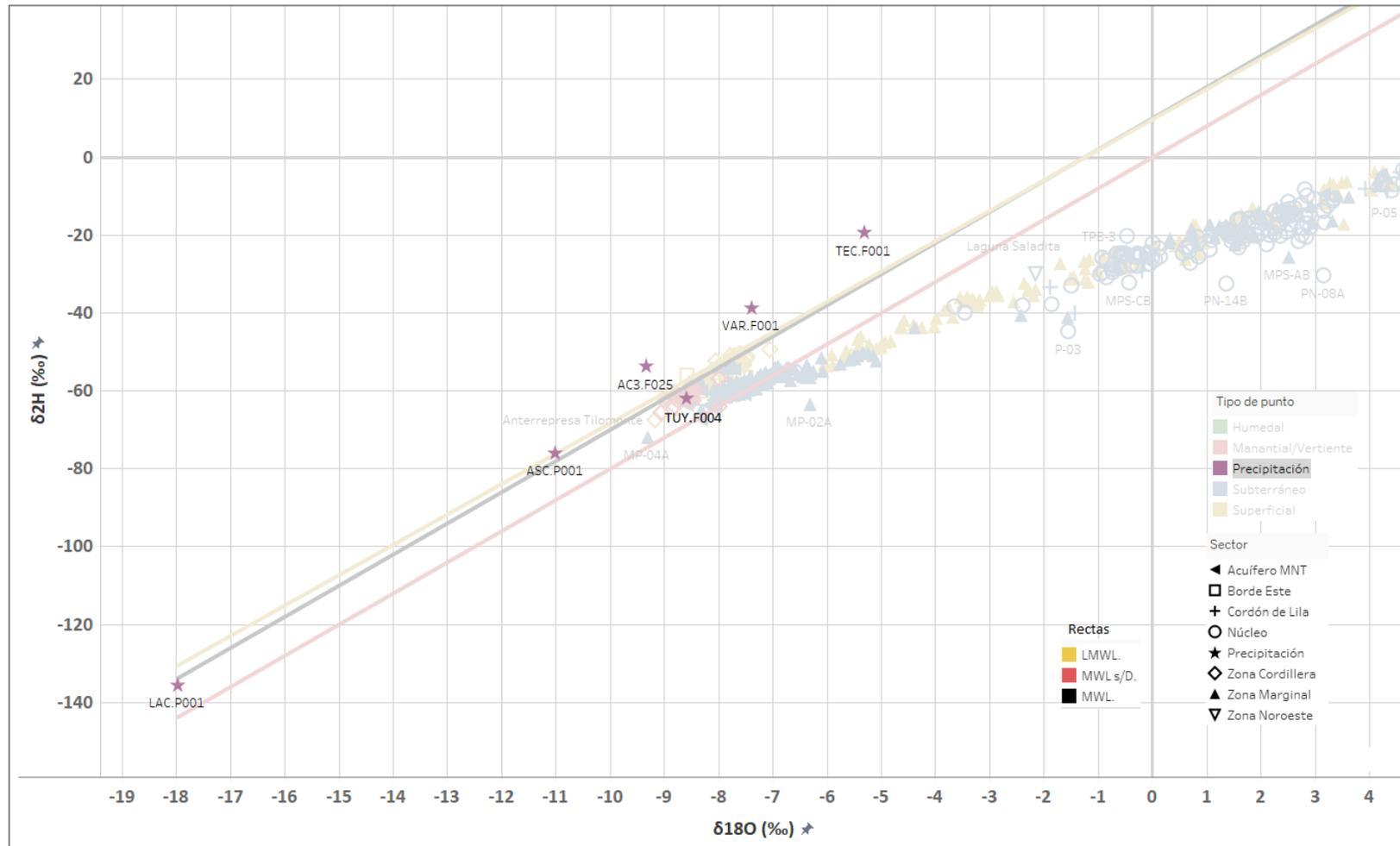


Figura 6-25: Composición isotópica de las muestras de precipitación (localizadas fuera de la cuenca).

Fuente: elaboración propia.

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

En las aguas de lluvia existe un efecto asociado a la altitud, en el cual los contenidos de $\delta^{18}\text{O}$ y δD 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).

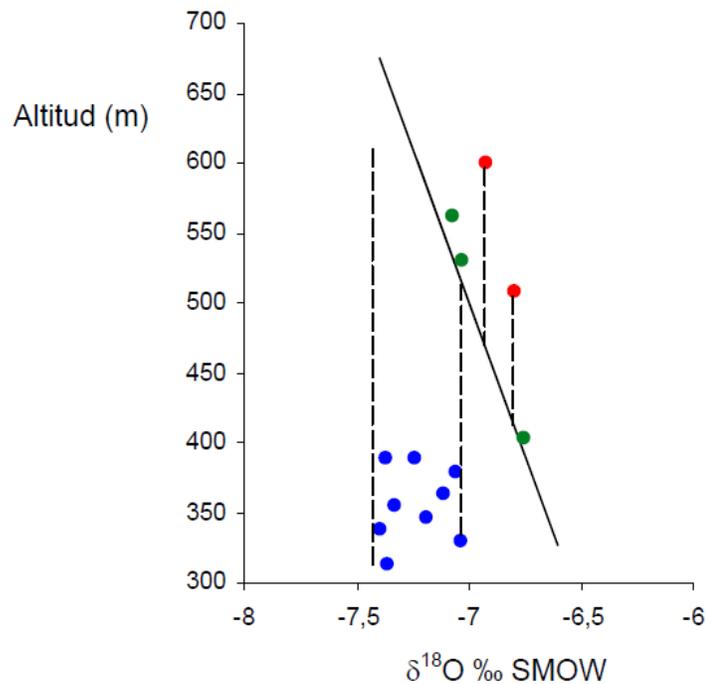


Figura 6-26: Ejemplo de una relación entre diferentes muestras de aguas y la recta altitudinal local. Fuente: FCIHS (2009).

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 las muestras de precipitación se ubican a cotas similares y representan la recarga de otras cuencas, no ha sido posible trazar la recta altitudinal local para la cuenca del Salar de Atacama.

Por otra parte, la muestra de precipitación más cercana a la cuenca de estudio (VAR.F001), se ubica en la ladera sur del volcán Miñiques, en la Pampa Varela, al sur oriente del Salar. Debido a su cercanía, se utilizará como punto de comparación para los siguientes párrafos.

Todas las muestras del Borde Este, sector sur del Acuífero MNT y zona Cordillera, no evidencian un enriquecimiento importante, presentando una composición isotópica acotada dentro del rango -7, -9,3 ‰ de $\delta^{18}\text{O}$ y mostrando una similitud isotópica con el agua de recarga (VAR.F001). Esta observación sugiere que los procesos que generan fraccionamiento no son tan relevantes en estos sectores, pues mantienen en cierto grado la composición del agua de recarga.

En cuanto a los sectores Cordón de Lila, Núcleo y Zona Marginal es evidente el enriquecimiento isotópico debido, esencialmente, a la evaporación.

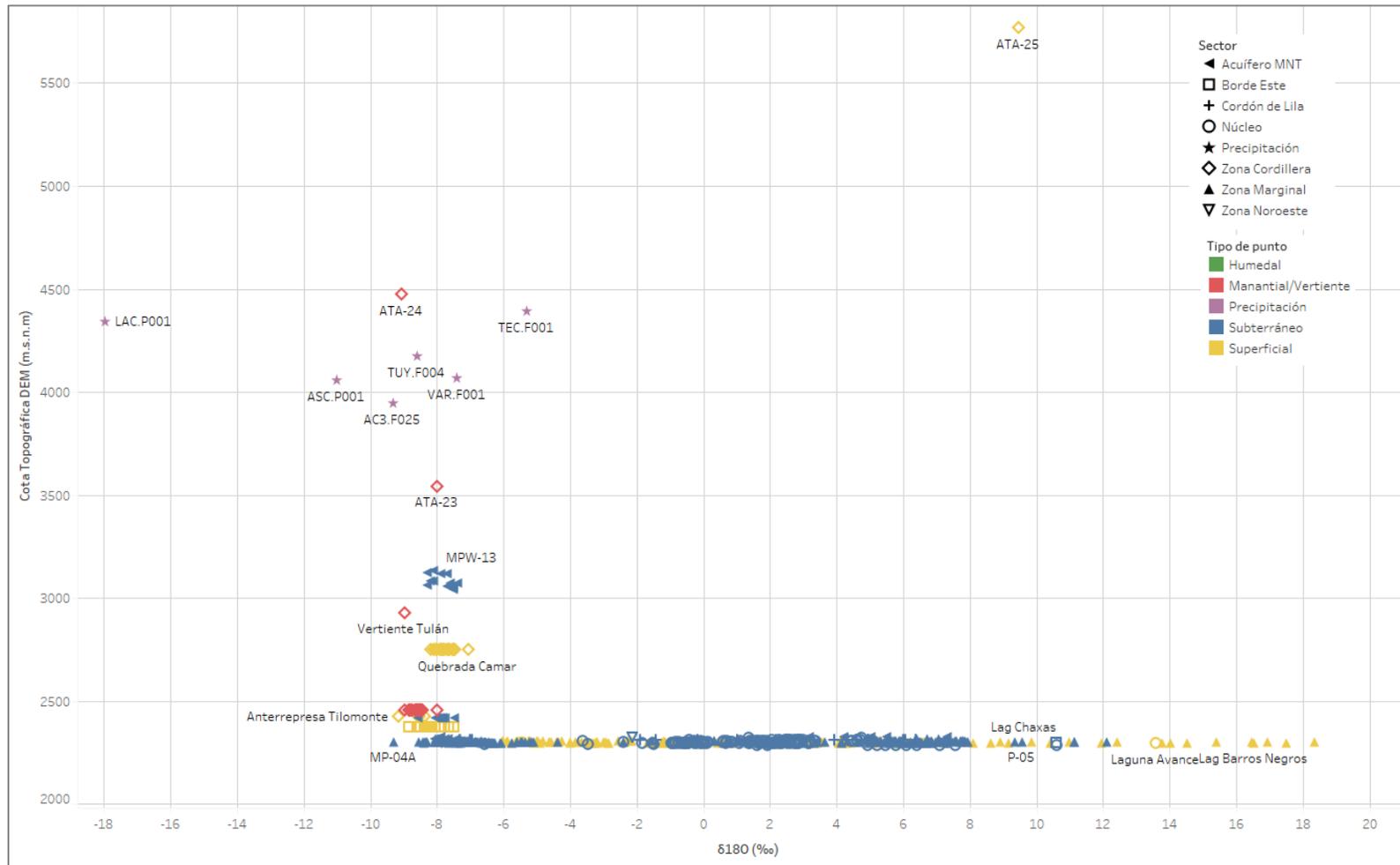


Figura 6-27: Relación de la cota topográfica de muestreo v/s δ18O de las aguas analizadas.

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

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

De la Figura 6-28, se desprende que las aguas subterráneas del Acuífero MNT poseen un origen común poco enriquecido, indicando que las aguas no han sufrido procesos que produzcan fraccionamiento,

En general, aquellas muestras de los sectores de recarga (partes altas de la cuenca) del Borde Este, sector Cordillera y zona Noroeste presentan relaciones B/Cl similares, las que fluctúan entre 0,005 y 0,02 y de $\delta^{18}O$ entre -9 y -8 ‰, mostrando un origen similar poco enriquecido isotópicamente.

Por otra parte, en la zona intermedia de la cuenca, correspondiente a la Zona Marginal, las aguas exhiben relaciones B/Cl más bajas, que las relaciones de las zonas altas de recarga y un mayor enriquecimiento de $\delta^{18}O$. Adicionalmente, es posible identificar dos subgrupos en este sector: uno con relaciones B/Cl entre 0,002 y 0,01 y $\delta^{18}O$ entre -8 y -7‰, correspondiente a muestras más someras y, probablemente, asociadas a un acuífero con aguas de menor tiempo de residencia. El otro subgrupo presenta relaciones B/Cl entre 0,002 y 0,005 y $\delta^{18}O$ entre 2 y 8‰, correspondientes a muestras más profundas, sugiriendo un acuífero más antiguo, profundo y de aguas que han sufrido una interacción agua-roca de mayor tiempo.

Por último, en el sector más bajo de la cuenca, correspondiente al Núcleo del Salar, también se observan dos tendencias. La primera es similar al segundo subgrupo de la Zona Marginal y presenta relaciones B/Cl entre 0,002 y 0,005 y $\delta^{18}O$ entre -1 y 7‰, mientras que la otra; relaciones B/Cl entre 0,0002 y 0,001 y $\delta^{18}O$ entre -2 y 11‰. Esta diferenciación podría deberse a distintas estratificaciones del acuífero alojado en el núcleo; sin embargo, es necesario conocer las profundidades a las cuales se han tomados las muestras. .

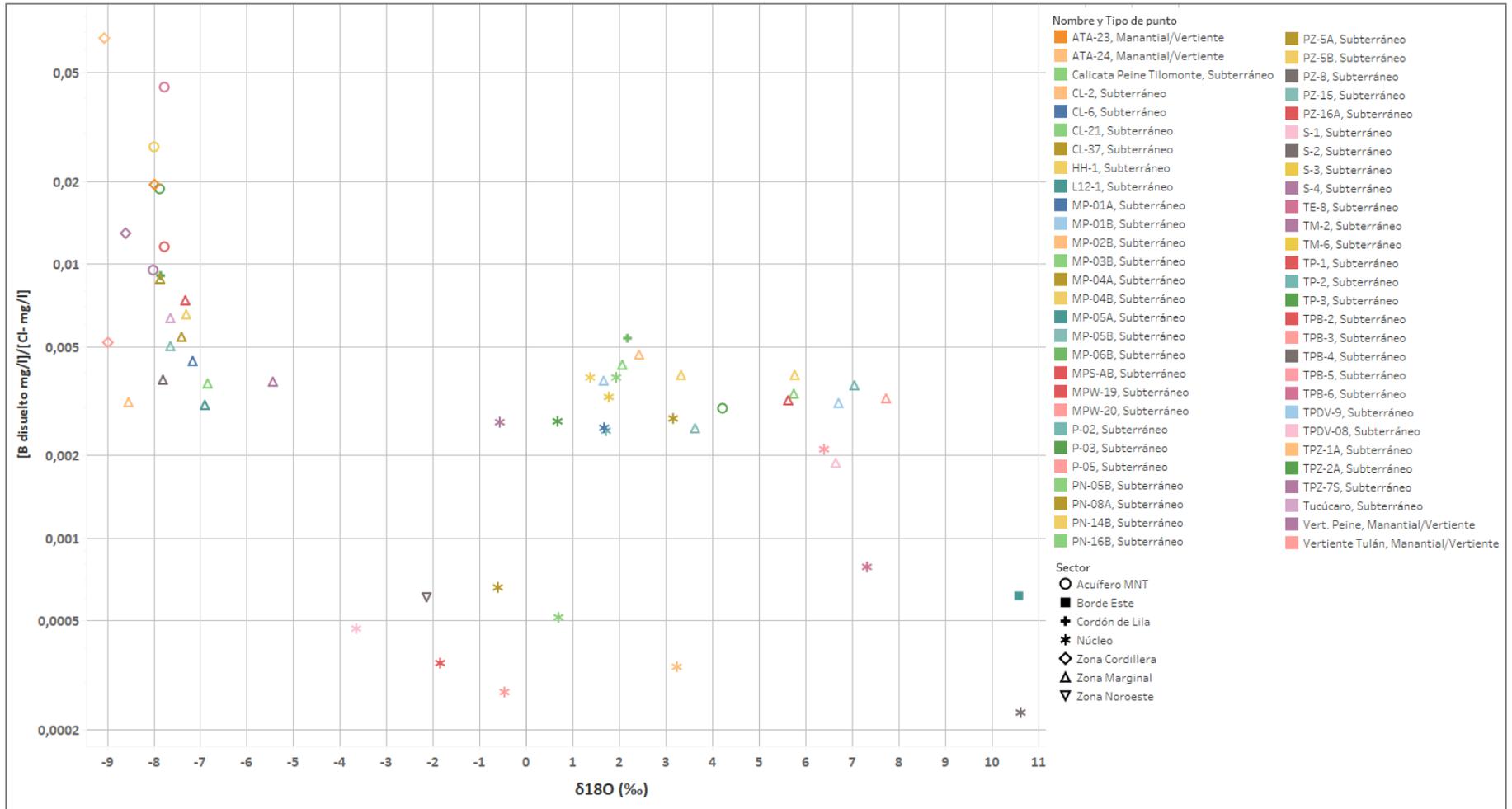


Figura 6-28: Relación B/Cl v/s $\delta^{18}O$ de las aguas analizadas.

6.8 Modelo hidrogeoquímico

En la cuenca del Salar de Atacama es posible diferenciar el tipo de aguas en base a su ubicación geográfica, composición química e isotópica, además de validar las direcciones de flujo y asociar procesos durante su trayecto, los que se detallan a continuación.

Las aguas de la Zona Cordillera presentan las menores conductividades eléctricas registradas en la cuenca, seguidas por las aguas del Borde Este y sector sur del Acuífero MNT. La composición de las aguas superficiales del primer sector es, principalmente, clorurada-sulfatada sódica con tendencia a los cationes magnesio y calcio. A su vez, las aguas provenientes de manantiales/vertientes, se agrupan como cloruradas-sulfatadas sódicas, pero con mayor contenido de calcio y menor magnesio que las superficiales.

En cuanto a la composición de las aguas superficiales y subterráneas del Borde Este, éstas son del tipo cloruradas sódicas. No obstante, es posible apreciar que, comparativamente, las aguas superficiales tienden al ion sulfato, mientras que las subterráneas al ion cloruro.

Por su parte, las aguas analizadas del Acuífero MNT corresponden, únicamente, a puntos subterráneos. Se observa que, en general, las aguas se clasifican como cloruradas sódicas con tendencia al ion bicarbonato y sulfato. Aquellos puntos del sector sur del Acuífero MNT (MPW-17, 18, 19, 20) poseen aguas con concentraciones similares de sulfato, cloruro y bicarbonato, con tendencia a sulfatadas sódicas, mientras que las aguas del sector norte poseen una tendencia hacia el ion cloruro. La composición intermedia del Acuífero MNT sugiere mezcla de aguas sin un origen claro. Sin embargo, es posible indicar que, a medida que las aguas siguen una línea de flujo hacia el norte, hacia el salar, éstas se van enriqueciendo relativamente más en cloruro que en los otros iones.

Adicionalmente, se observa que los valores isotópicos tanto de las aguas de la Zona Cordillera como del Borde Este, se encuentran empobrecidas en $\delta^{2}\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$. Los valores observados presentan composiciones isotópicas similares a las muestras de precipitación, sugiriendo una baja o nula afectación de procesos que produzcan fraccionamiento en esta zona. Por tanto, la Zona Cordillera y el Borde Este, pueden considerarse como zonas de recarga desde los sectores altos de la cuenca, con aguas diluidas (bajas conductividades eléctricas) y empobrecidas isotópicamente, indicando una línea de flujo de oriente a poniente.

En cuanto al Acuífero MNT, éste muestra dos subgrupos con diferencias isotópicas claras, indicando una línea de flujo hacia el salar. Por una parte, los puntos del sector sur se agrupan muy cercanos a la MWL s/D y reflejan valores empobrecidos isotópicamente, similares a las zonas de recarga antes

descritas (Borde Este, Zona Cordillera). Contrariamente, el punto TP-3, ubicado en el límite con la Zona Marginal, muestra valores altamente enriquecidos. Más aún, el punto TM-6, localizado unos 5 km aguas arriba de TP-3, muestra composiciones isotópicas similares a las aguas de recarga del sector sur, apuntando a que el enriquecimiento se debe, posiblemente, a una mezcla de aguas de recarga con aguas del salar y a una preponderancia de procesos de evaporación al llegar a esta transición. Adicionalmente, es posible proponer una línea de flujo del agua de sur a norte.

En las aguas de los sectores Norte, Noroeste y Cordón de Lila, también, predominan las composiciones del tipo cloruradas sódicas. Cabe mencionar que la mayoría de los puntos analizados se distribuyen en las cercanías de la Zona Marginal, por lo que la influencia que pueda ejercer la cuña salina en estos puntos puede ser considerable en cuanto a las composiciones. Isotópicamente, sólo se dispone de 3 puntos con información de estos sectores, todos ellos localizados en el límite con la Zona Marginal, por lo que su interpretación se asemeja y extrapola a la de esta última zona.

Respecto a la Zona Marginal y al Núcleo, es posible distinguir que todas sus aguas son del tipo cloruradas sódicas. Presentan las mayores conductividades registradas, alcanzando valores por sobre los 250.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. No es de extrañar que en estos sectores se encuentren las mayores concentraciones de Li, B, K y Mg.

Las aguas de la Zona Marginal presentan una gran variabilidad en su composición isotópica, en donde los puntos más enriquecidos corresponden a las lagunas Aguas de Quelana y Barros Negros. Existe una tendencia en que aquellos puntos más empobrecidos se localizan en el margen exterior de la Zona Marginal, mientras que aquellos más enriquecidos tienden a situarse hacia el sector del Núcleo. Esto sugiere que las aguas más marginales están aún influenciadas por una mezcla con aguas de recarga isotópicamente empobrecidas (ej. Zona Cordillera y Borde Este), mientras que las aguas localizadas más hacia el interior indican mayor preponderancia de procesos de evaporación y residencia en el acuífero.

En cuanto a los puntos ubicados en el Núcleo, se observa una distribución con menos variabilidad que la Zona Marginal y con una preferencia evidente hacia valores enriquecidos en $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$. Existe, también, una tendencia, en donde las aguas más enriquecidas se localizan cercanas a la Zona Marginal y no en el mismo núcleo, indicando que el proceso dominante en esta interfaz es la evaporación.

A modo resumen es posible establecer líneas de flujo de las aguas, desde las zonas altas de recarga (Zona Cordillera, Borde Este, Zona Norte, Zona Noroeste) y desde el sur (Acuífero MNT) hacia el salar. Estas aguas diluidas y empobrecidas isotópicamente aumentan sus concentraciones a lo largo de su recorrido y son afectadas por procesos de evaporación que las enriquecen isotópicamente en

$\delta^{2}\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$. Posteriormente, las aguas descargan en la Zona Marginal y Núcleo del salar (depocentro de la cuenca), en donde aumentan significativamente su concentración de sales debido a procesos reiterativos de precipitación-disolución mineral 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. Adicionalmente, es posible advertir que los pH de la cuenca no presentan mayor variabilidad (entre 6,5 y 8,8), sugiriendo un efecto tampón de la geología sobre el pH de las aguas.

Finalmente, es posible identificar que las direcciones de flujo de las aguas superficiales y subterráneas poseen una trayectoria convergente hacia el depocentro de la cuenca, desde las partes altas a las bajas, descargando al mismo Salar de Atacama. Posteriormente, son afectadas por procesos de evaporación y disolución-precipitación reiterativos 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.

7. Sitios de protección ambiental y sectores de explotación

En este capítulo se detallan los sitios de protección ambiental, los sectores de explotación de los acuíferos y los derechos de agua existentes en la cuenca Salar de Atacama.

7.1 Sitios de protección ambiental

En la Cuenca Salar de Atacama se han identificado las siguientes categorías de protección ambiental: Sitios RAMSAR, Reserva Nacional, Santuario de la Naturaleza, Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado (SNASPE), Sitios Prioritarios, Sitios de Estrategias Regionales, Bienes Nacionales Protegidos y Acuíferos Protegidos.

En el área de estudio existen una serie de humedales catalogados como RAMSAR. Dichos humedales son de importancia internacional, dado que cumplen con los criterios siguientes: son humedales representativos, raros o únicos y, además, son importantes para la conservación de la diversidad biológica. Los humedales RAMSAR que existen en la cuenca corresponden al Sistema Hidrológico de Soncor, ubicado en el borde este del Salar de Atacama. Dichos humedales fueron catalogados bajo estas características el 10 de diciembre de 1996, en el Decreto Ley 3485.

Cabe destacar también, que en el área de estudio se encuentra la Reserva Nacional Los Flamencos que está distribuida en cuatro zonas protegidas, dos al norte y dos en el borde este del Salar de Atacama. La reserva fue creada el día 17 de octubre de 1990, por Decreto Supremo n° 50 del Ministerio de Agricultura. La Reserva Nacional Los Flamencos destaca por la protección de las especies de fauna como el tuco tuco de la puna, zorro culpeo, puma, vicuña y guanaco, mientras que en lo que ha flora se refiere, las especies protegidas son el tamarugo y el algarrobo, que están en estado de conservación vulnerable.

Además, dentro de la Reserva Nacional Los Flamencos, se ubica el Santuario de la Naturaleza Valle de la Luna, al noreste del Salar de Atacama. Dicha categoría fue otorgada el 7 de enero de 1982 en el Decreto Supremo n° 37.

En la clasificación SNASPE se encuentran zonas asociadas al patrimonio natural protegido por el Estado. En la Cuenca del Salar de Atacama existen cuatro zonas SNASPE, áreas que corresponden a la Reserva Nacional Los Flamencos (Figura 7-1).

Los Sitios Prioritarios son sitios definidos por la Estrategia Nacional de Biodiversidad. Dentro del límite de la Cuenca del Salar de Atacama se encuentra parte del área correspondiente al Sitio Prioritario de Laguna Lejía, en la que se incluye un humedal altoandino de alta pristinidad e importante sitio de alimentación y reproducción de especies altoandinas.

Los sitios de Estrategia Regional en la cuenca son sitios definidos en la Estrategia Regional de la Biodiversidad, concretamente, de la Región de Antofagasta, que destacan por sus características ambientales y que no se encuentran dentro de un área SNASPE (Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado). En la cuenca de estudio comprende los Geisers del Tatio, sector Volcán Licancabur, Ayllus de San Pedro de Atacama, parte de la Laguna Lejía y el Salar de Atacama.

Finalmente, en el área de estudio se encuentran definidos Acuíferos Protegidos, asociados a quebradas laterales aportantes al Salar de Atacama y acuíferos del borde este y sur del mismo salar. Entre estos destacan los siguientes: Quelana, Cejas, Olar, La Punta, Tilopozo y Tilocar, entre otros muchos.

En la Figura 7-1 se puede observar la distribución de las áreas descritas anteriormente.

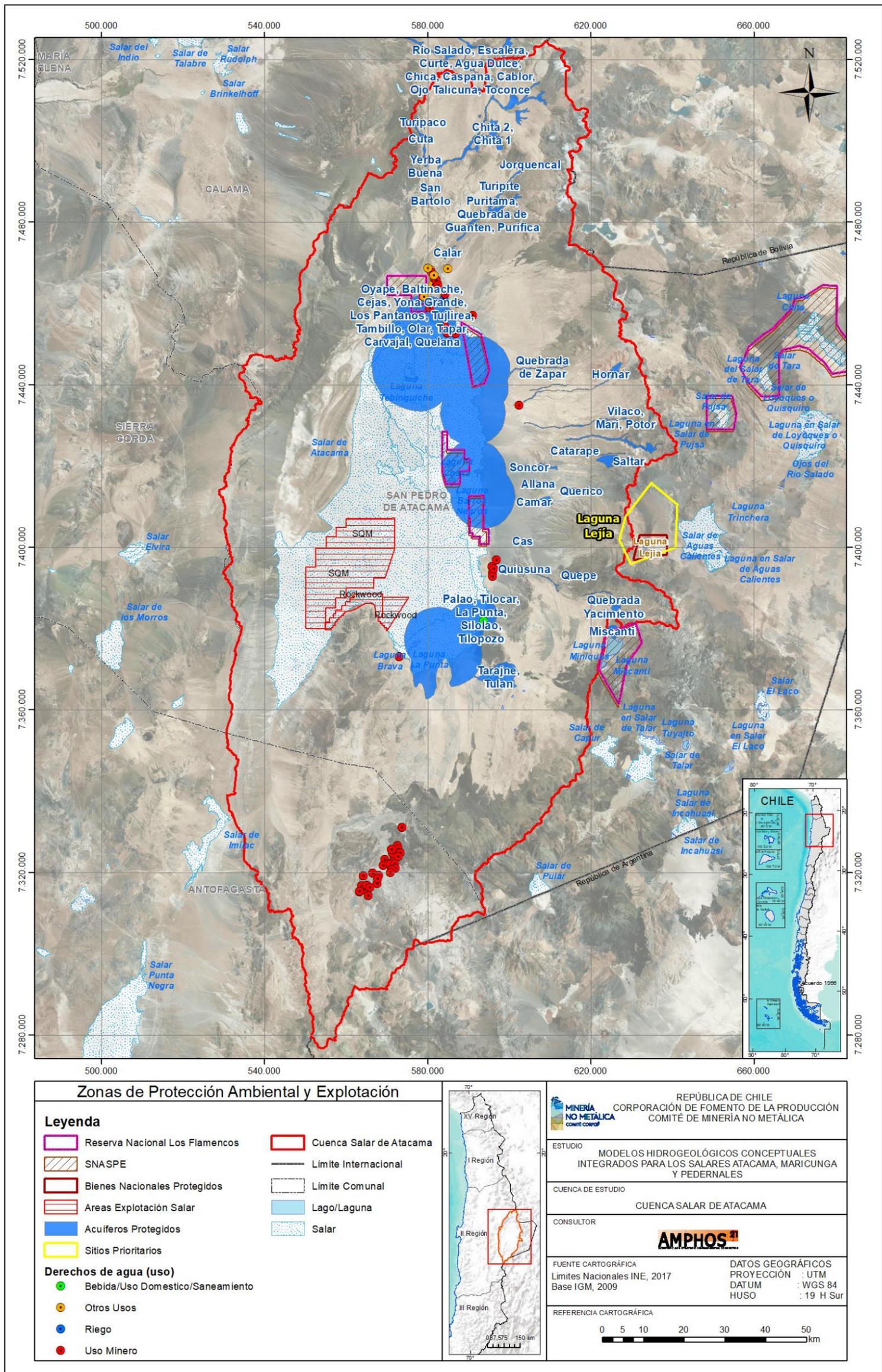


Figura 7-1: Mapa de ubicación de zonas de protección ambiental y explotación.

7.2 Sectores de explotación y derechos de agua

En la cuenca Salar de Atacama existen sectores donde se produce la explotación de aguas subterráneas y salmueras.

La explotación de agua subterránea se realiza principalmente en tres sectores: i) al norte del Salar de Atacama, ii) a lo largo del borde este del mismo y iii) en el acuífero de Monturaqui-Negrillar-Tilopozo (MNT), situado en el borde sur del salar (Figura 7-1). La explotación de los acuíferos se efectúa mediante pozos con derechos de agua otorgados. La suma del caudal otorgado mediante derechos de agua subterránea en la cuenca asciende a 3.227 l/s, según la base de datos de la II Región de Antofagasta, descargada de la página web de la DGA el mes de agosto de 2017.

El uso del agua subterránea en la cuenca según la DGA se puede clasificar en 5 ítems:

- 1) Bebida/Usos doméstico/Saneamiento.
- 2) Otros usos.
- 3) Riego.
- 4) Uso minero.
- 5) Uso indiferenciado (sin información).

El principal uso de agua subterránea en la cuenca es minería. No obstante, existen varios derechos de agua en los que no se ha diferenciado el tipo de uso, es decir, no existe información en la base de datos de la DGA.

Del caudal total nombrado anteriormente, la compañía minera de SQM tiene otorgados 450 l/s en pozos ubicados en el borde este del salar, 22 l/s corresponden a Rockwood Lithium en 3 pozos distribuidos en el sector de Tilopozo y Tucúcaro (en el borde sur del salar); 200 l/s están asociados a Minera Zaldívar (CMZ), distribuidos en 6 pozos ubicados en el área de Negrillar (caudal previsto para 2017, 2018 y 2019); y finalmente 1.375 l/s de Minera Escondida (MEL) en 24 pozos ubicados en el acuífero Monturaqui-Negrillar-Tilopozo (caudal previsto para 2017, 2018 y 2019).

La explotación de salmuera se efectúa en el núcleo del Salar de Atacama a través de Resoluciones de Calificación Ambiental (RCA) aprobadas mediante Evaluaciones de Impacto Ambiental (EIA).

Los sectores de explotación en el Salar de Atacama se ubican en el núcleo del salar y son propiedad de SQM Salar S.A y Rockwood Lithium.

La explotación de salmuera realizada por parte de SQM, según la RCA n° 0226/2006, se realiza mediante los siguientes caudales netos de explotación: 1.500 l/s entre los años 2013 y 2018, 1.600 l/s entre 2019 y 2025; y finalmente, 1.700 l/s entre 2026 y 2031.

Además, si se considera el capítulo 8.3.7 de la misma RCA n° 0226/2006, SQM tiene la siguiente regla operacional: puede reinyectar salmuera al salar de forma directa a través de los *bittern*, para poder extraer más salmuera de pozos. La cantidad adicional de salmuera que podrá bombear a medida que reinyecta son de 0,13 l/s adicionales desde una de las áreas de explotación (MOP) y 0,13 l/s adicionales más, desde otras de las áreas (SOP) por cada l/s (MOP y SOP) que se reinyecte de forma directa (*bitterns*), hasta un total de 270 l/s. Lo anterior significa que mediante la reinyección directa puede extraer 70 l/s más, que conlleva a una extracción total de, al menos, 1.570 l/s para el periodo comprendido entre 2013 y 2018. Además, podrá realizar otro tipo de reinyección (reinyección indirecta) a partir de la cual, puede explotar más salmuera de pozos.

Por otra parte, los caudales de explotación de salmuera realizada por Rockwood Lithium aprobados en la RCA n°0021/2016, son de 442 l/s.

8. Determinación de flujos de entrada y salida

En este capítulo se presenta una estimación de los principales flujos de entrada y salida al acuífero de la cuenca en estudio. Las entradas al acuífero se componen de la percolación y los caudales de escorrentía generados en la cuenca. Este último término se incluye como una entrada para el sistema subterráneo, 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 el salar, evapotranspiración en áreas con vegetación, así como las extracciones antrópicas que se efectúan en la cuenca.

8.1 Percolación

La percolación de los acuíferos altiplánicos tiene como fuente principal la precipitación que se infiltra en zonas de mayor permeabilidad, favorecida por eventos de mayor envergadura que son capaces de saturar el suelo y conducir agua hasta el acuífero (DGA-DIHA PUC, 2009). En la zona de estudio, la percolación se ha estimado de acuerdo a la metodología para la estimación de la recarga presentada por DGA-DIHA PUC (2009), que considera la litología superficial de la cuenca, la influencia de los cauces en la geomorfología y los montos de precipitación media anual. Se definieron los coeficientes de infiltración y escorrentía a partir de las características de las unidades litológicas presentes en las cuencas analizadas.

A continuación, se presenta la estimación de la percolación media anual, como la suma de una percolación directa en la zona acuífera (Per_D) dada por la precipitación que cae sobre los depósitos sedimentarios, y una percolación en la zona no acuífera (Per_L), producida por la precipitación que cae sobre la roca impermeable o semipermeable de la cuenca aportante. En este sentido las expresiones que se utilizaron para calcular el valor de la percolación son las siguientes:

- **Percolación directa (Per_D)**

$$Per_D = C_{ID} \cdot Pp \cdot A_D$$

- **Percolación lateral (Per_L)**

$$Per_L = C_{IL} \cdot C_{EL} \cdot Pp \cdot A_L$$

Donde Pp es precipitación en la cuenca (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} para la cuenca aportante al salar se definió igual a 0,14 de acuerdo a lo indicado en el capítulo 8.2, mientras que para el sector del salar se tomó un valor bajo, igual 0,02. Finalmente, C_{ID} y C_{IL} son los coeficientes 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, tal y como se observa en la 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 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 de percolación media anual en las cuencas analizadas.

Los valores de C_i de las unidades hidrogeológicas se definieron a partir de un cruce entre los rangos de permeabilidades obtenidos para cada Unidades Hidrogeológica (capítulo 5) y la calificación de la conductividad hidráulica (Tabla 5-2). Considerando la permeabilidad y los valores propuestos en la Tabla 8-1, se asignó un valor de C_i a cada unidad. 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 se presentan las unidades hidrogeológicas, los coeficientes adoptados en cada unidad y el porcentaje del área en cada subcuenca del Salar de Atacama. En el Anexo V “Balance Hídrico Atacama” se presenta un archivo Excel con la planilla de cálculo de los coeficientes. Posteriormente se calculó un coeficiente de infiltración para la zona acuífera (C_{ID}) de cada subcuenca, realizando una suma ponderada por el área de los C_i de las unidades hidrogeológicas 1 a 4. También se obtuvo el coeficiente para la zona no acuífera (C_{iL}) como la suma ponderada por el área de los C_i de las unidades hidrogeológicas 5 y 6. Los valores de C_{ID} y C_{iL} obtenidos en cada subcuenca se muestran en la Tabla 8-3.

De acuerdo a los parámetros calculados, se ha obtenido la percolación total en cada subcuenca, calculada como la suma entre percolación directa (Per_D) y percolación lateral (Per_L). Los resultados por subcuencas se muestran en la Tabla 8-3 y en total la percolación en el área de estudio es igual a 2.912 l/s.

UH	CI	Porcentaje del área de cada subcuenca																
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	0,30	1	13	10	21	21	19	2	4	18	0	3	0	0	11	2	0	0
2	0,24	5	2	10	22	11	12	29	13	18	52	32	42	54	88	92	41	60
3	0,30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	39
4	0,12	8	2	42	0	29	1	10	38	1	17	64	9	4	0	3	59	1
5	0,12	70	45	21	36	38	16	23	12	30	31	2	38	41	1	0	0	0
6	0,05	16	38	17	20	0	52	35	34	32	0	0	11	0	0	0	0	0

Tabla 8-2: Parámetros para la estimación de CID y CIL en las subcuencas del Salar de Atacama

Fuente: elaboración propia. Nota: las cifras de porcentajes se encuentran redondeadas.

Parámetro	Subcuenca																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Precipitación (mm/año)	119	105	96	92	23	80	49	66	32	29	17	26	18	20	16	12	14
Área acuífera (km ²)	168	129	902	222	85	479	1099	791	112	1332	465	772	127	777	382	278	1633
Área no acuífera (km ²)	1037	632	555	287	53	1038	1506	666	186	605	8	741	89	7	0	0	0
C _{ID}	0,17	0,28	0,17	0,27	0,20	0,27	0,21	0,16	0,26	0,21	0,16	0,22	0,23	0,25	0,24	0,17	0,26
C _{IL}	0,11	0,09	0,09	0,09	0,12	0,07	0,08	0,07	0,08	0,12	0,12	0,10	0,12	0,12	0,09	0,09	0,07
Per _D (l/s)	110	118	466	174	13	330	367	268	30	257	40	140	17	121	45	17	197
Per _L (l/s)	58	26	21	11	1	24	26	13	2	9	0	9	1	0	0	0	0
Percolación (l/s)	169	144	487	185	13	355	392	281	32	266	40	149	17	121	45	17	197

Tabla 8-3: Estimación de la percolación.

Fuente: elaboración propia.

8.2 Escorrentía superficial

La escorrentía superficial en las cuencas 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, la escorrentía se alimenta principalmente de los eventos de precipitación líquida asociadas al denominado “Invierno Altiplánico”, que va de diciembre a marzo. Durante este periodo se registra la mayor proporción de la precipitación media anual. Pese a lo anterior, se optó por caracterizar el caudal medio anual del área de estudio, ya que el objetivo es determinar 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 se ha utilizado la siguiente relación:

$$Q = C_E \cdot A \cdot Pp$$

Donde Q es el caudal medio anual (L³/T), C_E es un coeficiente de escorrentía, A (L²) corresponde al área de la cuenca y Pp (L/T) es la precipitación media anual.

Para la determinación del coeficiente de escorrentía se utilizaron los registros de caudal medio en la estación fluviométrica río San Pedro en Cuchabrachi y los aforos en la quebrada de Jerez en Toconao. Es posible suponer que estas estaciones registran la mayor parte del flujo de recarga y la escorrentía superficial generada en la cuenca aportante respectiva a cada estación. Esto se explica ya que las estaciones se ubican aguas abajo de extensos tramos de río que pasan sobre el basamento (ver Figura 8-1 para el caso de la estación en el río San Pedro). Así, el caudal subterráneo tendría que aflorar en las zonas de basamento, generando un flujo base importante. Por otro lado, se observa que el caudal medio mensual registrado en la estación del río San Pedro es relativamente constante durante todo el año (probabilidad de excedencia de 50%), lo que es acorde al supuesto antes descrito. Finalmente, en el sector donde se ubica la estación del río San Pedro, el relleno sedimentario es estrecho (50 a 150 m de ancho). Considerando lo anterior, se calculó el valor de C_E tal que satisfaga el siguiente balance:

$$Q_E + Q_S = Q + Per_p - EVT$$

Donde Q_E (L³/T) es el caudal medio anual registrado en la estación y Q_S (L³/T) es el caudal subterráneo bajo la estación, que se supuso igual a un 10% del caudal superficial registrado. Per_p (L³/T) es la percolación en la cuenca aportante a la estación. Finalmente, EVT (L³/T) es la evapotranspiración que ocurre en las áreas con vegetación ubicadas en la cuenca aportante a la estación, que se estimó de acuerdo a la metodología expuesta en el capítulo 8.5.

Se determinó un valor de C_E igual a 0,19 y 0,09 (ver Tabla 8-4) que permite cerrar el balance propuesto en la ecuación anterior en cada cuenca. Se adopta un valor de C_E para las cuencas igual al promedio (0,14). Este valor se utilizó para calcular la escorrentía en las subcuencas aportantes al salar. Para el sector del salar se tomó un valor bajo, igual 0,02.

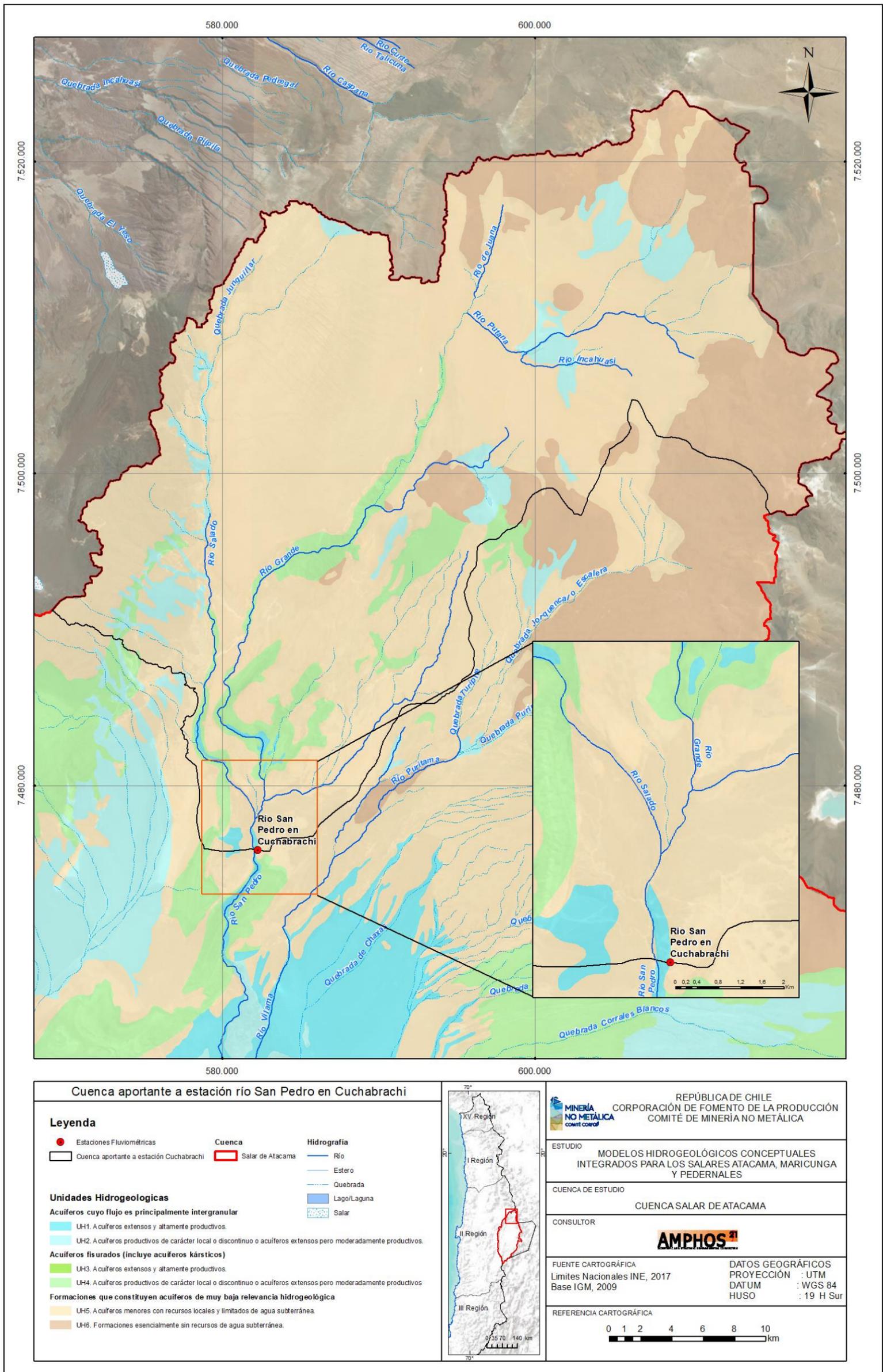


Figura 8-1: Cuenca aportante a estación San Pedro en Cuchabrachi.

A continuación se calcularon los caudales de escorrentía en cada subcuenca, según se muestran en la Tabla 8-5. En total el caudal de escorrentía generado en el área de estudio es igual a 3.884 l/s.

Q_E (l/s)	EVT (l/s)	Per _P (l/s)	Q_S (l/s)	Q (l/s)	Área (km ²)	Precipitación media anual (mm/año)	C_E (-)
770	178	169	77	856	1196,4	119	0,19
60	27	17	6	76	228	123	0,09

Tabla 8-4: Estimación de C_E .

Fuente: elaboración propia.

Subcuenca	Área (km ²)	Precipitación media anual (mm/año)	Q (l/s)	Subcuenca	Área (km ²)	Precipitación media anual (mm/año)	Q (l/s)
1	1.196	119	631	10	1.918	29	247
2	754	105	353	11	468	17	34
3	1.444	96	616	12	1.499	26	174
4	504	92	206	13	214	18	17
5	137	23	14	14	777	20	20
6	1.502	80	530	15	378	16	8
7	2.584	49	564	16	275	12	4
8	1.444	66	426	17	1.618	14	30
9	296	32	42	Total	17.007	54	3.884

Tabla 8-5: Estimación de escorrentía en el área de estudio.

Fuente: elaboración propia.

El valor de C_E para el sector del salar se fijó con un valor bajo (0,02). Es posible fijar dicho valor ya que en el salar se registran las menores precipitaciones de toda la cuenca (menor a 20 mm/a). Además, la costra salina (parte superior de los depósitos evaporíticos) del salar presenta un espesor relativamente importante, especialmente cuando está formada por halita y yeso, que tiene un espesor de 50 a 100 cm (Golder 2017). Esto reduce de forma importante la escorrentía que se puede generar, ya que la costra podría retener la mayor parte de la precipitación. Finalmente, el salar es especialmente plano, lo que se asocia con una menor generación de escorrentía.

Según se ha indicado, el caudal total de escorrentía estimado (3.884 l/s) puede infiltrar en parte en su transcurso por los cauces y también llegar hasta la parte baja de la cuenca, donde infiltra recargando al acuífero. Considerando la suma total de los registros pluviométricos y aforos de la cuenca, es posible estimar que aproximadamente 2.530 l/s (65% del caudal de escorrentía) se infiltran a lo largo de los cauces que componen la red hídrica de la cuenca aportante al salar.

8.3 Balance hidrometeorológico

El balance hidrometeorológico constituye una parte fundamental del modelo conceptual hidrogeológico, ya que explica el funcionamiento e interacción de las precipitaciones al caer sobre la cuenca aportante al salar. En la Figura 8-2 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:

$$\text{Precipitación (Pp)} - \text{Percolación (Per)} - \text{Evaporación (Ev)} - \text{Escorrentía (Q)} = \\ \text{Variación del agua en el suelo } (\Delta V)$$

Dónde:

Precipitación (Pr): Es el agua que precipita sobre la cuenca. Ocasionalmente la precipitación puede ocurrir en forma 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, infiltrándose en sus cauces o llegando hasta la parte baja de la cuenca, en donde recarga al acuífero. Dentro del balance hidrometeorológico de las precipitaciones que caen sobre la cuenca aportante al salar, se considera como una salida.

En la Tabla 8-6 se presentan los resultados de los principales componentes del balance hidrometeorológico obtenidos en las cuencas.

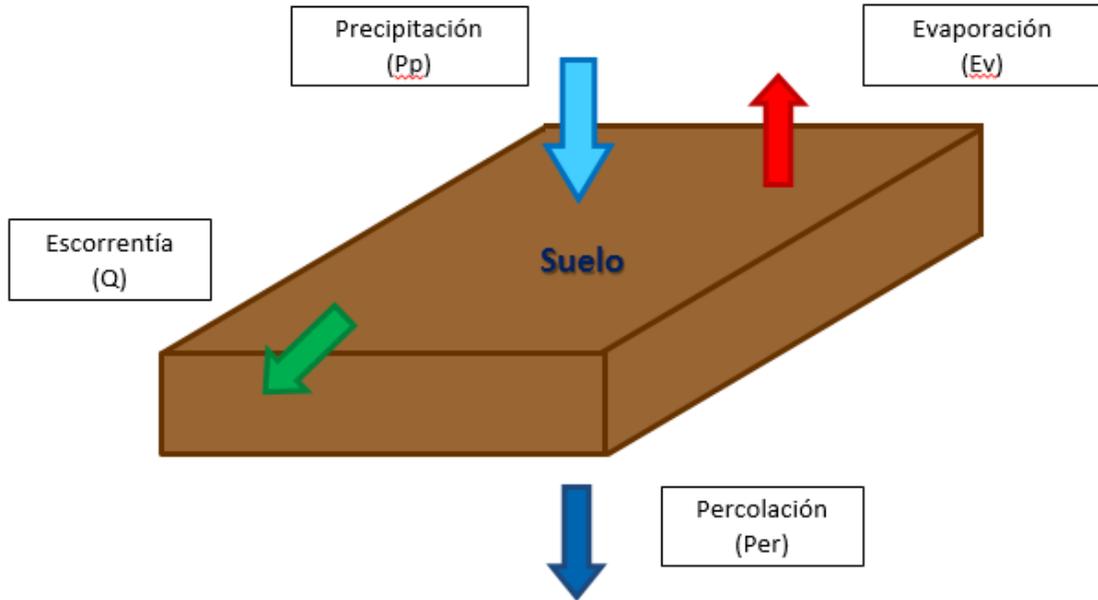


Figura 8-2: Sistema hidrometeorológico simplificado de la precipitación al caer al suelo.

Fuente: elaboración propia

Área Total (Km ²)	Precipitación media anual (Pp) (mm/a)	Precipitación media anual (Pp) (l/s)	Percolación (Per) (l/s)	Caudal de Escorrentía (Q) (l/s)	Evaporación (Ev) (l/s)	Evaporación (Ev) (%)
17.007	54	29.049	2.912	3.884	22.253	77

Tabla 8-6: Resultados del balance hidrometeorológico.

Fuente: elaboración propia

8.4 Evaporación en el salar

En este capítulo se explica la evaporación que se produce desde la superficie freática del Salar de Atacama. Se consideraron dos escenarios de evaporación, uno para la situación en régimen natural y un escenario de explotación de salmuera, atendiendo a que durante la explotación el nivel freático de salmuera se encuentra a una mayor profundidad, lo que se asocia a una menor evaporación. La evaporación de este último escenario se define como la evaporación media registrada durante los años 2000 a 2015.

Para estimar la evaporación que ocurre en el Salar de Atacama, se han utilizado las curvas de evaporación presentada por Golder (2017), las que se asocian a los suelos con estratificación salina (costra salina suave), limos salinos (costra salina clásica) y sulfato granular (costra de halita y yeso). Estas curvas se obtuvieron a partir de mediciones con domos, desarrolladas entre abril de 2011 y septiembre de 2015. Estos escenarios quedan 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 m. Los escenarios descritos se presentan, respectivamente, entre la

Figura 8-3 y Figura 8-5. Las ecuaciones de las curvas ajustadas se presentan a continuación:

$$\begin{array}{ll}
 \text{Estratificación salina:} & E(z) = ET_0 \begin{cases} e^{-13,70z} & z < 0,10 \text{ m} \\ 0,04z^{-0,80} & z \geq 0,10 \text{ m} \end{cases} \\
 \text{Limos Salinos:} & E(z) = ET_0 \begin{cases} e^{-114,89z} & z < 0,03 \text{ m} \\ 0,02z^{-0,13} & z \geq 0,03 \text{ m} \end{cases} \\
 \text{Sulfatos Granulares:} & E(z) = ET_0 \begin{cases} e^{-58,25z} & z < 0,04 \text{ m} \\ 0,02z^{-0,49} & z \geq 0,04 \text{ m} \end{cases}
 \end{array}$$

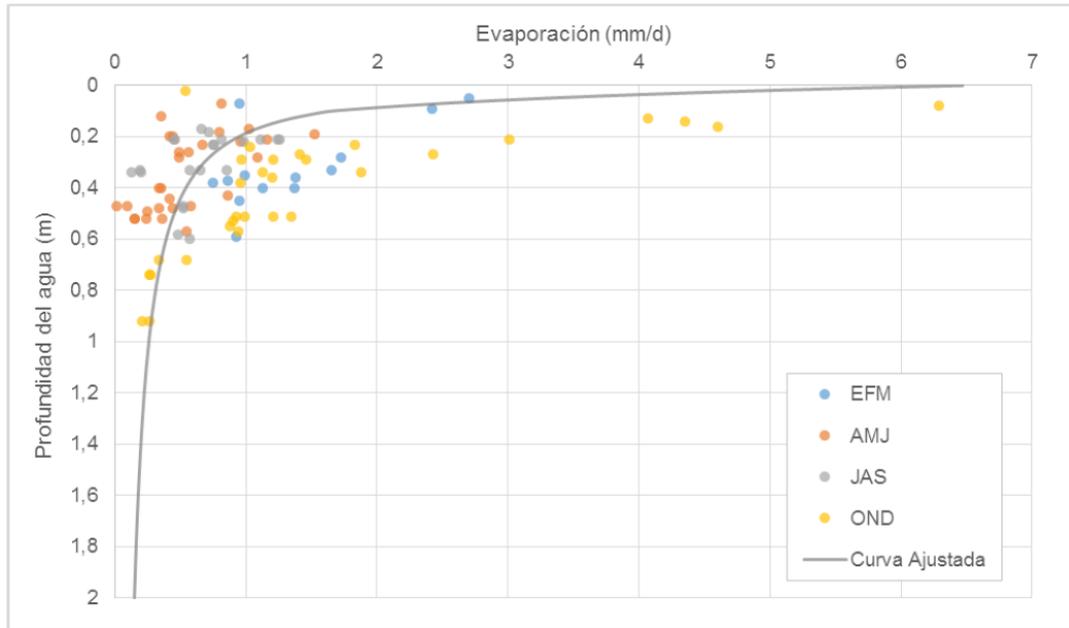


Figura 8-3: Curvas de evaporación contra profundidad en la estratificación salina.

Fuente: Golder (2017).

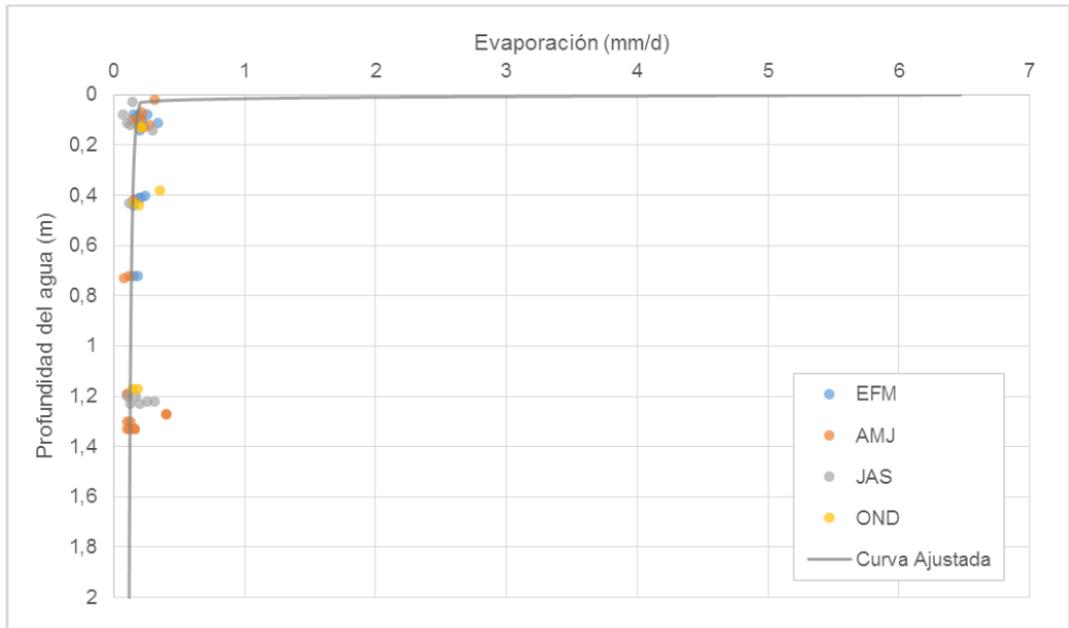


Figura 8-4: Curvas de evaporación contra profundidad del limo salino.

Fuente: Golder (2017).

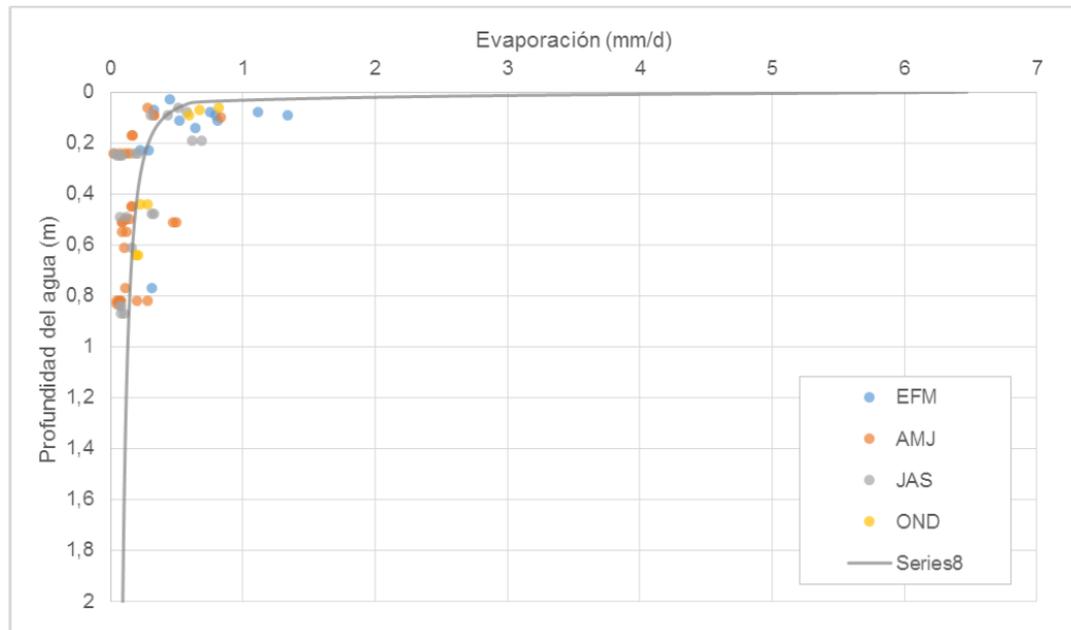


Figura 8-5: Curvas de evaporación contra profundidad del sulfato granular.

Fuente: Golder (2017).

La Figura 8-6 muestra 46 puntos con mediciones de la profundidad del nivel piezométrico en la zona de estudio. Como se puede observar, hay zonas extensas en las que no se cuenta con las mediciones de profundidad del nivel. Sin embargo, es posible aplicar técnicas de análisis de imágenes satelitales que permiten detectar sectores con presencia de aguas superficiales y aguas subterráneas someras (Ordoyne and Friedl, 2008; Li et al. 2015). Así, se definieron zonas evaporantes 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 29-10-2016. Se seleccionó esta fecha ya que no se registraron precipitaciones previas a la fecha de captura de la imagen en más de 30 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 8-6 c. 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 8-6 c, se observan concentraciones de humedad en amplios sectores de la zona marginal, así como en el delta del río San Pedro. La Figura 8-7 muestra la profundidad mayor a cero contra el índice de humedad calculado. Se observa que para valores de índice de humedad mayores a -0,08, las profundidades son menores a 0,5 m, con la excepción de una medición que registra 0,92 m.

Considerando los datos mostrados, es posible suponer que las zonas con índice de humedad mayor a -0,08 tienen una napa somera, con profundidades de hasta 0,5 m. Así, se considera que estos suelos tienen un alto contenido de humedad.

La Figura 8-6 c también muestra mediciones en que el índice de humedad queda bajo el umbral de -0,08. Los datos muestran que esta zona tendría la napa a una mayor profundidad. De acuerdo a lo mostrado en la Figura 8-7, estas zonas tendrían profundidades que oscilan de 0,45 a 3,9 m, con un valor medio igual a 1,54 m y corresponden a suelos con un bajo contenido de humedad ubicados principalmente en el núcleo y una fracción menor en la zona marginal.

Se calculó el índice de brillo o TCBI por sus siglas en inglés (*Tassled Cap Brightness Index*) (ver Figura 8-6 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).

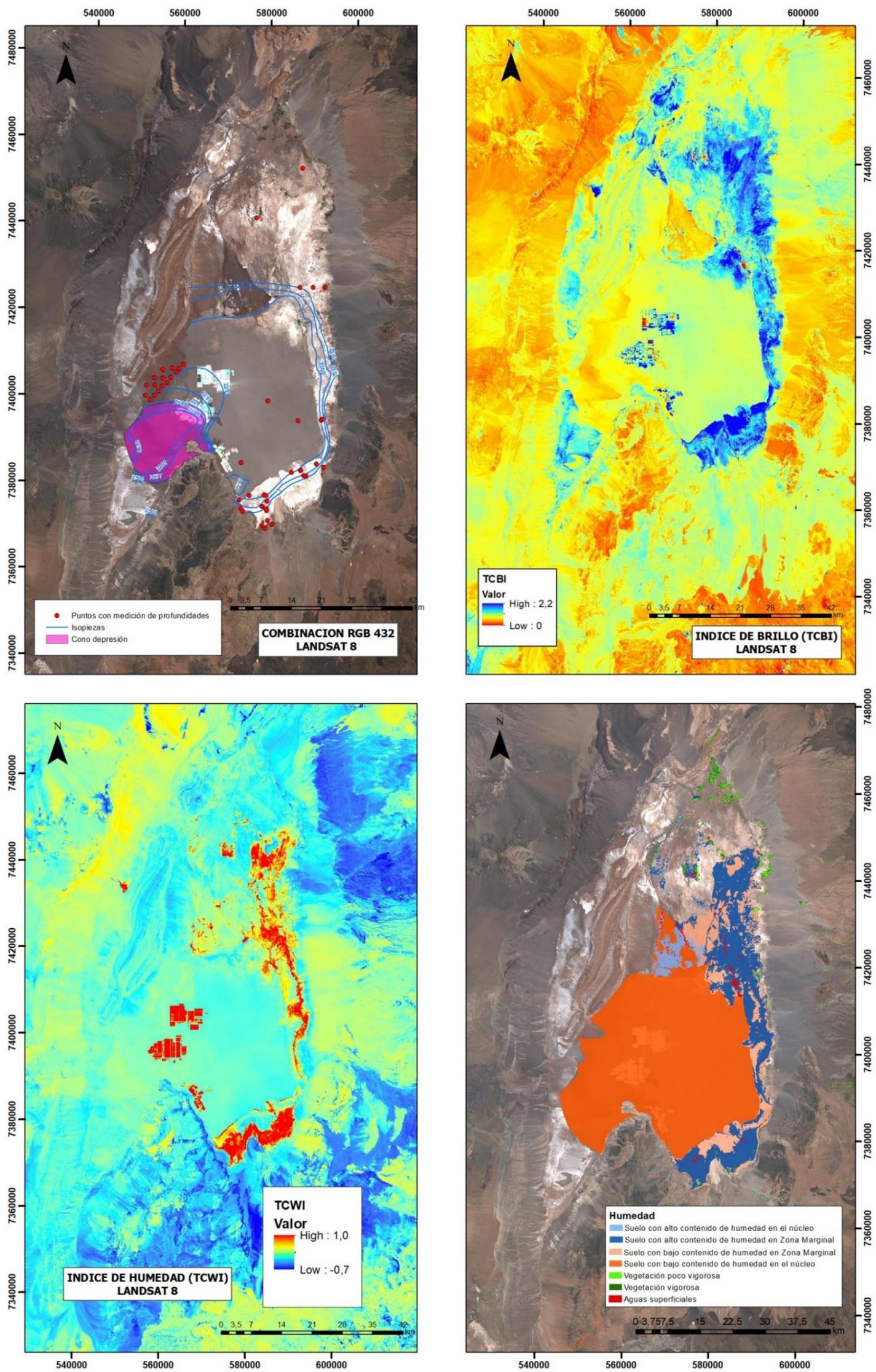


Figura 8-6: a) Imagen satelital. b) Índice de brillo (TCBI). c) Índice de humedad (TCWI). d) Reclasificación.

Fuente: Elaboración propia.

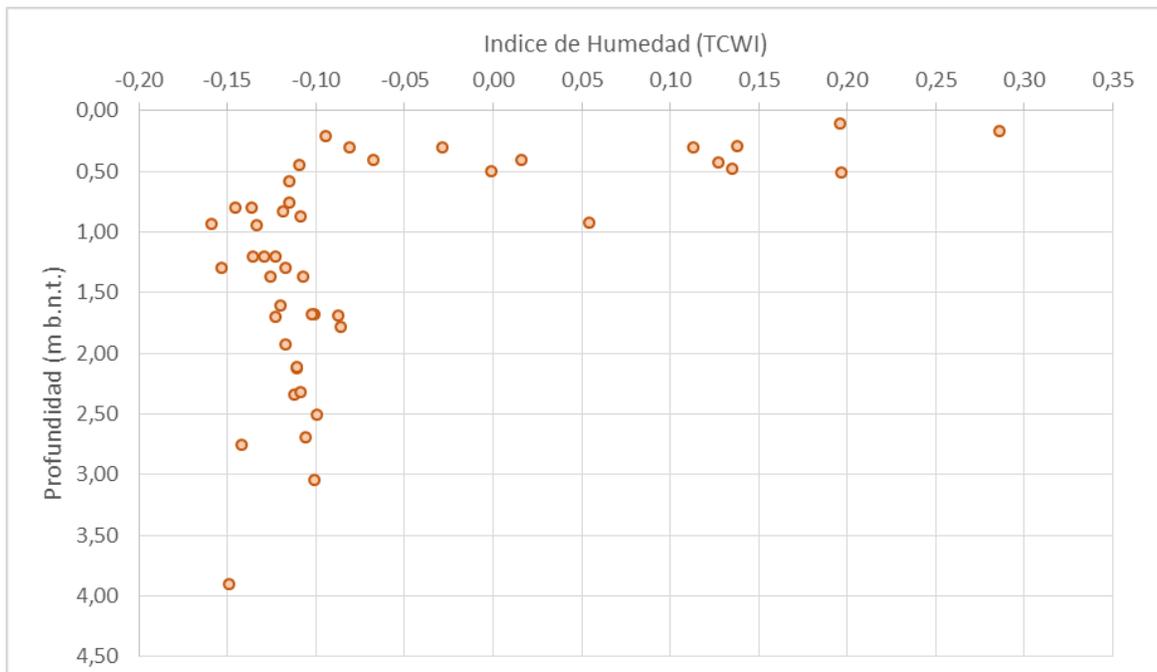


Figura 8-7: Curvas de profundidad contra índice de humedad (TCWI).

Fuente: Elaboración propia.

El índice de brillo 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, en esta aplicación se consideraron valores menores a 0,35.

Se realizó una reclasificación de las áreas considerando la imagen satelital de la zona, las imágenes espectrales generadas (TCWI, TCBI y NDVI) y las firmas espectrales detectadas por el satélite. Esta reclasificación permitió determinar las áreas asociadas a una superficie libre de agua (en base al índice de brillo), a suelos con un alto contenido de humedad y suelos con bajo contenido de humedad (en base al índice de humedad). Se realizó una distinción de las zonas antes descritas dependiendo si se ubican en el núcleo del salar o sobre la zona marginal, ya que el tipo de costra salina y la densidad del fluido afectan a la evaporación que ocurre en cada zona. La Tabla 8-7 presenta un resumen con las áreas asociadas a las zonas antes descritas. Se debe tener en cuenta que el área con bajo contenido de humedad en el núcleo (escenario con extracciones) se calculó descontando el área asociada al cono de descenso producido por los bombeos de salmuera, así como las áreas

que quedan bajo las obras de SQM y Rockwood. Estas áreas se descuentan, ya que las obras están construidas sobre el mismo salar, evitando que ocurra la evaporación desde la napa del salar.

Zona		Tipo de suelo	Área Total (Km ²)	Evaporación potencial (mm/d)
Agua superficial		-	5,5	6,2
Suelo con alto contenido de humedad	Zona marginal	Estratificación salina	500,5	6,2
	Núcleo	Sulfato granular	75,3	4,1
Suelo con bajo contenido de humedad	Zona marginal	Estratificación salina	273,6	6,2
	Núcleo reg. natural	Promedio entre sulfato granular y limo arcilloso	1.372,7	4,1
	Núcleo reg. extracciones		992,6	4,1

Tabla 8-7: Área de zonas evaporantes en el Salar de Atacama

A cada zona evaporante se le asocia una curva de evaporación contra profundidad y un valor de evaporación potencial. La evaporación potencial para el agua salobre y la salmuera se estima a partir de las mediciones de evaporación en la estación Planta SCL, tomando valores iguales a 6,2 mm/d para el agua salobre y 4,1 mm/d para la salmuera. Estos valores se obtuvieron considerando un coeficiente de bandeja igual a 0,67 (Golder, 2017). Se asignó la curva perteneciente a la estratificación salina a los suelos ubicados en la zona marginal, mientras que a las zonas del núcleo se les asoció la curva de sulfato granular y un promedio entre esta curva y la del limo salino para las zonas alto y bajo contenido de humedad respectivamente

Se puede observar que tanto el índice de humedad como el de brillo resaltan las pozas de evaporación de salmuera pertenecientes a las compañías mineras que operan en el núcleo del salar, por ser zonas con alto contenido de humedad y, por lo tanto, pueden ser detectadas por las imágenes satelitales.

Para definir la tasa de evaporación de las zonas obtenidas en la reclasificación, se asocia una profundidad del nivel estático del agua a cada una de ellas. El agua superficial se encuentra representada por una profundidad igual a cero y su extensión se determina usando el índice de brillo. Se le asignó una profundidad igual a 0,40 m al suelo con alto contenido de humedad (tanto en el núcleo como en la zona marginal) y para los suelos con un bajo contenido de humedad en la zona marginal se asignó una profundidad de 1,54 m. Los valores antes descritos corresponden al promedio que se tiene en las mediciones de profundidad en cada sector, considerando el umbral de -0,08 definidos para el índice de humedad. Se consideró que para ambos escenarios la profundidad sería la misma, ya que la zona marginal no presenta tendencias en los niveles piezométricos.

Finalmente, para los suelos dentro del núcleo del salar clasificados con un bajo contenido de humedad, se asignó una profundidad media igual a un 0,55 m en el escenario de régimen natural y de 1,15 m para el escenario de explotación de salmuera. Estas profundidades se estimaron a partir de los datos presentados por CSIC (2017) para los años 1986 y un valor intermedio entre 2005 y 2010 respectivamente.

El procedimiento de cálculo ha sido el siguiente:

- Estimar el área asociada a cada la zona de evaporación i , A_i [km^2].
- Asociar a cada zona de evaporación una profundidad de la napa representativa (según cada escenario) y una curva de evaporación.
- Calcular con la curva elegida la tasa de evaporación correspondiente a la profundidad media asociada, E_{vi} [$\frac{mm}{día}$].
- Calcular el flujo de evaporación de cada zona, $F_i = A_i \cdot E_{vi}$
- Estimar el flujo neto del total de las N zonas:

$$F_{neto} = \sum_{i=1}^N F_i$$

La Tabla 8-8 y Tabla 8-9 presenta los valores obtenidos para la estimación de la evaporación desde el Salar de Atacama para los escenarios de régimen natural y de extracciones. Se ha considerado un rango posible de evaporación con el objetivo de abordar la incertidumbre que existe en la clasificación de las áreas, en la asignación de la profundidad asociada y en la elección de las curvas de evaporación. Así, se estima que la evaporación del Salar de Atacama se encuentra entre 5.050 y 6.300 l/s en el régimen natural y de 4.450 a 5.550 en el régimen de operación. En el Anexo V se puede revisar la metodología utilizada para determinar el rango de evaporación.

Zonas evaporantes identificadas con imágenes satelitales		Área Total (Km ²)	Rango de profundidad (m b.n.t.)	Tasa de Evaporación (mm/d)	Evaporación calculada (EVS _{RN}) (l/s)
Lagunas (evaporación en lámina libre)		5,5	-	5,88 a 6,50	374 a 414
Suelo con alto contenido de humedad	Zona marginal	500,5	0,40 (0,36 a 0,44)	0,45 a 0,59	2.627 a 3.410
	Núcleo	75,3	0,40 (0,36 a 0,44)	0,12 a 0,14	102 a 125
Suelo con bajo contenido de humedad	Zona marginal	273,6	1,54 (1,39 a 1,69)	0,15 a 0,20	488 a 634
	Núcleo	1.372,7	0,55 (0,50 a 0,61)	0,09 a 0,11	1.464 a 1.729
Total					5.057 a 6.311
Rango adoptado					5.050 a 6.300

Tabla 8-8: Evaporación estimada para el Salar de Atacama en régimen natural.

Zonas evaporantes identificadas con imágenes satelitales		Área Total (Km ²)	Profundidad (m b.n.t.)	Tasa de Evaporación (mm/d)	Evaporación calculada (EVSRE) (l/s)
Lagunas (evaporación en lámina libre)		5,5	-	5,88 a 6,50	374 a 414
Suelo con alto contenido de humedad	Zona marginal	500,5	0,40 (0,36 a 0,44)	0,45 a 0,59	2.627 a 3.410
	Núcleo	75,3	0,40 (0,36 a 0,44)	0,12 a 0,14	102 a 125
Suelo con bajo contenido de humedad	Zona marginal	273,6	1,54 (1,39 a 1,69)	0,15 a 0,20	488 a 634
	Núcleo	992,6	1,15 (1,04 a 1,27)	0,07 a 0,09	840 a 987
				Total	4.432 a 5.569
				Rango adoptado	4.450 a 5.550

Tabla 8-9: Evaporación estimada para el Salar de Atacama en régimen de explotación (2000 a 2015).

8.5 Evapotranspiración en áreas con vegetación

Se identificaron las zonas con vegetación (vegas y bofedales y áreas de cultivo) que se ubican en la cuenca del Salar de Atacama. Para realizar esta identificación se calculó el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI por sus siglas en ingles). Este índice multi espectral fue desarrollado por Tucker (1979) y combina las mediciones de reflectancia espectral de las bandas rojas e infrarrojo cercano (NIR por sus siglas en ingles). El índice NDVI entrega una medida de la actividad fotosintética de la vegetación verde y ha sido utilizado ampliamente para monitorear el comportamiento dinámico de la vegetación (Pettorelli *et al.* 2005; Beck *et al.* 2006; Vrieling *et al.* 2011). A partir de este índice se definieron las áreas con vegetación dispersa o poco vigorosa (NDVI entre 0,2 y 0,4) y áreas con vegetación 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 fue asignada 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 8-10 presenta los valores calculados de evapotranspiración en el área de estudio. En total la evapotranspiración es igual a 1.126 l/s. La evapotranspiración potencial se obtuvo a partir de los registros de la estación Monturaqui, considerando un coeficiente de bandeja igual a 0,67 (Golder, 2017).

Clase	Área Total (Km ²)	Coef. De cultivo	Tasa de Evapotranspiración (mm/d)	Evapotranspiración calculada (l/s)
Vegetación abundante y vigorosa	9,8	1,00	4,89	557
Vegetación dispersa o poco vigorosa	40,3	0,50	2,44	569
			Total	1.126

Tabla 8-10: Evapotranspiración estimada en el área de estudio.

8.6 Extracciones antrópicas

En la Tabla 8-11 se han presentado las extracciones antrópicas realizadas en el área de estudio. Se realizó una separación entre extracciones e inyecciones de salmuera realizadas por SQM. La tabla también muestra el valor promediado de las extracciones para realizar el balance hídrico en el escenario de explotación (caudal promedio entre los años 2000 y 2015).

Año	Agua fresca				Salmuera			Totales	
	MEL	CMZ	Rock. Lithium	SQM	SQM Extra.	SQM Inye.	Rock. Lithium	Agua fresca	Salmuera
	(l/s)	(l/s)	(l/s)	(l/s)	(l/s)	(l/s)	(l/s)	(l/s)	(l/s)
2000	568	146	5	0	940	351	81	719	671
2001	629	141	6	0	734	160	81	776	656
2002	866	132	7	0	758	161	88	1.005	686
2003	1.175	134	7	0	788	209	90	1.316	668
2004	1.360	144	7	0	773	197	87	1.511	663
2005	1.318	136	4	0	871	281	111	1.458	701
2006	1.328	174	6	240	848	256	116	1.748	708
2007	1.320	169	7	240	902	286	121	1.736	737
2008	1.388	172	7	240	948	278	193	1.807	863
2009	1.338	192	9	240	886	284	121	1.779	722
2010	1.238	178	8	240	1.302	224	199	1.664	1.277
2011	1.060	217	8	240	1.522	243	183	1.525	1.462
2012	1.200	219	8	240	1.508	280	185	1.667	1.413
2013	1.303	216	6	240	1.728	308	141	1.765	1.561
2014	1.309	184	6	240	1.767	320	133	1.739	1.580
2015	1.399	195	17	240	1.869	382	134	1.851	1.621
					Promedio extracciones 2000-2015			1.504	999

Nota: MEL corresponde a Minera Escondida y CMZ corresponde a compañía Minera Zaldívar.

Tabla 8-11: Extracciones antrópicas de salmuera y aguas fresca

Nota: Las extracciones totales de salmuera corresponden al valor neto, descontando las reinyecciones.

8.7 Estimación de caudales subterráneos de aporte al núcleo

A partir de las isopiezas estimadas, de la información hidrogeológica recopilada (K, T, S) y la geometría de los acuíferos identificados, ha sido posible realizar una primera aproximación del caudal subterráneo pasante en los bordes del Salar de Atacama. Los principales acuíferos forman parte y que recargan al Salar de Atacama son los siguientes:

- Acuífero MNT (al sur)
- Acuífero aluvial borde este junto con el borde sureste.
- Acuífero aluvial borde norte – zona marginal (delta de San Pedro).

Para calcular el caudal subterráneo se asume que el medio es homogéneo e isótropo y se aplica la *ley de Darcy*, que se describe a continuación:

$$Q = k \frac{h_i - h_f}{L} A = k * i * A$$

Donde;

Q = Caudal en m³/s

L = longitud en metros en la dirección de flujo subterráneo donde se quiere calcular el gradiente hidráulico

k = constante del valor de permeabilidad (permeabilidad hidráulica)

A = Área de sección transversal. Tiene en cuenta el espesor saturado del acuífero (b) y la sección del acuífero perpendicular al flujo subterráneo (Sección).

h_i: potencial hidráulico inicial

h_f: potencial hidráulico final

i: gradiente hidráulico

En el mapa de la Figura 8-8 se han proyectado las tres secciones donde se han calculado los principales caudales subterráneos y en la Tabla 8-12 se presenta la síntesis de las variables hidrogeológicas aplicadas en cada sección acuífera. Debido al factor de incertidumbre que se dispone en cada variable que se aplica en el cálculo del caudal, se ha estimado un caudal mínimo y otro máximo, para establecer un rango probable. De esta forma, se obtiene que el caudal total que recarga al Salar está comprendido entre 3.680 y 4.050 l/s.

Parámetros	Acuífero aluvial borde este y borde sur (sección 1)	Acuífero aluvial borde norte - zona marginal (sección 2)	Acuífero MNT (sección 3)
Sección (m)	72.300	29.100	9.800
k ₁ (máx)	35	25	19
k ₁ (min)	25	20	
b ₁ (máx)	50	40	30
b ₂ (min)	35	20	20
i	0,0032	0,00085	0,007
Caudal min. (l/s)	3.280	100	300
Caudal máx. (l/s)	3.350	300	450

Tabla 8-12: Estimación de caudales subterráneos a partir de la piezometría elaborada (agosto 2013).

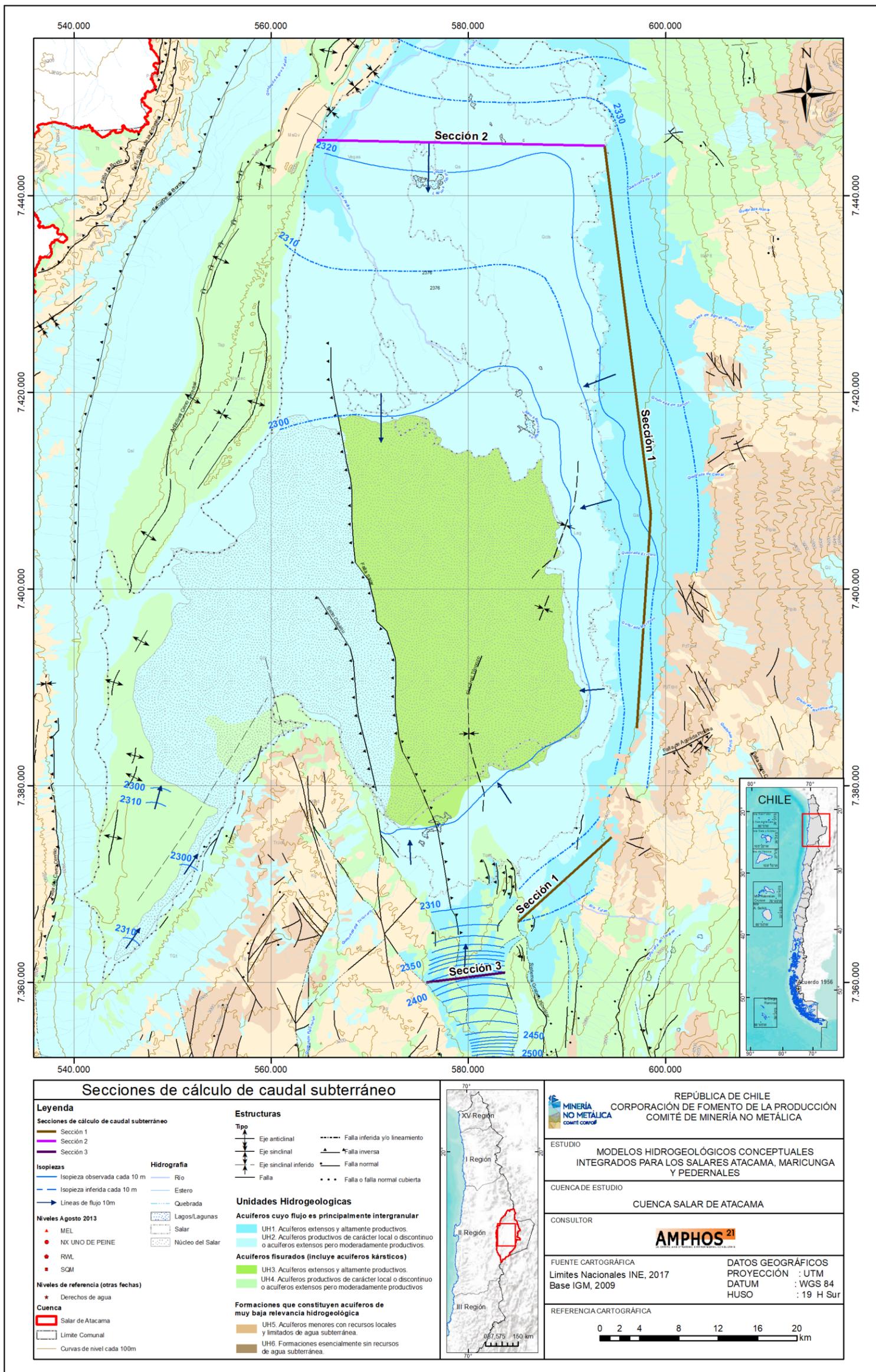


Figura 8-8: Distribución de las secciones de cálculo de caudal.

Fuente: elaboración propia.

9. Balance hídrico del acuífero

El balance hídrico corresponde a un análisis en que se suman las entradas y las salidas de agua (superficial y subterránea) en un sistema hidrogeológico. La diferencia entre entradas y salidas del sistema son iguales al cambio en el volumen almacenado (almacenamiento) del sistema hidrogeológico o acuíferos.

El balance hídrico de la cuenca Salar de Atacama se ha realizado teniendo en cuenta la superficie total de la cuenca hidrográfica y las componentes descritas en los capítulos anteriores, según el siguiente principio de conservación de masas:

$$\text{Entradas} = \text{salidas} \pm \text{variación del almacenamiento } (\Delta S)$$

9.1 Resultados del balance hídrico

El balance hídrico de largo plazo en el acuífero de la cuenca Salar de Atacama se realizó para los escenarios de régimen natural y de explotación, se han considerado los principales componentes de la recarga y la descarga, los cuales se detallan a continuación. Se ha determinado un rango para cada componente del balance hídrico. La metodología utilizada para definir los valores se encuentra detallada en la nota técnica n° 6, adjunta en el Anexo 5.

Entradas al sistema:

- Percolación: se distinguen los casos de percolación directa (precipitación sobre suelo permeable) y percolación lateral (precipitación sobre roca impermeable que infiltra en otras zonas luego de escurrir). La suma de ambas según se calculó en el capítulo 8.1, entrega un resultado entre **2.600 l/s y 3.200 l/s**.
- Recarga por escorrentía: constituye una entrada al sistema subterráneo no contabilizada en la percolación. Este término considera la porción del caudal superficial que se infiltra en los cauces, 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 se encuentra entre **3.500 l/s y 4.300 l/s**.

Salidas del sistema:

- Evaporación en el salar: se ha efectuado una estimación de la evaporación desde la lámina libre de agua y desde el nivel freático somero en el Salar de Atacama (ver capítulo 8.4), obteniéndose un rango para esta variable de **5.050 a 6.300 l/s** para el escenario en **régimen natural** y de **4.450 a 5.550 l/s** para el escenario en **régimen de explotación**.
- Evapotranspiración en áreas con vegetación: Se estimó la evapotranspiración que ocurre en los sectores con vegetación en la cuenca del Salar de Atacama (ver capítulo 8.5). Esta componente varía entre **1.000 l/s y 1.250 l/s**.
- Extracciones antrópicas: Se determinaron las extracciones antrópicas realizadas en el área de estudio para el escenario en **régimen de explotación**. Se consideran las extracciones promedio de salmuera y agua fresca realizadas por las compañías mineras entre los años 2000 a 2015 (ver capítulo 8.6). Las extracciones de agua fresca están comprendidas entre **1.450 l/s y 1.600 l/s**, mientras que las extracciones de salmuera pueden variar entre **950 l/s y 1.050 l/s**.

Los balances hídricos para las cuencas del Salar de Atacama se presentan en la Tabla 9-1 y Tabla 9-2. La evaporación desde el salar es la componente principal de las salidas en régimen natural y presenta una incertidumbre en su estimación. Esta incertidumbre proviene de las dificultades asociadas a la interpolación de los datos de profundidad y a la elección de las curvas de evaporación construidas a partir de datos tomados en un sector particular del salar. Considerando esto, es recomendable caracterizar adecuadamente la evaporación desde el núcleo del salar, esto podría lograrse a partir de mediciones de campo, junto con la instalación de punteras (pozos someros) que permitan determinar la profundidad asociada a cada medición de evaporación.

Entradas (l/s)		Salidas (l/s)	
Percolación	2.600 a 3.200	Evaporación en el salar	5.050 a 6.300
Escurrentía	3.500 a 4.300	Evapotranspiración en áreas con vegetación	1.000 a 1.250
		Extracciones antrópicas Salmuera	50
Total	6.100 a 7.500	Total	6.100 a 7.600

Tabla 9-1: Balance hídrico en el acuífero en régimen natural (años 80).

Entradas (l/s)		Salidas (l/s)	
Percolación	2.600 a 3.200	Evaporación en el salar	4.450 a 5.550
Escorrentía	3.500 a 4.300	Evapotranspiración en áreas con vegetación	1.000 a 1.250
		Extracciones antrópicas salmuera	950 a 1.050
		Extracción neta de agua fresca	1.450 a 1.600
Total	6.100 a 7.500	Total	7.850 a 9.450

Tabla 9-2: Balance hídrico en el acuífero en régimen de explotación (promedios y tasas representativas del periodo 2000 a 2015).

La Figura 9-1 y Figura 9-2 muestran vistas esquemáticas de los balances hídricos. A partir de los resultados del balance hídrico se observa que en régimen natural las entradas son prácticamente igual a las salidas debido a que la profundidad del nivel de agua subterránea es constante en el tiempo (por ejemplo, pozo 2037), mientras que en régimen de explotación las salidas son superiores a las entradas y por lo tanto, existe una variación del almacenamiento.

El balance hídrico en régimen de explotación, presenta un déficit de entradas con respecto a las salidas, concretamente, la diferencia es del orden de un 21%, lo que significa que existe una variación de almacenamiento en el acuífero de aproximadamente de entre 1.750 y 1.950 l/s.

La variación de almacenamiento también se ha identificado a partir de la evolución temporal del nivel piezométrico en los acuíferos del sistema hidrogeológico (acuífero salar de Atacama, acuífero aluvial borde este y acuífero MNT) (Anexo I), los que presentan bombeos de agua subterránea.

Es posible hacer una aproximación de la variación de almacenamiento para verificar la consistencia del resultado obtenido del balance hídrico mediante la siguiente relación:

$$\Delta S = T_m \cdot A \cdot \phi$$

Donde ΔS es la variación en almacenamiento (L^3/T), T_m es la tasa de descenso promedio anual del nivel piezométrico (L/T), A es el área donde se proyectan los descensos (áreas de influencia) (L^2) y ϕ es la porosidad efectiva. Los valores que tiene en cuenta la ecuación se detallan en la nota técnica n°6 (Anexo V). Los resultados obtenidos son los siguientes:

La variación de almacenamiento para los acuíferos de agua fresca está comprendida entre 1.450 l/s a 1.850 l/s. La variación de almacenamiento para el acuífero de salmuera está comprendida entre 250 l/s a 450 l/s. Cabe destacar que el caudal de variación de almacenamiento para el periodo 2000-2015 obtenido para el acuífero MNT, es del mismo orden que los caudales de extracción promedio de agua fresca. La variación de almacenamiento teniendo en cuenta los acuíferos de agua fresca y de salmuera es del mismo orden que la diferencia entre entradas y salidas en el balance en régimen de explotación.

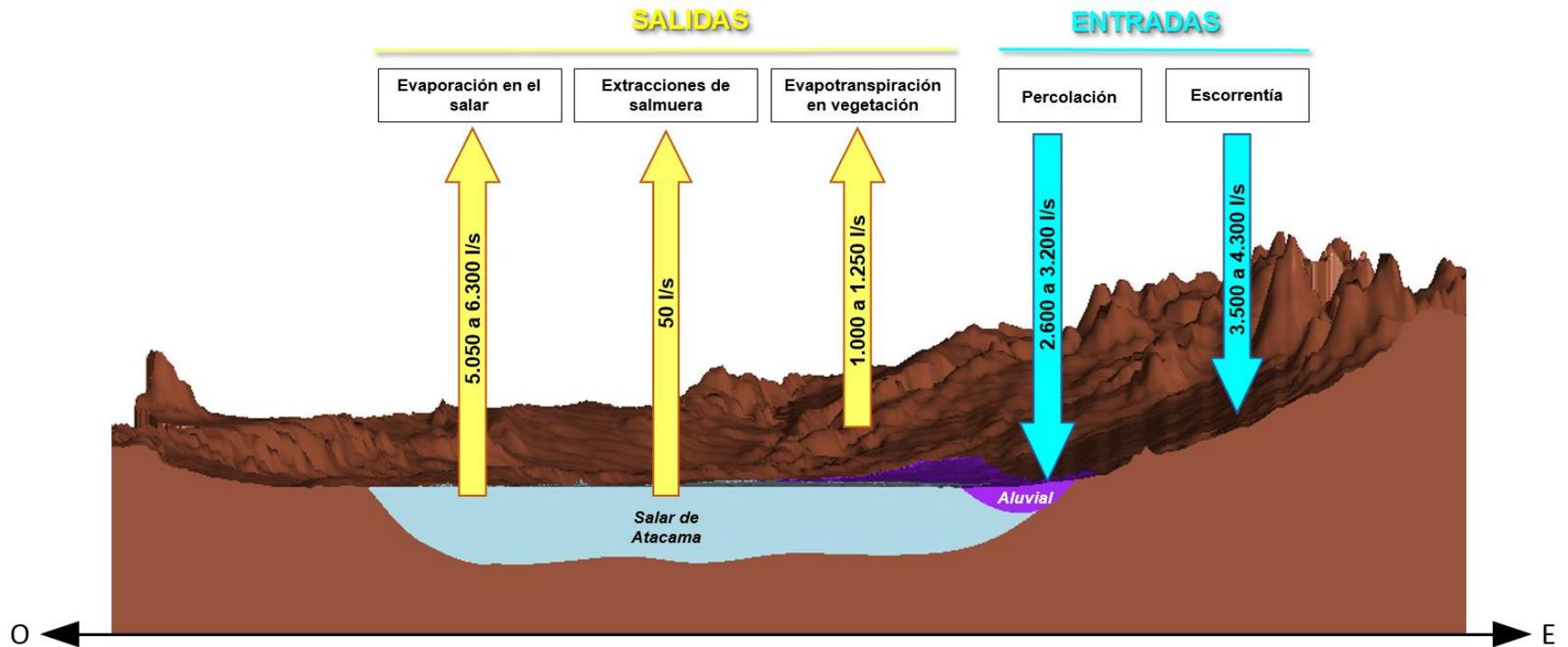


Figura 9-1: Vista esquemática del balance hídrico del acuífero en régimen natural (años 80).

Fuente: elaboración propia.

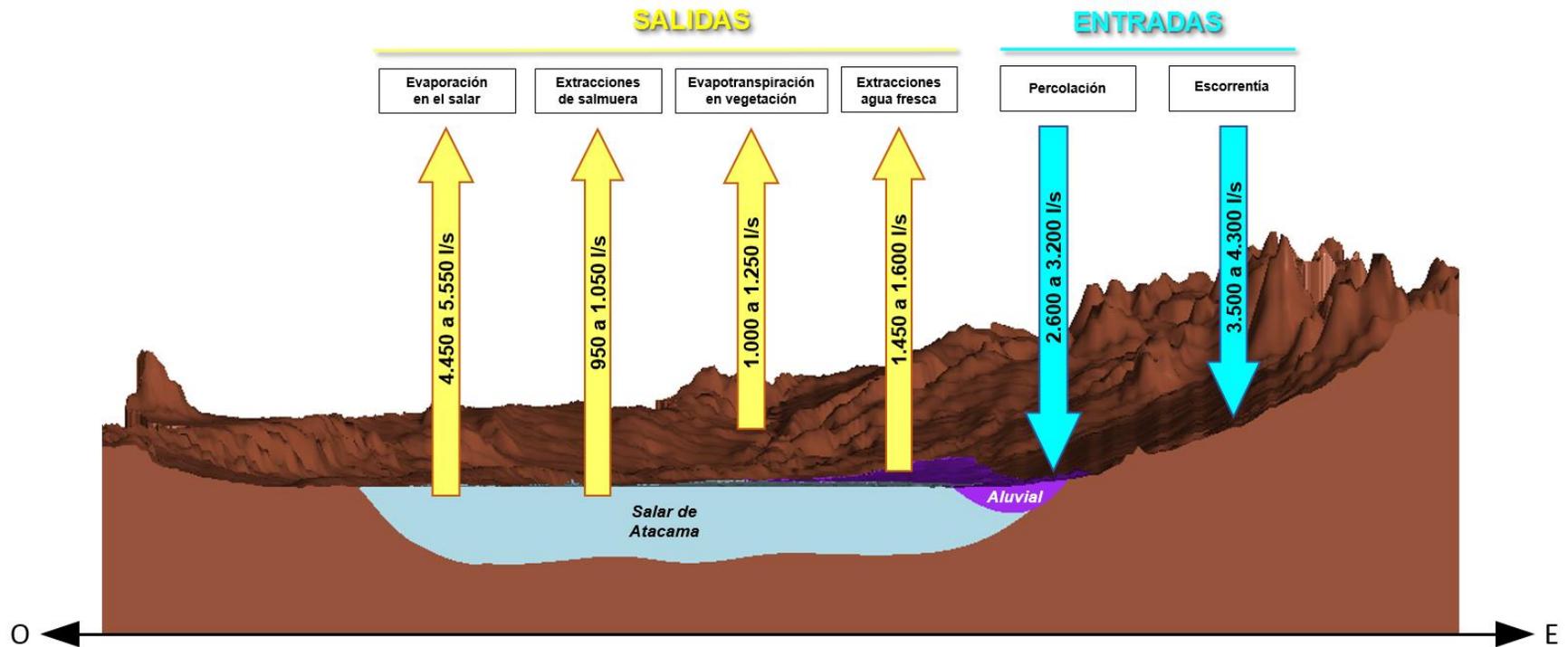


Figura 9-2: Vista esquemática del balance hídrico del acuífero en régimen de explotación (promedios y tasas representativas del periodo 2000 a 2015).

Fuente: elaboración propia.

9.2 Discusión de los resultados

La Tabla 9-3 presenta una comparación del balance hídrico de la cuenca realizado por Amphos 21 (2017) y por otros autores. Del análisis se concluye que existe cierta consistencia entre las estimaciones realizadas, con la excepción del estudio realizado por CSIC (2017).

En el presente estudio se determinó la evaporación del salar utilizando curvas de evaporación contra profundidad, éstas desarrolladas por Golder (2017) en el EIA de MEL, a partir de mediciones de terreno. Asimismo, las zonas evaporantes se determinaron a partir de datos históricos de profundidad del nivel piezométrico y un análisis de imágenes satelitales espectrales (índice de humedad, índice de brillo y NDVI). Por otro lado, se determinó la recarga a partir de las mediciones de precipitación en la cuenca, de caudal en la estación río San Pedro en Cuchabrachi y los aforos realizados en la quebrada de Jerez en Toconao.

No es de extrañar que los estudios realizados hasta antes de 2015 tengan consistencia entre sí, ya que en estos estudios se determinó la evaporación desde el salar usando las mediciones y metodologías desarrolladas por Mardones (1986). La recarga en estos estudios fue estimada a fin de ser consistente con la evaporación determinada. Por otro lado, SGA (2015) realizó mediciones de evaporación con domo y usando una metodología de zonas de evaporación similar a la de Mardones (1986) llega a un resultado consistente.

El estudio desarrollado por CSIC (2017) es el único que difiere de forma significativa con el resto de los estudios. La diferencia fundamental es el alto porcentaje de precipitación que se transforma en recarga al salar. En este estudio, la recarga asociada a cada evento de precipitación se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$Rec_i = Pp_i - Det$$

Donde Rec_i es la recarga del evento i en mm, Pp_i es la precipitación total del evento i y Det es la detención igual a 5 mm. Esta detención representa el caudal retenido en la superficie del terreno que no se infiltran y es devuelto a la atmósfera por evapotranspiración, o bien puede producir escorrentía superficial (DGA-DIHA PUC, 2009). Se esperaría que el descuento de 5 mm (Det) se aplique a la precipitación diaria, ya que la evaporación diaria en el área de estudio es del orden de 5 mm.

Autor	Precipitación total sobre la cuenca (l/s)	Recarga al salar (l/s)	Porcentaje de precipitación como aporte al salar (%)	Evaporación salar (l/s)
Mardones (1986)	-	-	-	5.400
Peña (1986)	-	-	-	5.000
DICTUC (2005)	-	5.699	-	5.699
CPH (2008)	-	-	-	2.940
DGA (2010)	~23.500 (*)	5.600	23,8	5.600
DGA (2013)	~31.400 (*)	5.170	16,5	5.178
SGA (2015)	~32.300 (*)	5.585	17,3	5.585
CSIC (2017)	23.522	16.247	69,1	15.936
Amphos 21 (2017)	29.049	5.670	19,5	5.050 a 6.300

Tabla 9-3: Comparación con balances históricos (régimen natural)

Fuente: SGA (2015) para puntos indicados con (*), el resto es de elaboración propia.

10. Estimación del potencial de litio

Los salares constituyen depósitos salinos continentales, los cuales se han formado en cuencas endorreicas y ambientes áridos con tasas de evaporación elevadas. El carácter endorreico y el clima en las cuencas pre-andinas y andinas del norte de Chile han dado lugar a un aumento de la concentración en sales del agua.

En un sistema hidrológico cerrado, la composición de las salmueras depende de las litologías que están siendo lixiviadas en la cuenca de drenaje que rodea los salares (Eugster & Hardie, 1978). Los componentes disueltos en las aguas de aporte en 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 de rocas pegmatíticas, sedimentarias y también en las salmueras de los salares. Este metal posee propiedades físico-químicas únicas que en la sociedad actual lo hacen indispensable para aplicaciones tecnológicas. Se trata del metal sólido más liviano y junto con su alto potencial electroquímico lo convierten en el componente máspreciado para las baterías recargables (SERNAGEOMIN, 2013). 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)).

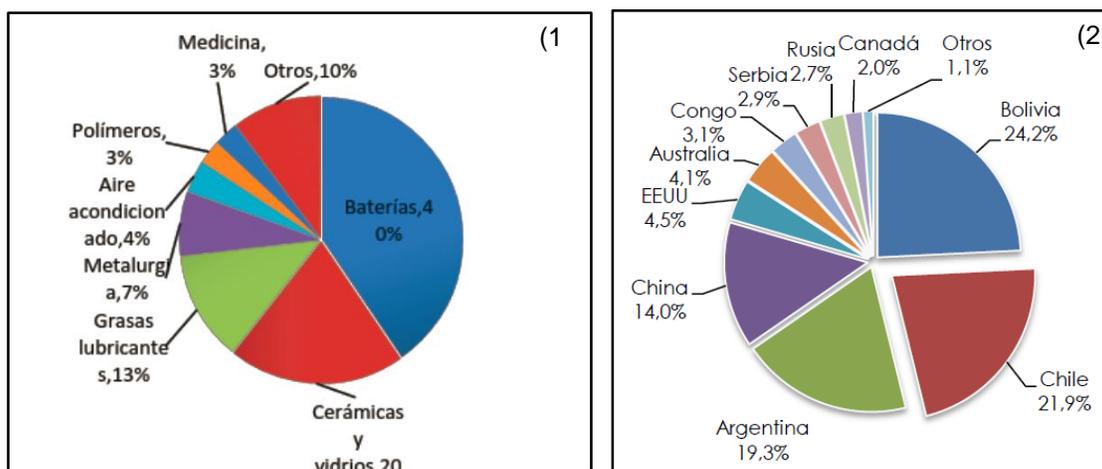


Figura 10-1: (1) Usos de compuestos de litio por aplicación en 2014. (2)

Distribución de los recursos de litio por país.

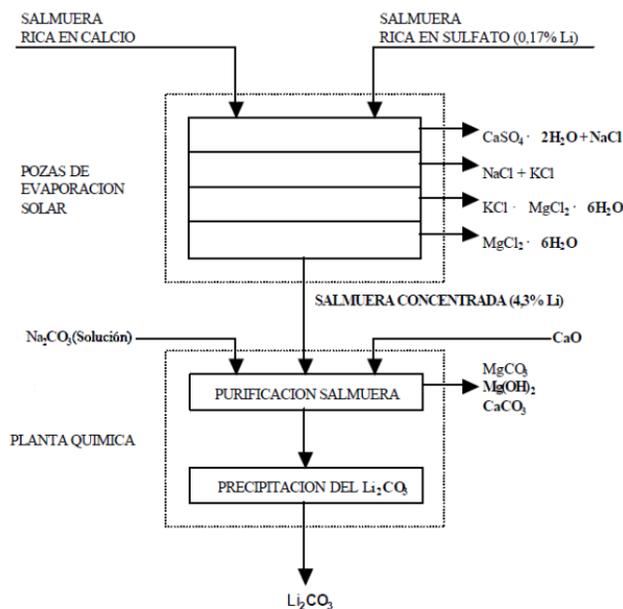
Fuente: (1) SignumBOX Inteligencia de Mercados, 2013. (2) CODELCO-Chile.

A Nivel de Chile, los salares de Atacama, Maricunga y Pedernales presentan depósitos salinos bien desarrollados y las salmueras que contienen son ricas en sólidos disueltos. Concretamente el Salar de Atacama corresponde al yacimiento de litio más importante a nivel mundial en dónde se han estimado de 6 a 6,7 millones de toneladas de litio (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

Existen diversas fuentes de explotación de litio, se puede extraer en salmueras, en rocas pegmatíticas o en rocas sedimentarias. 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 en Chile, concretamente en el Salar de Atacama. Las salmueras de los salares son extraídas mediante pozos de bombeo y almacenadas en pozas dónde se evaporan y se concentra el litio en varias etapas hasta conseguir una salmuera concentrada con más de 4% de litio. La salmuera concentrada es tratada en una planta química para obtener el precipitado de carbonato de litio. La desventaja es que es un método de explotación lento ya que este proceso se demora entre 12 y 24 meses (SERNAGEOMIN 2013).



*1 tonelada Li metálico=5,28 toneladas Li_2CO_3 equivalente.

Figura 10-2: Proceso de producción de carbonato de litio a partir de salmuera.

Fuente: Cisternas (1999) basado en Lagos (1986).

- **Osmosis inversa:** esta técnica consiste en tratar una salmuera previamente concentrada, con equipos de procesamiento que se encargan de filtrar las sales contenidas en la solución. Posteriormente se purifica creando un carbonato de litio de alta pureza.

Un ejemplo de salmuera previamente concentrada, podría ser aquella que se obtiene después de usarla como refrigeración en 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, éstos encarecen la producción de litio.

Una vez concentrada la salmuera en las pozas, se debe purificar extrayendo el magnesio como hidróxido de magnesio $-Mg(OH)_2-$ y Magnesita $-MgCO_3-$ (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 extraídos, 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), producto no deseado. El (Na_2CO_3) precipita más fácilmente que el carbonato de litio (Li_2CO_3), éste último 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, aumentarán más 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 Salar de Atacama

A continuación, se realizará un breve resumen de la información contenida en los diferentes estudios de los que se dispone y hacen referencia a la potencialidad de litio en el Salar de Atacama.

Desde 1975 en adelante, CORFO ha desarrollado actividades por etapas, con el objetivo de cuantificar la potencialidad de elementos de interés económico en el Salar de Atacama. Para ello ha contado con la asesoría especializada de la firma norteamericana Saline Processors. El estudio de la composición de las salmueras y el volumen de éstas en el área del núcleo del Salar de Atacama, de 1.100 km², permitió estimar la potencialidad de Li en 3,8 millones de toneladas. Esto se calculó teniendo en cuenta una concentración de Li media de 1.700 mg/l (0,14% en peso).

En el año 1986 el estudio “*EL LITIO, un nuevo recurso para Chile*” pretende realizar un análisis sobre la situación del mercado y las reservas del Litio a nivel mundial y en el Salar de Atacama. En este mismo estudio, R. Keith Evans en “*Reservas y Recursos de Litio en el Mundo Occidental*” recoge las estimaciones de potencial de Li en 1977, los cuales a su vez están basados en un informe de 1976 comisionado por la *National Academy of Sciences and Engineering* para el *National Research Council on Nuclear and alternative Energy Systems*. En este sentido, se estimó un tonelaje de Li en el Salar de Atacama de 4,4 millones de toneladas (Figura 10-3) (Evans, 1978). Además, también se hace una valoración de la composición química de la salmuera del Salar de Atacama (Figura 10-4), se puede observar que la concentración media del Li es de 1.800 mg/l (F.Vergara & P.Pavlovic, 1986).

<i>Salmueras</i>	<i>Toneladas Li</i>
Foot Mineral Co, Silver Peak, Nevada (A+C)	118.000
Searles Lake, California (D)	24.000
Great Salt Lake, Utah (D)	260.000
Salar de Atacama, Chile (A+C)	4.290.000
Total Salmueras	<u>4.692.000</u>

Figura 10-3: Potencialidad de Li en salmueras a nivel mundial.

Fuente: modificado de Evans (1978).

Elemento	Océano	Mar Muerto	Uyuni	Silver Peak	Atacama
Na	1,065	3,21	9,10	6,20	7,60
K	0,038	0,60	0,62	0,53	1,80
Li	0,00001	0,0015	0,025	0,023	0,15
Mg	0,127	3,33	0,54	0,033	0,96
Cl	1,90	17,32	16,50	10,06	16,00
SO ₄	0,25	0,07	—	0,71	1,78
B	0,0005	0,003	—	0,008	0,06
Li/Mg	1/12700	1/2200	1/21,5	1/1,5	1/6,4

Figura 10-4: Composición química de salmueras en el núcleo del Salar de Atacama (g/l).

Fuente: modificado de F. Vergara & P. Pavlovic (1986).

Posteriormente, en el año 2000, la colaboración entre el Instituto de Investigaciones Geológicas, Universidad del Norte y el U.S. Geological Survey (USGS) dio lugar a la publicación del artículo “*Lithium Resources of Salars in the Central Andes*”. En dicho artículo se realizó una caracterización geológica, de composición química y distribución del litio con el objetivo de valorar el potencial de litio. En este sentido, Moraga et al. (1974), indica que para el Salar de Atacama un área de salmuera de 400 km² contiene 40.000 toneladas de litio por metro de profundidad. Estos cálculos se basaron en una concentración de 2.000 mg/l, no obstante, Moraga et al. (1974), observaron que existe una zonación en la concentración de Li:

- Zona marginal: 200-300 mg/l.
- Zona de transición: 500-1.600 mg/l.
- Zona interior, núcleo de halita: 1.510-6.400 mg/l.

En diciembre de 2013, el SERNAGEOMIN realizó el informe “*Mercado Internacional del Litio*” en el cual se presentó la concentración de Litio en diferentes salares a nivel mundial (Tabla 10-1). Se estimó que en el Salar de Atacama la concentración media de Litio es de 1.500 mg/l.

Salar	País	Li (ppm)	K (ppm)	Mg/Li	Evaporación (mm/a)	Superficie (km ²)	Altura (msnm)
1 Atacama	Chile	1.500	18.500	6,4	3.700	3.000	2.300
2 Pastos Grandes	Bolivia	1.033	7.766	2,2	1.500	100	4.200
3 La Isla	Chile	860	3.170	5,1	1.000	152	3.950
4 Maricunga	Chile	800	7.480	6,6	1.200	145	3.760
5 Salinas Grandes	Argentina	795	9.547	2,7	2.600	212	3.450
6 Olaroz	Argentina	690	5.730	2,4	2.600	120	3.900
7 Hombre Muerto	Argentina	690	6.100	1,4	2.775	600	4.300
8 Zhabuye	China	680	s/a	0,001	2.300	243	4.420
9 Sal de Vida	Argentina	660	7.370	2,2	s/a	s/a	4.025
10 Diablillos	Argentina	556	6.206	3,7	s/a	40	3.760
11 Pedernales	Chile	400	4.200	8,7	1.200	335	3.370
12 Diangxiogcuo	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, el SERNAGEOMIN realizó el “*Estudio del Potencial de Litio en Salares del Norte de Chile*” (SERNAGEOMIN, 2013) que corresponde al único en su tipo realizado por una institución del estado el cual abarcó 18 salares andinos. En el año 2010, CODELCO-Chile realizó una reevaluación del potencial de Litio existente en el Salar de Atacama. En este mismo estudio se hace referencia a datos recogidos desde el año 1979, los cuales determinan reservas en el núcleo del Salar de Atacama de 3,8 millones de toneladas de litio. Además, se indicó también la concentración de Li en la salmuera del Salar de Atacama, es al menos superior a 1.000 mg/l de Li metálico (Tabla 10-2).

SALARES ZONA NORTE								
salar	Li (mg/L)		K (mg/L)		Li/K		Li/Mg	
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Atacama	>1.000	-	>10.000	-	-	-	-	-
Tara	3	440	6	700	0,07	0,81	0,16	0,97
Aguas Calientes Norte	25	130	6,5	1.020	0,13	0,5	0,1	0,5
Pujsa	1	400	16	3.400	0,04	0,12	0,04	0,26
Loyoques ó Quisquiro	6	425	22	1.650	0,17	3,32	0,13	0,18
Aguas Calientes Centro	5	45	150	1.025	0,02	0,05	0,01	0,03
El Laco	2	32,5	95	1.850	0,02	0,03	0,01	0,06
Aguas Calientes Sur	0,5	17,5	45,5	900	0,01	0,06	0,01	0,03

Tabla 10-2: Concentraciones de Li y K en los salares del norte de Chile.

Fuente: modificado de SERNAGEOMIN, 2013.

10.5 Estimación preliminar del potencial de litio

La estimación preliminar del potencial de litio se ha realizado teniendo en cuenta el modelo conceptual de la cuenca, el modelo hidrogeológico 3D LeapFrog, las porosidades efectivas recopiladas en los trabajos de antecedentes, la geometría de los acuíferos y las concentraciones de litio obtenidas del estudio hidroquímico realizado a partir de antecedentes.

Para el cálculo de la potencialidad del litio se ha utilizado el volumen 3, 4 y 5 construido en 3D que corresponden a los acuíferos definidos en el Salar de Atacama. Éstos se han definido en función de los valores de permeabilidad hidráulica, registros obtenidos de antecedentes. Para más información revisar el capítulo 5 y concretamente el subcapítulo 5.3.3.

A continuación, se exponen los volúmenes para los cuáles se han considerado los cálculos del potencial de litio. Se debe tener en cuenta que estos volúmenes incluyen tanto la zona marginal como el núcleo de halita del Salar de Atacama. Los valores de porosidad efectiva asociados, pueden consultarse como antecedente en el capítulo 5.6.

- **Volumen 3, acuífero superficial del Salar de Atacama:** corresponde al volumen comprendido entre la superficie y los primeros 50 m de profundidad (dato referencial que debe ser sensibilizado a medida que se disponga de más datos de permeabilidad o se realicen más ensayos). En este sector se ha considerado un espesor saturado de 48 m ya que el nivel piezométrico se encuentra a 2 m de profundidad aproximadamente. El volumen calculado teniendo en cuenta el espesor saturado es de 100.490 hm³. La porosidad efectiva promedio asociada a este volumen es del 7%.
- **Volumen 4, acuífero intermedio del Salar de Atacama:** corresponde al volumen comprendido entre el muro del acuífero superficial y el techo del acuífero profundo. El espesor teórico estimado para esta unidad es de 100 m. Si se considera que todo el acuífero se encontraría saturado se obtiene un volumen de 281.970 hm³. La porosidad efectiva adoptada para hacer los cálculos es del 4%. El espesor de esta unidad se ha considerado de forma estimativa, de acuerdo con la hipótesis de que en profundidad la porosidad efectiva debe disminuir. Las dimensiones de este volumen deben ser validadas con más datos de permeabilidad y porosidad en profundidad.
- **Volumen 5, acuífero profundo del Salar de Atacama:** este acuífero tendría una potencia aproximada de 600 m y estaría comprendido entre los 150 m de profundidad y hasta el contacto con el basamento. Dicha profundidad se ha estimado de forma referencial, teniendo en cuenta que la porosidad efectiva debe ser menor que en el acuífero intermedio. De esta manera, en el cálculo se ha considerado un espesor promedio de aproximadamente 750 m de profundidad con respecto la superficie (cabe tener en cuenta que las profundidades máximas detectadas son de entre 900 y 1.100 m, ver capítulo 5.3.3). En este caso también

se considera que el acuífero se encontraría totalmente saturado. De esta forma, el volumen que se obtiene es de 1.959.100 hm³, mientras que la porosidad efectiva teórica es del orden de 0,1%. Los datos anteriores deben ser validados con perfiles TEM, sondajes profundos de exploración, ensayos de porosidad y parámetros hidráulicos realizados a diferentes profundidades.

Una vez definidos los volúmenes saturados, se les aplica la porosidad para conocer los volúmenes de salmuera en cada uno de ellos:

- **Volumen 3 de salmuera:** 7.034 hm³.
- **Volumen 4 de salmuera:** 11.278 hm³.
- **Volumen 5 de salmuera:** 1.077 hm³.

Posteriormente, para calcular la potencialidad del litio de la salmuera se aplica la concentración del litio. Cabe mencionar que existen incertidumbres en cuanto a distribución de la concentración del litio, ya que no se conocen las profundidades a las cuales se han tomado las muestras, entre otros factores y no se dispone de una distribución homogénea de los datos. En este sentido, se ha observado que las concentraciones menores de litio se encuentran en la zona marginal del salar (100-1.000 mg/l), mientras que las mayores concentraciones se han detectado en el núcleo del salar (1.001-1.928 mg/l). De esta manera, la concentración de litio se ha ponderado en función del área (área núcleo 1.285 Km² y área zona marginal 1.469 Km²) y se ha considerado que la concentración de litio es homogénea en profundidad (esto debe validarse con estudios posteriores). La mínima concentración de litio ponderado que se obtiene es de 520 mg/l (escenario conservador), mientras que la máxima es de 1.433 mg/l (escenario optimista). En la Figura 10-3 se pueden observar los resultados.

Concentraciones de litio (mg/l)	Escenarios	
	Conservador	Optimista
Concentración de Li núcleo	1.001	1.928
Concentración de Li zona marginal	100	1.000
Concentración de Li ponderado	520	1.433

Tabla 10-3: Rangos de concentraciones adoptados junto con sus ponderaciones.

Fuente: elaboración propia

Una vez se conocen los volúmenes de salmuera y se han ponderado las concentraciones de Li, se ha realizado el cálculo del potencial de litio el cual ha resultado ser de **10,1 millones de toneladas promedio de litio** para el escenario conservador y de **27,8 millones de toneladas promedio de litio** para el escenario optimista. El resumen de las estimaciones del potencial de litio se recogen en la Tabla 10-4.

Acuíferos del Salar de Atacama	Volumen acuífero (con espesor saturado)	Porosidad efectiva (%)	Volumen almacenado salmuera (hm ³)	Tonelaje de Li escenario conservador (con 520 mg/l de Li)	Tonelaje de Li escenario optimista (con 1.433 mg/l de Li)
	(hm ³)	% Promedio	hm ³ Promedio	Promedio Toneladas	Promedio Toneladas
Volumen 3: acuífero superficial (2 a 50 m)	100.490	7	7.034	3.657.838	10.080.152
Volumen 4: acuífero intermedio (50 a 150 m)	281.970	4	11.278	5.864.976	16.162.520
Volumen 5: acuífero profundo (150 a 750 m)	1.959.100	0,1	1.077	560.302	1.544.065
			Total (Mt)	10,1	27,8

Tabla 10-4: Resumen estimación en Mt del potencial de Litio.

Fuente: elaboración propia.

11. Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común (SHAC)

En este capítulo se presenta un análisis de los sectores SHAC de la cuenca Salar de Atacama, a partir de la información de estudios previos de la DGA.

11.1 Antecedentes

Según Reglamento sobre normas de exploración y explotación de aguas subterráneas (Decreto Supremo N° 203, de 20 de mayo de 2013) se define como Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común (SHAC) un “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”.

Los antecedentes sobre los SHAC en el Salar de Atacama se remontan al Informe Técnico SDT N° 324 de febrero de 2012, “Evaluación de los Recursos Hídricos Subterráneos del Acuífero del Salar de Atacama” en el que se definieron en primera instancia los SHAC y además, se evaluó la oferta de recursos hídricos subterráneos en cada uno de ellos (recursos hídricos frente a derechos de agua otorgados). Posteriormente, se reconsideraron dichos sectores a petición de terceros. El resultado de dicho análisis dio origen al Informe Técnico SDT N°339 de 2013 “Análisis de la Oferta Hídrica del Salar de Atacama”, en el cual se establecen nuevos sectores hidrogeológicos de aprovechamiento común y las respectivas ofertas de recursos hídricos subterráneos. Los SHAC definidos en el informe STD N°339 se presentan en la Figura 11-1 (SHAC-DGA). Adicionalmente, en la Figura 11-2 se proyectan los polígonos de cada SHAC-DGA junto con la información hidrogeológica necesaria para gestionar eficientemente los recursos.

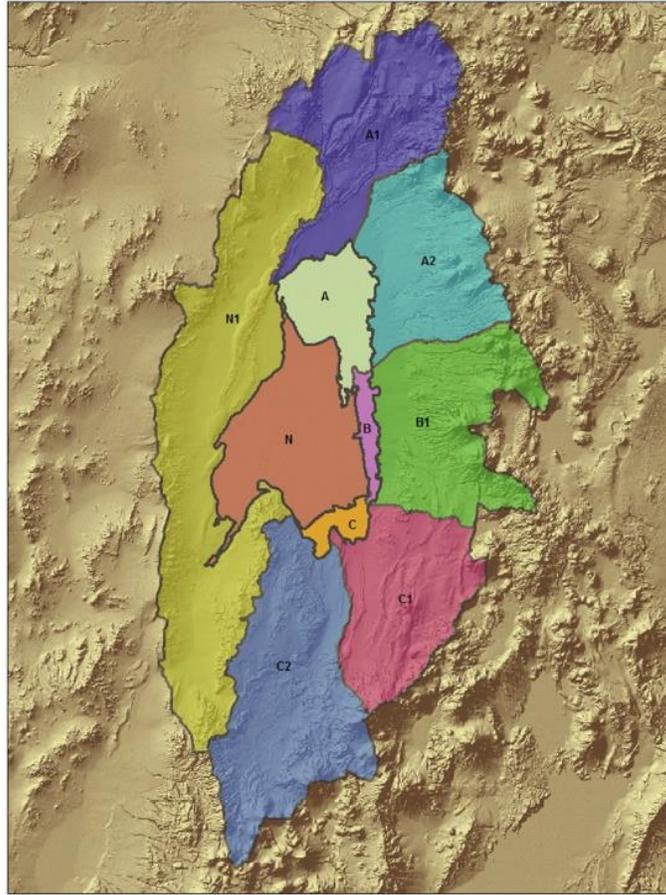


Figura 11-1: SHAC definidos por la DGA en Informe Técnico SDT N°339 de 2013

Fuente: Informe Técnico DARH N° 234 (DGA, 2014).

De norte a sur se definen 10 SHAC: A1, A2, A, N1, N, B, B1, C, C1 y C2, de los cuáles A, N, B y C se encuentran dentro de los límites del Salar de Atacama. Teniendo en cuenta el funcionamiento hidrogeológico de la cuenca definido en el presente proyecto, los SHAC interactúan de la siguiente forma:

- N1 descarga las aguas en N,
- A1 y A2 descargan en A,
- B1 descarga en B,
- C1 y C2 descargan en C y finalmente,
- A, B y C descargan en N.

En el Informe Técnico SDT N°339 de 2013 se obtiene una oferta hídrica a partir de un análisis de las precipitaciones, la evaporación y el cálculo de la recarga. En el informe Técnico DARH N° 234 (DGA, 2014) se presenta la oferta de recursos hídricos definitivos (m³/año) calculados en el Informe Técnico SDT N°339 de 2013 y una demanda comprometida al 30 de julio de 2014 (m³/año), ésta última corresponde a los derechos de agua otorgados (Tabla 11-1).

Sector Acuífero		Oferta recursos hídricos definitivos (m ³ /año)	Demanda comprometida al 30 de julio de 2014 (m ³ /año)
A1	A	31.315.248	26.536.361
A2			
B1	B	28.193.184	8.830.080
C1	C	10.879.920	277.517
C2		12.709.008	76.547.333
N1	N	2.995.920	1.261.440

Tabla 11-1: Oferta de recursos hídricos frente a demanda comprometida

Fuente: Informe Técnico DARH N° 234 (DGA, 2014)

Del análisis anterior, la DGA (2014) concluye que los sectores acuífero A1, A2, A, B1, C1, C, N1 y N permanecen abiertos a la constitución de derechos de aprovechamiento de agua subterránea hasta copar los volúmenes totales anuales señalados en la Tabla 11-1. Por otra parte, la demanda de agua subterránea comprometida al 30 de julio de 2014 supera significativamente la oferta total de recursos hídricos en el sector C2 y por lo tanto, DGA determinó que no existe disponibilidad de recurso hídrico para otorgar nuevos derechos de aprovechamiento en calidad de definitivos en dicho sector.

Cabe destacar que la demanda comprometida al 30 de julio de 2014 según el informe técnico de la DGA (2014) no contempla la explotación de salmuera del núcleo del salar. En la Tabla 11-2 se observa la demanda comprometida que se tiene en cuenta en cada SHAC, en la que se observa que el sector N donde, se produce la explotación de salmuera, no tiene asociada una demanda.

Demanda Comprometida al 30 de julio de 2014	
Sector	m ³ /año
A1	5.624.479
A2	6.644.996
B1	8.830.080
C1	157.680
C2	76.547.333
N1	1.261.440
A	14.266.886
B1	0
C	119.837
N	0

Tabla 11-2: Demanda comprometida por sector SHAC al 30 de julio de 2014

Fuente: Informe Técnico DARH N° 234 (DGA, 2014).

11.2 Definición de los SHAC y análisis crítico

En este capítulo se realiza una descripción de cada grupo de SHAC con características similares donde se detalla la información del modelo conceptual hidrogeológico planteado.

- **SHAC C2, C1 y C:**

En este sector se encuentra el acuífero detrítico de Monturaqui-Negrillar-Tilopozo (MNT). La recarga del acuífero se produce principalmente en la parte alta (al sur), por infiltración de agua de lluvia y nieve (deshielo) directamente sobre el acuífero y sobre las unidades hidrogeológicas que afloran en superficie que lo recargan de forma lateral. La dirección de flujo es principalmente sur-norte y la descarga se produce en el salar. En la zona de descarga (SHAC C) se forma una cuña salina debido al contraste de densidades entre el agua dulce-salobre y la salmuera.

En la zona de interfase agua dulce-salobre y salmuera (SHAC C) existen los sistemas de lagunas de La Punta-La Brava y Peine que constituyen ecosistemas frágiles sensibles a cambios en la altura del nivel de agua y calidad química.

Además, existen cursos de agua superficial (Tilomonte, Tulán, desembocadura de la vertiente Peine), cuyo caudal debe ser aforado periódicamente, así como la calidad química de dichas aguas debe ser monitoreada.

En la zona sur y centro-sur del acuífero se explotan las aguas subterráneas del acuífero por parte de MEL y CMZ y además, hacia el norte, Rockwood tiene 3 pozos de explotación con derechos de agua.

- **SHAC A, A1, A2, B1, B (Borde este y norte del Salar de Atacama):**

Los SHAC A1, A2 y B1, limitan con el borde este y norte del Salar de Atacama por un lado y por el otro, con la cuenca hidrográfica, mientras que el SHAC A y B están constituidos por la zona marginal del salar, donde se encuentra la traza de la cuña salina en superficie. Los acuíferos que están contenidos en dichos polígonos son el acuífero aluvial del borde este y borde norte. La recarga de los acuíferos se produce principalmente en la parte alta, por infiltración de agua de lluvia y nieve (deshielo) directamente sobre el acuífero y sobre las unidades hidrogeológicas que afloran en superficie que lo recargan de forma lateral. La dirección de flujo es principalmente este-oeste (en el borde este) y norte-sur (en el borde norte), mientras que la descarga se produce en el salar. En la zona de descarga se forma una cuña salina debido al contraste de densidades entre el agua dulce-salobre y la salmuera (zona marginal).

A lo largo del A2, B1 existen quebradas con flujo de agua permanente, a continuación, se enumeran de norte a sur quebrada de Zapar, Hamar, Potor, Aguas Blancas, Camar, Socaire, Peine, Talabre, Jerez, Tarjine). Existen dos cursos de agua superficiales, que son los principales afluentes al Salar de Atacama, el río San Pedro y Vilama. Estos ríos presentan un escurrimiento permanente y se caracterizan por tener un área aportante mayor, si se le compara con el resto de las quebradas que drenan al salar. Los principales tributarios del río San Pedro son el río Grande y el río Salado, mientras el principal tributario del Vilama es el río Puritama. Además, existen zonas protegidas por la Reserva Nacional Los Flamencos, en la que se contemplan los sistemas Aguas de Quelana y Soncor. También existen otras lagunas como la Tebinchinque en el Salar de Atacama, de interés ecológico.

En el SHAC B1, SQM Salar S.A., es titular de aprovechamientos de agua subterránea sobre el acuífero aluvial. El bombeo genera un radio de influencia que deber ser controlado y que no debería afectar a la zona marginal (SHAC B).

La explotación del acuífero en los SHAC A1 y A2 se produce mediante derechos de agua particulares.

- **SHAC N1:**

El SHAC N1 se encuentra en el borde oeste de la cuenca Salar de Atacama. Corresponde al área comprendida de la cordillera de Domeyko, Cordillera de la Sal, Llano de la Paciencia, parte del Cordón de Lila y el Salar de Atacama. Es el SHAC de mayor extensión en la cuenca. Durante el presente proyecto se ha identificado que existen numerosas incertidumbres en este sector debido a que no se dispone de información hidrogeológica para caracterizar el funcionamiento de este SHAC.

- **SHAC N:**

El SHAC N recibe las aguas de descarga del resto de los SHAC nombrados anteriormente. En el núcleo del Salar de Atacama se extrae salmuera por parte de las empresas SQM Salar S.A. y Rockwood. El efecto del bombeo alcanza los bordes del núcleo, en las proximidades de la zona marginal, donde se encuentran las lagunas.

En este SHAC el Río San Pedro desemboca sus aguas en el salar y forma un delta. En ambientes de este tipo existen sistemas de gran interés ecológico.

La gestión de los SHAC de contemplar los siguientes aspectos:

Los polígonos SHAC definidos por la DGA se consideran representativos de la cuenca y del funcionamiento hidrogeológico de la misma. Sin embargo, se propone que la delimitación de éstos debiese actualizarse con los límites hidrográficos que se proponen en el presente proyecto, que se han actualizado con un ASTER DEM de resolución de 30 x 30 m por pixel.

Además, la demanda comprometida debe contemplar también la explotación de salmuera en el núcleo del salar, ya que son recursos que no están disponibles en la cuenca y que se utilizan para la producción de sales.

Cabe destacar que los sistemas lagunares (Peine, Laguna La Punta-La Brava, Sistema Soncor y Aguas de Quelana) constituyen ecosistemas frágiles sensibles a cambios en la altura del nivel de agua y calidad química. Por el norte, existen otras lagunas de gran interés ecológico (por ejemplo, laguna Tebinchinque). Dichas lagunas se encuentran principalmente en el SHAC B y C y la dinámica que presentan está asociadas a la posición de la cuña salina. Se recomienda que en estos SHAC no se otorguen derechos de agua y que los radios de influencia del bombeo de agua subterránea que se produce en el SHAC N, B1, A2, C1 y C2 no afecten a los SHAC B y C.

En general, se recomienda que la gestión de los SHAC contemple los siguientes trabajos:

- monitorear de forma periódica la altura del nivel y la calidad química del agua en las lagunas, así como aforar los canales de entrada de agua a las lagunas,
- aforar y monitorear de forma periódica los cursos de agua superficial,
- monitorear periódicamente la evolución de la cuña salina mediante el registro de perfiles de conductividad eléctrica, temperatura y pH en pozos, así como la extracción y análisis de muestras de agua a diferentes profundidades,
- monitorear mediante piezómetros de observación la evolución del nivel y calidad química del agua subterránea en la zona marginal donde se encuentran las lagunas, en el núcleo del salar y en los acuíferos definidos, con el objetivo de caracterizar espacialmente y de forma homogénea la evolución del sistema hidrogeológico a nivel de cuenca,
- aumentar la frecuencia del monitoreo y el número de piezómetros en las zonas donde existan ecosistemas de interés y zonas donde se produce la explotación de los acuíferos. Se debe controlar y vigilar que el nivel no descienda bajo los valores definidos en el PAT. Cabe destacar que los PAT también deben ser revisados con el tiempo a medida que aumenta el conocimiento hidrogeológico de los sectores.

Los pozos de monitoreo deben estar repartidos homogéneamente en el acuífero y deben ser suficientes como para construir mapas piezométricos.

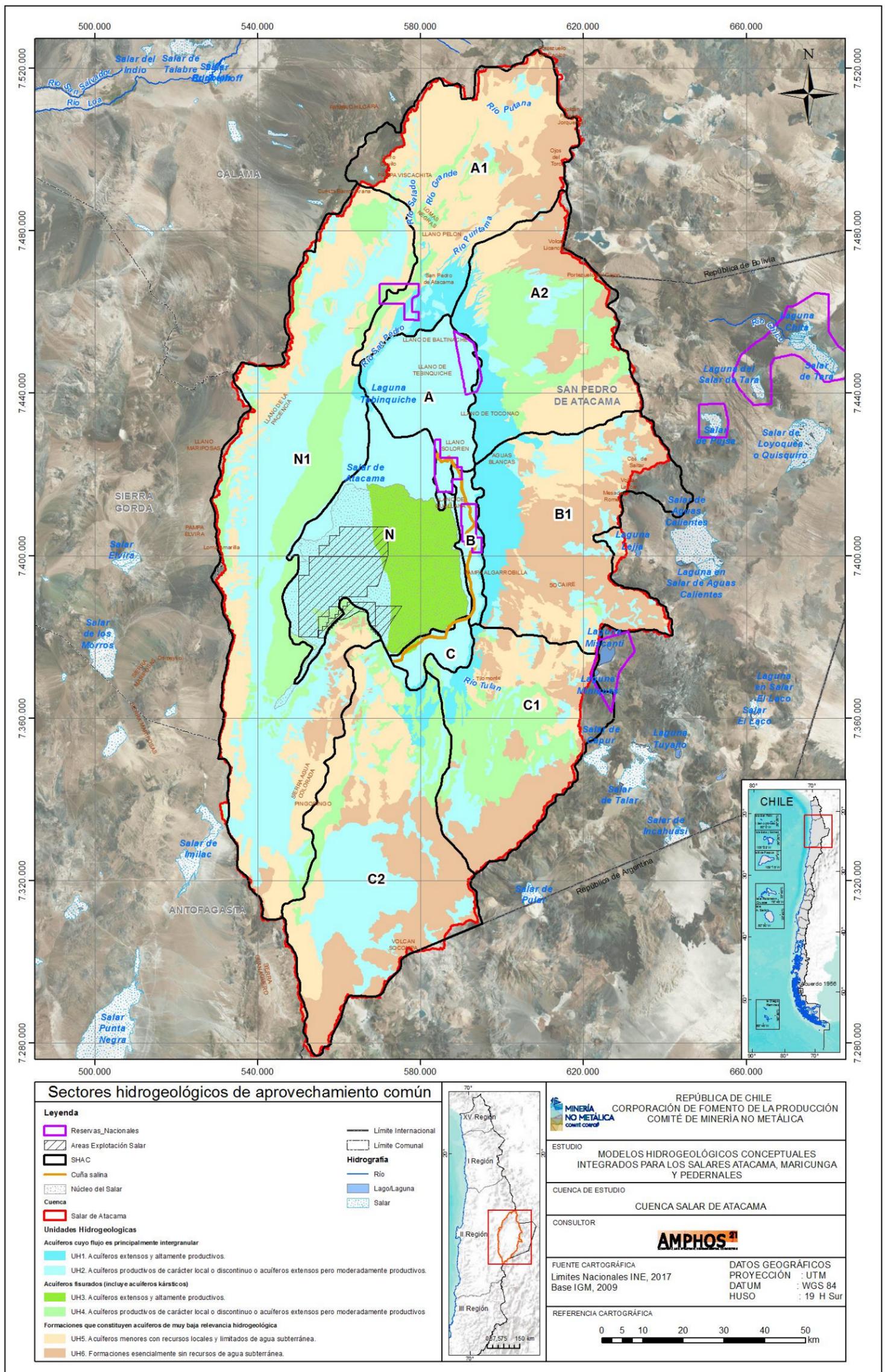


Figura 11-2: Mapa de ubicación de sectores hidrogeológicos de aprovechamiento común.

Fuente: elaboración propia.

12. Evaluación plataforma para modelización numérica de flujo

En cuencas como la del Salar de Atacama donde coexisten acuíferos de salmuera y de agua dulce-salobre se generan zonas de densidad variable. En estos casos es necesario modelizar teniendo en cuenta dichas condiciones, además de caracterizar otras particularidades de la cuenca como la existencia de diferentes tipos acuíferos (poroso, fisurado y kársticos) y presencia de aguas superficiales (lagunas, ríos, etc).

Las plataformas de modelización numérica que pueden contemplar en su estructura las particularidades anteriormente descritas son, por ejemplo, FEEFLOW, VISUAL MODFLOW y GROUNDWATER VISTA, los dos últimas con el código SEAWAT del USGS. La utilización de uno u otro dependerá de la metodología del modelo numérico y el objetivo para el cual se construye (gestión de recursos hídricos a nivel de cuenca, modelización de zonas protegidas sensibles a cambios del nivel de agua subterránea, comportamiento hidráulico del acuífero frente a un campo de pozos de bombeo). En la Tabla 12-1 se presentan una comparativa de los 3 software con algunas de las características que debería contemplar un modelo numérico de cuenca y además se incluyen, algunas especificaciones particulares de cada software. Adicionalmente, se realizó una comparación con otros softwares como el SUTRA-MS (ModelMuse), TRANSDENS, COMSOL Multiphysics, iCP (Interfaz COMSOL-PHREEQC).

El SEAWAT y el Feeflow modelan en concentraciones de mg/l de TDS –total de sólidos disueltos- o de conductividad eléctrica (CE). Cabe destacar que la CE y los TDS tienen una relación directa con la densidad del fluido. Es recomendable que el modelo numérico de flujo que se utilice para la gestión de recursos hídricos en la cuenca, contenga todos los acuíferos definidos y que las dimensiones de éste coincidan con las del modelo conceptual. Para casos particulares, como por ejemplo, gestión de sistemas ecológicos protegidos, como las lagunas de la Reserva Nacional Los Flamencos, 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 borde este o la zona marginal al sur del acuífero de Monturaqui-Negrillar-Tilopozo (MNT), debe realizarse un modelo numérico con un dominio menor, acotado a la zona objeto de estudio y modelizar la densidad variable con SEAWAT o FEEFLOW, 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)	TRANSDENS	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	
Modelización de transporte multiespecie	SI	NO	NO	SI	NO	SI	SI	
Modelización de transporte reactivo	SI	NO	NO	NO	NO	NO	SI	
Modelización de transporte de calor	SI	SI	SI	SI (pero no simultaneo con el transporte de solutos)	SI (pero no simultaneo con el transporte de solutos)	SI	SI	
Modelización de densidad variable en 2D (cuña salina)	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	Se recomienda modelar en secciones acotadas
Modelización de densidad variable en 3D (cuña salina)	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	Modelización compleja y larga
Modelización de acuíferos, fisurados y/o kársticos y porosos	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	
Modelización en fracturas discretas	SI	NO	NO	NO	SI	SI	SI	
Modelización de la zona no saturada	SI	NO	NO	SI	NO	SI	SI	
Modelización de flujo multifase	SI	NO	NO	NO	NO	SI	SI	
Plataforma de pre-postproceso amigable	SI	SI	SI	SI	NO	SI	SI	
Especificaciones	Modelización óptima de la geometría de rajos y túneles (elementos finitos) y en condiciones saturadas y no saturadas.	Recomendable para modelos numéricos de flujo en condiciones saturadas.	Modelización óptima de la geometría de rajos (elementos finitos) y en condiciones saturadas y no saturadas.					

Tabla 12-1: Comparativa de software para modelización numérica.

Fuente: elaboración propia.

Finalmente, el proyecto 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 que 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 la identificación y características de los acuíferos del Salar de Atacama, las condiciones de borde con otros acuíferos, así como la geometría del basamento. Finalmente, se plantean incertidumbres sobre el balance hídrico y sus componentes (entradas y salidas) y algunos aspectos sobre el cálculo del potencial del litio.

Identificación y características de los acuíferos del Salar de Atacama y condiciones de borde con los otros acuíferos

Las incertidumbres están relacionadas con:

- La caracterización de las condiciones de borde al occidente, suroccidente y noroccidente del núcleo del Salar de Atacama, ya que no se ha logrado definir con detalle mediante los perfiles geofísicos existentes en este sector. Lo anterior es debido a que se ha identificado una geometría compleja determinada por la distribución de capas de diferente permeabilidad de sedimentos detrítico/salinos, saturados de salmuera. En las recomendaciones del presente proyecto se propone realizar perfiles verticales de conductividad eléctrica en los pozos ya construidos que han servido para caracterizar la litología, así como ensayos de permeabilidad hidráulica en las diferentes unidades geoléctricas identificadas. También es altamente recomendable realizar perfiles verticales en los pozos con la sonda gamma-natural para identificar estratos de arcilla.
- En general en la zona norte (definida en la Figura 6-2) no existe información suficiente para definir los límites entre el acuífero aluvial, la cuña salina y el basamento. Además, los sondajes existentes no alcanzan el basamento y no contienen información hidroquímica, de parámetros hidráulicos, ni de porosidad de los materiales. Tampoco se han podido caracterizar los acuíferos identificados en esta zona (acuífero superficial y profundo), en cuanto a sus espesores y características hidráulicas e hidroquímicas.
- El límite lateral entre el acuífero del borde este al sur y el de Monturaqui-Negrillar-Tilopozo se ha modelado de forma interpretativa según el gradiente hidráulico y las direcciones de flujo de ambos acuíferos. Con una mayor caracterización hidroquímica de ambos acuíferos en dicho sector podrían definirse el límite con un criterio añadido.

- La cuña salina no se ha identificado ni al norte ni al oeste del Salar de Atacama. Al norte no se ha identificado probablemente debido a que la información geofísica no es suficiente y además, no existen perfiles verticales de conductividad eléctrica en pozos. Los perfiles geofísicos ubicados al oeste del salar no muestran un perfil de cuña salina, sin embargo, debe contrastarse con nueva información de perfiles verticales de conductividad eléctrica y perfiles geofísicos TEM y NanoTEM de dirección este-oeste, más largos y penetrativos en el aluvial del Llano de la Paciencia, que los que existen hoy día (Geodatos, 2008 y CPH, 2008), ya que la cuña salina podría encontrarse al oeste del límite del salar. El contacto lateral entre acuíferos al norte, este y sur del Salar de Atacama se ha construido en forma de cuña salina en el modelo 3D. La cuña salina en estos sectores se ha identificado con precisión donde existen perfiles geofísicos (tanto en superficie como en profundidad). Sin embargo, en las zonas donde no existe información, se han aplicado las condiciones geométricas identificadas en las áreas donde sí existe información.
- La distribución espacial y en profundidad de los parámetros hidráulicos en el núcleo (según los antecedentes recopilados) no es homogénea ni representativa de toda el área. 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 Atacama (espesores y porosidades) se ha realizado a partir de estimaciones y valores representativos.
- 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 ni en la zona marginal del salar (los datos son dispersos en toda el área y gran parte se concentran en la zona marginal sur 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.
- Se desconoce el comportamiento hidrogeológico de las fallas que se encuentran en el núcleo del salar, aunque sí existen estudios estructurales de los sistemas de fallas. No existe o no se dispone de bibliografía y antecedentes asociados a este tema.

Otros acuíferos

- La información litológica, de parámetros hidráulicos e hidroquímica de las aguas subterráneas no ha sido suficiente como para caracterizar el acuífero profundo y el superficial del aluvial del borde este y norte.

- La información de geofísica en el acuífero MNT no se ha podido incorporar y se han utilizado los perfiles geológicos realizados por Golder (2017) para interpretar el basamento y la geometría de las unidades geológicas que constituyen el acuífero.

Basamento

Existe incertidumbre en la definición de los siguientes ítems:

- Posición y morfología del basamento en gran parte del acuífero aluvial borde este y borde norte Hay zonas donde se ha identificado mediante perfiles geofísicos TEM, pero no se ha podido validar con sondajes, ya que éstos no alcanzan el basamento en ninguno de los dos sectores. Debido a lo anterior, los espesores del acuífero confinado profundo también se desconocen con precisión. El modelo se ha construido en base a interpretación geológica e interpolación de los puntos conocidos mediante el software Leapfrog.
- Posición y morfología del basamento de los depósitos evaporíticos del Holoceno en la parte central del núcleo y norte del Salar de Atacama. Dicho lugar se ha caracterizado óptimamente en algunas partes con sismica y TEM (existe un único perfil TEM en el Salar de Atacama y se encuentra al norte del núcleo del salar). La cantidad de información no es suficiente como para tener una buena resolución de la posición del basamento y el espesor de los depósitos evaporíticos. La definición de los límites del basamento se ha realizado mediante interpolaciones entre puntos con el software Leapfrog.

Balance hídrico (entradas y salidas)

- Los domos y los lisímetros se encuentran en la zona marginal del salar, pero no en el núcleo. Por lo tanto, existe cierta incertidumbre en la estimación de la evaporación que se produce en el núcleo del salar.
- Es necesario tener un mayor control del régimen de explotación de los derechos de agua de particulares en la cuenca para poder ajustar el balance hídrico.
- No existe información de las precipitaciones que ocurren en la Cordillera de Domeyko porque no hay estaciones meteorológicas. En el presente estudio se ha estimado mediante imágenes satelitales, pero debería de validarse con mediciones reales.
- 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 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. En el capítulo de recomendaciones se especifican más detalles.

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 la zona marginal.
- 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.
- 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 actualizarse.

Generalidades

- 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.

14. Síntesis y conclusiones

En el presente capítulo se recogen las conclusiones extraídas a partir de la elaboración de la Etapa III 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 norte y oeste de la cuenca no se dispone de suficiente información como para generar un modelo robusto) y por lo tanto, las conclusiones que se extraen y el funcionamiento hidrogeológico propuesto tiene en cuenta las brechas existentes.
- El núcleo del salar está formado por depósitos salinos, principalmente evaporitas, mientras que hacia los bordes predominan los sedimentos detríticos (finos, arenas y gravas, etc.). Los depósitos salinos tienen espesor máximo en el centro del salar (núcleo), donde el basamento se encuentra a mayor profundidad. Los espesores de los depósitos salinos en el núcleo estarían comprendidos entre 900 y 1.100 m.
- En el Salar de Atacama el basamento está formado por la Fm. San Pedro en el núcleo (arcillas yesíferas, areniscas, conglomerados y potentes mantos de sal y yeso). Dicho basamento tendría una morfología aproximadamente elipsoidal. En la zona centro-norte del salar se encuentra a 1.375 m s.n.m. y en general, se eleva en los bordes del mismo hasta los 1.500 m s.n.m. La máxima profundidad a la que se encuentra el basamento es en el centro del salar, es aproximadamente de 1.100 m s.n.m.
- En la cuenca existen numerosos sistemas de fallas y cabalgamientos originados en las distintas orogenias. Durante el Cretácico Medio se produce una etapa compresiva que genera el plegamiento de los materiales y que se denomina Orogenia Peruana (Steinmann, 1929), mientras que en eventos posteriores, en el límite Eoceno-Oligoceno comienza la Orogenia Incaica (Steinmann, 1929), que genera los rasgos morfoestructurales que caracterizan la cuenca del Salar de Atacama: Cordilera Domeyko, Cordón del Lila, Cordillera Occidental y Arco volcánico actual.
- 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.
- El núcleo del Salar de Atacama es heterogéneo. En términos generales, se observa un comportamiento hidráulico distinto en el bloque elevado y hundido del Sistema Falla Salar (SFS) -falla inversa que atraviesa el Salar de Atacama por su centro-, de tal forma que se ha definido el sector occidental, como un acuífero UH 2 ($k = 20$ m/d) y UH 4 ($k = 100-800$ m/d) y el sector oriental como un acuífero kárstico UH 3, de permeabilidad variable entre 40 m/d y 169.000 m/d.

- Además del acuífero asociado al núcleo, existen otros acuíferos principales identificados de tipo UH 1 (acuífero aluvial borde este) y de tipo UH 2 (acuífero de Monturaqui-Negrillar-Tilopozo), que contribuyen significativamente en la recarga del núcleo del Salar de Atacama. Sin embargo, el borde oeste presentaría una recarga menor, pero existen pocos datos para cuantificar la recarga subterránea de este sector.
- En términos generales, las direcciones de flujo subterráneo son convergentes al núcleo del salar y provienen del norte (desde el delta de San Pedro, acuífero aluvial y depósitos evaporíticos de la zona marginal norte), a lo largo del borde este (acuífero aluvial), sureste (acuífero MNT) y suroeste (aportes menores desde la parte sureste de Cordillera de Domeyko). Los gradientes hidráulicos son bajos ($< 0,0086$) y disminuyen drásticamente en el núcleo del salar.
- Las aguas de recarga, que se encuentran en las partes altas de la cuenca (zona de cordillera) tienen una composición mayoritariamente clorurada-sódica y se encuentran más diluidas que las aguas de la zona marginal o del núcleo.
- Asimismo, desde las zonas de recarga y en la dirección general de flujo, las aguas subterráneas se enriquecen en iones debido al tiempo de residencia en el acuífero y en la zona marginal, donde se produce la cuña salina entre el agua dulce y la salmuera del salar, predominan los procesos de evaporación de las aguas subterráneas al aflorar en superficie, evaporarse y mezclarse con la salmuera del núcleo del salar.
- Los perfiles de resistividad eléctrica obtenidos mediante técnicas electromagnéticas TEM han mostrado muy buenos resultados para la identificación del trazado de interfase salina entre volúmenes de agua correspondientes a aguas frescas de recarga y aguas salinas del acuífero del salar, en el margen este y sur del salar.
- La descarga se produce por bombeo del acuífero aluvial (MNT, borde norte y este), evaporación de la superficie freática en la zona marginal y en la parte del núcleo del salar donde el nivel se encuentra a menos de 2 m de profundidad con respecto la superficie y finalmente, por bombeo de salmuera en el acuífero del núcleo del salar.
- En la zona marginal y el núcleo del salar, es posible distinguir que las facies hidroquímicas son de tipo cloruradas sódicas y que presentan los mayores valores de conductividad eléctrica registrada ($> 250.000 \mu\text{S/cm}$). Además, en estas zonas se encuentra también, la mayor concentración de Li, B, K y Mg.
- Adicionalmente, se observa que los valores isotópicos tanto de las aguas de la Zona Cordillera como del Borde Este, se encuentran empobrecidas en $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$. Los valores observados presentan composiciones isotópicas similares a las muestras de precipitación, sugiriendo una baja o nula afectación de procesos que produzcan fraccionamiento en esta zona. Por tanto, la Zona Cordillera y el Borde Este, pueden considerarse como zonas de recarga desde los

sectores altos de la cuenca, con aguas diluidas (bajas conductividades eléctricas) y empobrecidas isotópicamente, indicando una línea de flujo de oriente a poniente.

- En régimen natural, las entradas son similares a las salidas, 6.810 l/s frente a un intervalo entre 6.575 y 6.975 l/s, respectivamente. Sin embargo, en un sistema influenciado por extracciones antrópicas y para el periodo comprendido entre los años 2000 y 2015, las salidas son superiores a las entradas en la cuenca del Salar de Atacama. De esta forma, las salidas alcanzan un caudal promedio anual de entre 8.442 l/s y 8.842 l/s.
- En la Cuenca Salar de Atacama existen humedales RAMSAR, 1 Reserva Nacional, 1 Santuario de la Naturaleza, 4 Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado (SNASPE), 1 Sitios Prioritarios, 5 Sitios de Estrategias Regionales y varios Acuíferos Protegidos.
- A partir del análisis de la evolución temporal del nivel piezométrico en los pozos del PSA (Plan de Seguimiento Ambiental) de las mineras SQM Salar S.A. y Rockwood Lithium, se concluye que el nivel piezométrico en el acuífero del núcleo de halita está descendiendo aproximadamente con una tasa de entre 0,02 y 0,06 m/año. Sin embargo, el nivel freático en el acuífero de la zona marginal, donde se encuentran los sistemas lagunares, no ha descendido, posiblemente porque se encuentra influenciado mayoritariamente por la recarga subterránea proveniente de los acuíferos de agua dulce-salobre (acuífero aluvial, acuífero de MNT) y por la evaporación. De esta forma, los sistemas lagunares que se encuentran bajo estas condiciones serán más sensibles a los descensos que se produzcan en los acuíferos de agua dulce-salobre que a la extracción de salmuera del núcleo.
- El radio de influencia de los pozos de bombeo del acuífero aluvial, en ausencia de otras alteraciones, podría ser de hasta 5 Km. Hasta diciembre de 2015 (periodo en el que se tienen datos para el presente estudio) no se observan efectos de dicho radio en las inmediaciones de las lagunas.
- 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 se han tenido como finalidad arrojar información en las zonas con mayor incertidumbre y mejorar el modelo hidrogeológico conceptual.
- Por norma general, en los pozos que se construyan con el objetivo de caracterizar la hidrogeología y la geometría del Salar de Atacama, 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.

15. Recomendaciones

Una vez llevado a cabo el modelo hidrogeológico conceptual han surgido una serie de recomendaciones que tienen como finalidad generar más información en las zonas donde existe cierta incertidumbre en las variables hidrogeológicas. El objetivo de estas recomendaciones es proponer trabajos adicionales para mejorar el conocimiento hidrogeológico de la cuenca y gestionar de forma más eficiente y sustentable los recursos hídricos de la cuenca.

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 y geoquímica de salmueras, 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:

- 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).
- Además, se recomienda solicitar a MEL los perfiles de geofísica originales existentes en el acuífero de MNT. Una vez recopilada, se podría valorar la realización de perfiles adicionales para complementar la información, en este sector o en otros.

Monto aproximado: Depende de gran parte de la disponibilidad de la fuente de información de MEL y del precio del documento de Troncoso et al. (2016).

15.2 Recomendaciones de Geología

La **cartografía geológica en superficie** existente en la cuenca presenta diferentes escalas en los cuadrantes de la cuenca. Como se observa en la Figura 15-1 la parte meridional de la cuenca presenta una escala de 1:500.000 y difiere del resto de la cartografía geológica de la cuenca (que se encuentra a 1:250.000). Por otro lado, la caracterización estructural del Salar de Atacama es escasa. Cabe destacar que para realizar un estudio hidrogeológico de mayor detalle que el actual se necesita una cartografía a una escala menor que 1:250.000, por ejemplo, 1:100.000.

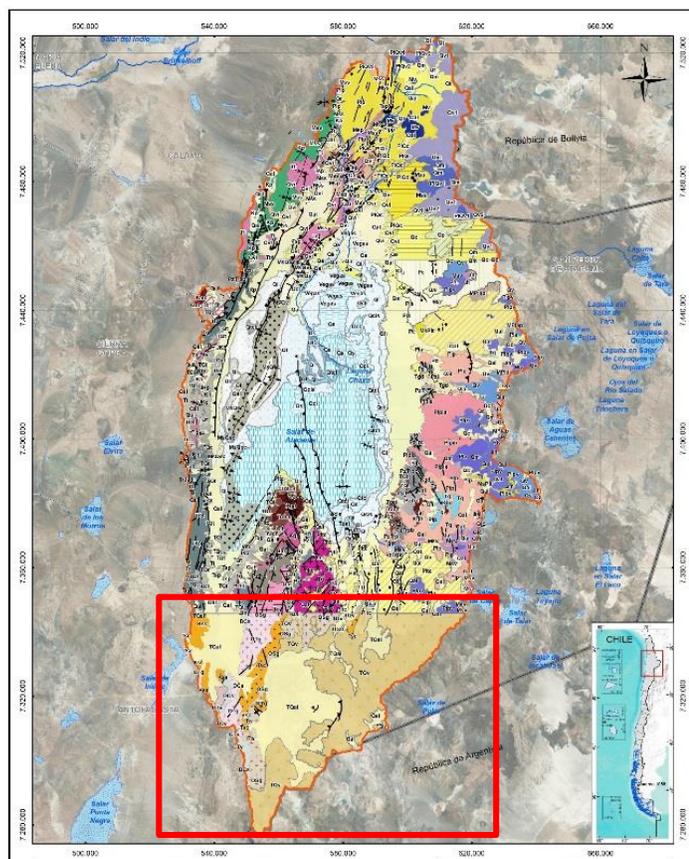


Figura 15-1: Cartografía geológica disponible y utilizada para el análisis de la cuenca del Salar de Atacama.

Trabajos a realizar:

- Para disponer de una cartografía geológica comparable y similar al resto de la cuenca se recomienda realizar un **levantamiento de una cartografía geológica en el sector sur a escala 1:250.000** y un **levantamiento estructural de esta misma zona.**

Duración/Frecuencia: 5-7 meses de ejecución de los trabajos.

Monto aproximado: 50-53 millones de pesos chilenos.

- Para reconocer si las estructuras influyen en el comportamiento hidrogeológico de los acuíferos y en especial en el acuífero del núcleo que contienen la salmuera, se recomienda realizar un **estudio estructural en el Salar de Atacama 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 Recomendación Hidrología y Meteorología

▪ **Mejorar la red de información hidrológica:**

Disponer de **información hidrológica es fundamental** para poder estimar la entrada de agua dentro de la cuenca. Por ello se proponen las siguientes recomendaciones:

Realizar un levantamiento y evaluación de la red de control fluviométrica en los canales, quebradas y ríos aportantes de agua dulce al salar, sobre todo en la parte oriental de la cuenca.

El objetivo es:

- Determinar el estado de la red fluviométrica, validar los datos fluviométricos disponibles y proponer mejoras a la red, a fin de disponer de datos fluviométricos que ayuden a reducir la incertidumbre en la estimación de la recarga del modelo conceptual.

Trabajos a realizar:

- Realizar una visita a terreno y trabajos de gabinete que permita evaluar el estado de la red fluviométrica.
- Plantear mejoras a la red fluviométrica considerando puntos de medición que faciliten la estimación de la recarga de la cuenca aportante. Un ejemplo sería medir el caudal en cauces que pasen sobre sectores de basamento.

- Realizar mediciones sistemáticas en los nuevos puntos con frecuencia mensual durante el primer año y trimestral durante el segundo y tercer año. Es decir, 12 mediciones el primer año, 4 el segundo año y 4 el tercero. En total son 20 mediciones.
- Recolección, validación y publicación de los datos medidos.
- Ajuste de coeficientes de escorrentía (C_e) del modelo conceptual por sectores, según sean los resultados encontrados.

Duración/frecuencia: la frecuencia estimada durante el primer año es mensual (12 mediciones), mientras que para el segundo y tercer año la frecuencia es trimestral (4 mediciones cada año).

Monto aproximado: 101 millones de pesos chilenos.

▪ **Validar y completar las tasas de evaporación:**

Realizar mediciones de **terreno de la evaporación en el sector del núcleo del Salar de Atacama**. El objetivo de estas mediciones es generar datos que permitan estimar de mejor manera la evaporación dentro del núcleo 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. También se recomienda realizar algunas mediciones en la zona marginal, a fin de complementar las mediciones puntuales disponibles en la zona.

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 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 produce ninguna alteración de la costra salina, a diferencia de otras técnicas como los lisímetros. Considerando que la morfología de las costras salinas cambia dramáticamente la respuesta de la evaporación frente a las mismas condiciones climáticas y de profundidad del agua subterránea (Kampf, 2005), se puede decir que las mediciones con *Scintillometer* y/o *Microwave Scintillometer* serían más representativas del fenómeno.

A continuación, se indican algunas empresas proveedoras de los instrumentos: 1) Scintec, 2) Campbell Scientific y 3) Kipp & Zonen.

El objetivo es:

- Mejorar la estimación de la evaporación dentro del núcleo del salar y validar estimaciones en la zona marginal.

Trabajos a realizar:

- Medir datos de terreno con la técnica de *Scintillometer* y/o *Microwave Scintillometer*.
- 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.
- Desarrollar campañas de terreno de medición de la evaporación en al menos 3 sectores amplios del núcleo del salar y en 2 sectores de la zona marginal.
- 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.
- Las campañas de mediciones dentro del núcleo del salar pueden ser de corta duración (una semana de registros), ya que la profundidad de la napa presenta escasa variabilidad interanual. Por otro lado, se recomienda que las mediciones en la zona marginal se extiendan por 12 meses, a fin de caracterizar la estación seca y la estación húmeda (invierno altiplánico). De esta forma se busca medir el efecto en los cambios de la profundidad en la evaporación normalizada.

Duración/frecuencia: la duración estimada para las campañas de mediciones en el núcleo es de 2 meses, mientras que las mediciones en la zona marginal tendrán una duración de 12 meses.

Monto aproximado: el proyecto tiene un costo de 130 millones de pesos chilenos. El valor referencial de compra del *Scintillometer* €25.600 más IVA.

▪ **Disponer de la magnitud de eventos de precipitación sólida:**

Se recomienda realizar un estudio que evalúe la frecuencia y magnitud de eventos de precipitación sólida en la cuenca en base a un levantamiento de imágenes satelitales del área de estudio. Este trabajo permitirá caracterizar la distribución espacial y temporal de los mantos de nieve sobre el área de estudio. Un trabajo de estas características debería entregar al menos el área cubierta por nieve luego de eventos de precipitación sólida importantes, así como la frecuencia de la ocurrencia de nevazones.

El objetivo es:

- Determinar el grado de relevancia de las precipitaciones sólidas respecto del total de precipitaciones en el área de estudio.

Trabajos a realizar:

- Levantamiento de imágenes satelitales históricas de al menos un ciclo del fenómeno ENSO (niño-niña) (aproximadamente 12 años). La frecuencia de muestro puede ser mensual y se deben analizar las imágenes disponibles posteriores a nevazones.
- Determinación de área cubierta por el manto de nieve y la duración antes del derretimiento.
- Determinación de la frecuencia de ocurrencia de eventos nivales significativos en el área de estudio.
- Evaluar el impacto que tienen las precipitaciones sólidas en comparación con las precipitaciones líquidas.

Duración/frecuencia: la duración estimada para el estudio es de 1 mes.

Monto aproximado: 21-23 millones de pesos chilenos (en función del método y de la imagen satelital adquirida).

▪ **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 Atacama. 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 Atacama, mejorar la relación determinada entre índice de humedad y profundidad e incorporar nueva información de profundidad registrada en la zona marginal.

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.
- Actualizar 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 con un mayor conocimiento de las tasas de infiltración mediante el ensayo de infiltración con doble anillo.

El objetivo es:

- Determinar las tasas de infiltración mediante el ensayo del doble anillo.

Trabajos a realizar:

- Identificar los distintos tipos de suelo en la cuenca y seleccionar sitios representativos para realizar los ensayos, teniendo en cuentas las áreas de recarga definidas, etc.
- Instalar los anillos de infiltración en terreno según la estructura propuesta en la Figura 15-2.
- 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 15-2: propuesta de instalación de los anillos de infiltración

Duración/frecuencia: la duración estimada para el estudio es de 1 mes y se recomienda al menos 40-45 ensayos.

Monto aproximado: 27-32 millones de pesos chilenos

15.4 Recomendaciones de Geofísica

La definición de los métodos geofísicos a utilizar en el futuro, deben estar orientados resolver incertidumbres del modelo hidrogeológico conceptual.

Cabe tener en cuenta que los resultados geofísicos (métodos indirectos) deben ser validados con perforaciones, perfiles de conductividad eléctrica en pozos y muestreo hidroquímico (métodos directos). De esta forma, el diseño de las campañas de geofísica debe plantearse teniendo en cuenta el criterio anterior. Es recomendable utilizar la información existente para validar los resultados geofísicos. A continuación, se presenta los trabajos de geofísica recomendados.

- Se propone una revisión y re-análisis de los perfiles sísmicos originales, con un enfoque en la identificación de estructuras y unidades de distinta respuesta sísmica en la parte más superficial del relleno de la cuenca (sobre los 1.100 m de profundidad). Un enfoque de este tipo, podría ayudar a clasificar unidades de distinta estructura y configuración dentro del salar.

Duración/frecuencia: la duración estimada para el estudio es de 2 meses.

Monto aproximado: Depende en gran parte de la disponibilidad de la fuente de información de ENAP.

- Se recomienda efectuar una campaña de prospección con la técnica electromagnética TEM en la parte norte del salar, que cubra la zona ocupada por el delta del río San Pedro y Vilama, con el objetivo de determinar la existencia y extensión de una probable cuña salina. Se propone la realización de al menos 4 líneas de prospección de orientación preferente norte-sur y al menos 2 líneas de orientación preferencial este-oeste, con una extensión total aproximada de 120 km.

Duración/frecuencia: la duración estimada para el estudio es de 3 meses.

Monto aproximado: 120 – 130 millones de pesos chilenos.

- Se recomienda realizar ensayos hidráulicos en pozos, perfiles verticales de conductividad eléctrica, temperatura y pH, gamma natural (para determinar la presencia de arcillas), televiwer (para determinar la presencia de fracturas, su orientación y relacionar éstas con los parámetros hidráulicos) en pozos con el objetivo de calibrar los perfiles geofísicos TEM e identificar y caracterizar unidades geoelectricas (UGS), sobretodo en el oeste del salar (porque no se han podido diferenciar bien las unidades). Además, se recomienda extraer muestras de agua representativas de las UGS. Lo anterior se puede aplicar a los estudios geofísicos que se realicen en el área de estudio.

Duración/frecuencia: la duración estimada para el estudio es de 5-6 meses.

Monto aproximado: 65 –73 millones de pesos de chilenos.

- Se recomienda realizar una campaña geofísica de TEM y NanoTEM en el núcleo (donde no existe información pública disponible) para validar y caracterizar los distintos acuíferos diferenciados (Acuífero superior de halita, acuífero intermedio, acuífero profundo) y además, validar dichas prospecciones con lo que se ha especificado en el párrafo anterior. Adicionalmente, se recomienda realizar perfiles sísmicos en el núcleo para obtener la geometría del basamento de edad miocena que contiene los depósitos evaporíticos. Se recomienda que sobre la misma traza se realicen perfiles sísmicos y TEM-NanoTEM y que la ubicación de los perfiles conforme una cuadrícula (perfiles norte-sur y este-oeste), al menos 70 Km de perfiles (entre ambos), con estaciones TEM cada 250 m y NanoTEM cada 50 m.

Duración/frecuencia: la duración estimada para el estudio es de 4-5 meses.

Monto aproximado: 90-100 millones de pesos de chilenos.

- Considerando los resultados obtenidos desde mediciones gravimétricas, donde se observó que sólo sería posible trazar un límite densidad contrastante a profundidades entre 2.300 a 2.700 m de profundidad, se considera que la técnica gravimétrica no debe ser prioritaria para la exploración de la base de las formaciones acuíferas. Previo a la utilización debiera ser requisito la existencia de al menos dos pozos de control, en los que se hayan identificado unidades de densidad lo suficientemente contrastadas como para poder correlacionar las mediciones con esta técnica.

15.5 Recomendaciones de Hidrogeología

Las siguientes recomendaciones están orientadas a conocer con más exactitud el comportamiento hidrogeológico de los sistemas acuíferos, obteniendo datos de nivel y parámetros en aquellas zonas donde son escasos. Por ello, se propone:

Trabajos a realizar:

- **Para contribuir al conocimiento del acuífero kárstico definido** se recomienda realizar al menos 3 pruebas de bombeo con pozos de observación en el sector oriental del núcleo, para validar que los valores de los parámetros hidráulicos corresponden a un acuífero kárstico, además, realizar ensayos de trazador para determinar velocidades de flujo, direcciones de flujo preferentes, y adicionalmente, realizar un análisis con televiewer en la vertical de los pozos utilizados para las pruebas hidráulicas para observar la dimensión de las fracturas, orientaciones preferenciales, etc. Además, se recomienda hacer perfiles de densidad-conductividad eléctrica en los pozos de monitoreo para ver si existe una estratificación vertical de la densidad y determinar así, si la permeabilidad de estas zonas estratificadas varía en una capa y otra. Esto se debe tener en cuenta porque la permeabilidad hidráulica depende en parte, de la densidad del fluido.

Duración/frecuencia: 2-3 meses de trabajo.

Monto aproximado: 41-47 millones de pesos chilenos.

- **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.

- La piezometría elaborada en el presente informe corresponde a agosto de 2013 debido a que el mayor número de puntos con información de nivel y la fecha más actualizada disponible atendiendo a la condición anterior, es agosto 2013. Por ello se propone, hacer **una campaña de terreno con un monitoreo de niveles**, mediante pozos y/o piezómetros preexistentes (300 puntos).

Duración/frecuencia: 3-4 meses de trabajo.

Monto aproximado: 35-42 millones de pesos chilenos.

- Una vez realizado el monitoreo de niveles de agua para verificar la información disponible, **se propone realizar un Plan de monitoreo:**

Duración/frecuencia: 2 semanas de trabajo en gabinete interpretando y proyectando toda la información recopilada de la campaña de terreno.

Monto aproximado: 9-12 millones de pesos chilenos.

- **Instalación de 35-40 punteras** (pozos de poca profundidad) en las zonas cercanas a sectores de explotación o zonas vulnerables (en las lagunas de Zona Marginal). Se recomienda que la DGA o entidad pública similar tenga acceso a los pozos de monitoreo de terceros, comprometidos en el monitoreo PSA (Plan de Seguimiento Ambiental) de los RCA (Resolución de Calificación Ambiental).

Duración/frecuencia: 2-3 meses de trabajo.

Monto aproximado: 62 millones de pesos chilenos.

- **Instrumentar algunos puntos más relevantes con sensores/divers** de nivel para que se transfieran los datos en línea.

Duración/frecuencia: 1 jornada de trabajo (instalación) por punto.

Monto aproximado: 1,9-2,3 millones de pesos chilenos por sensor instalado (por pozo).

- Se recomienda realizar una campaña de perforación de exploración geológica/hidrogeológica con la finalidad de:
 - a. Levantamiento mineralógico y litológico en el salar y los dos acuíferos aluviales con el fin de conocer la mineralogía en el salar y verificar la geometría de los acuíferos y basamento. Además, se podrá determinar la concentración de metales de interés económico.
 - b. Realización de pruebas de bombeo, al menos de 24 horas de bombeo y su correspondiente recuperación. El objetivo principal de los ensayos de bombeo es la obtención de parámetros hidráulicos (T, K y S) a partir de ensayos hidráulicos.
 - c. Incorporar los pozos anteriores a la red de monitoreo para el control de niveles y calidad de agua.

Se recomienda llevar a cabo la ejecución de 20 pozos de exploración y 5 pozos de bombeo para ensayos de bombeo

- 1 pozo de exploración de aproximadamente 1.300 m de profundidad en el acuífero del salar caracterizar hidrogeológicamente los materiales atravesados y conocer la profundidad a la que se encuentra el basamento.

- 7 pozos de observación (200-250 m) situados en el propio salar para determinar la mineralogía y geoquímica de la salmuera además de poder caracterizar los diferentes acuíferos en el salar.
- 6 pozos de observación en los aluviales en el entorno del Salar para verificar litología y 4 pozos de bombeo próximos a los de observación para realizar pruebas de bombeo. Se recomienda obtener un mayor conocimiento de los esquemas constructivos de los pozos que se encuentran en el acuífero aluvial y realizar pruebas de bombeo específicas para determinar parámetros hidráulicos y niveles del acuífero superior y del inferior y observar así, relaciones hidráulicas entre ambos.
- 6 pozos de observación en el Acuífero de Monturaqui con la finalidad de estudiar con más detalle los radios de influencia del bombeo que se produce en los acuíferos de agua dulce-salobre (acuífero aluvial y acuífero MNT) y 2 pozos de bombeo para verificar el coeficiente de almacenamiento.

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 que lodos de perforación (en ningún caso bentonita). La habilitación de los sondajes sería en PVC y los diámetros se recomiendan entubarlos a 2" o 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: 10-12 meses de ejecución de los trabajos.

Monto aproximado: 7-8 mil millones de pesos chilenos.

- **Plan de Vigilancia de niveles:** una vez levantado el inventario de pozos de la cuenca de estudio e incorporados los pozos perforados y las punteras construidas se recomienda desarrollar un Plan de monitoreo de vigilancia de los niveles de agua con campañas periódicas, la menos, semestrales, con la medición de 150 niveles en cada una de ellas.

Duración/frecuencia: 4 campañas semestrales.

Monto aproximado: 86-91 millones de pesos chilenos.

- **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 de tener en cuenta que para la zona marginal la precisión topográfica que se necesita es 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 1,2 g/cm³) a una densidad equivalente de agua dulce (1 g/cm³). 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: solicitarlo que los instalen los usuarios con 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: solicitarlo que los instalen los usuarios con 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 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 90-100 Tabla 15-2 puntos de agua (en algunos puntos del salar a varias profundidades). 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.

Duración/frecuencia: 4 campañas semestrales.

Monto aproximado: 200-230 millones de pesos chilenos (el monto puede variar en función del listado de parámetros de la analítica elegida).

Parámetros Físico-Químicos							
Conductividad Eléctrica	SM 2510 B Ed.22	µS/cm a 25°C	10	pH	SM 4500 H		0.1
Sólidos Totales Disueltos	SM 2540C Ed.23	mg/L	10				
Cationes +							
Calcio Disuelto	SM 3120 B Ed.22	mg/L	2.5	Magnesio Disuelto	SM 3120 B Ed.22	mg/L	0.3
Potasio Disuelto	SM 3120 B Ed.22	mg/L	2	Potasio Disuelto	SM 3120 B Ed.22	mg/L	2
Sodio Disuelto	SM 3120 B Ed.22	mg/L	2.5				
Aniones -							
Alcalinidad Total	IT-610	mg/L CaCO ₃	10	Bromuros	PE-2090	mg/L	0.1
Carbonatos	IT-610	mg/L 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				
Metales Disueltos							
Aluminio Disuelto	PE-303	mg/L	0.005	Antimonio Disuelto	PE-303	mg/L	0.00025
Arsénico Disuelto	PE-303	mg/L	0.00025	Bario Disuelto	PE-303	mg/L	0.00025
Berilio Disuelto	PE-303	mg/L	0.00025	Bismuto Disuelto	PE-303	mg/L	0.00025
Boro Disuelto	PE-303	mg/L	0.005	Cadmio Disuelto	PE-303	mg/L	5e-005
Cobalto Disuelto	PE-303	mg/L	5e-005	Cobre Disuelto	PE-303	mg/L	0.00025
Cromo Disuelto	PE-303	mg/L	0.00025	Escandio Disuelto	PE-303	mg/L	5e-005
Estaño Disuelto	PE-303	mg/L	0.00025	Estroncio Disuelto	PE-303	mg/L	0.00025
Fósforo Disuelto	PE-303	mg/L	0.005	Galio Disuelto	PE-303	mg/L	0.0001
Hierro Disuelto	PE-303	mg/L	0.005	Litio Disuelto	PE-303	mg/L	0.00025
Manganeso Disuelto	PE-303	mg/L	0.0005	Mercurio Disuelto	PE-303	mg/L	0.00010
Molibdeno Disuelto	PE-303	mg/L	0.00025	Níquel Disuelto	PE-303	mg/L	0.00025
Plata Disuelta	PE-303	mg/L	0.0005	Plomo Disuelto	PE-303	mg/L	0.00025
Selenio Disuelto	PE-303	mg/L	0.00025	Talio Disuelto	PE-303	mg/L	5e-005
Teluro Disuelto	PE-303	mg/L	0.0001	Titanio Disuelto	PE-303	mg/L	0.00025
Torio Disuelto	PE-303	mg/L	5e-005	Uranio Disuelto	PE-303	mg/L	5e-005
Vanadio Disuelto	PE-303	mg/L	0.00025	Wolframio Disuelto	PE-303	mg/L	0.00025
Zinc Disuelto	PE-303	mg/L	0.005				

Tabla 15-2. Listado de parámetros posibles a analizar en laboratorio.

15.7 Recomendación de Modelos Numéricos

A continuación, se presenta un breve resumen del contenido que se describe en el capítulo 2.10 del actual informe, en el que se detallan las características de los modelos números existentes en la cuenca Salar de Atacama.

- *CSIC (2017). Cuarta actualización del modelo hidrogeológico del Salar de Atacama. SQM Salar S.A*

Esta revisión corresponde a la cuarta actualización del modelo de flujo de agua subterránea del “Proyecto Cambios y Mejoras de la Operación Minera en el Salar de Atacama”, contemplado en el Plan de Seguimiento Ambiental Hidrogeológico de Salar de Atacama.

Este modelo numérico fue construido en la plataforma FEEFLOW v 7.0, que utiliza elementos finitos para resolver las ecuaciones de flujo que describen el comportamiento hidrogeológico

del sistema. Se trata de un modelo numérico de flujo en medio saturado, que permite representar el comportamiento del sistema tanto en régimen estacionario como transitorio.

- *CPH & Asociados S.A (2017). Adenda 3. Anexo 6. Estudio hidrogeológico del Salar de Atacama. Modelación numérica. Rev. 0. SLM NX Uno de Peine.*

El modelo numérico se desarrollado a partir del modelo de simulación del DICTUC del 2004. Se complementa con la adición de nuevos sondajes y nueva geofísica. A partir de los valores de niveles obtenidos, se puede concluir que el modelo reproduce niveles registrados y las tendencias de los mismos; a partir de la calibración, se puede simular la explotación de salmueras en el núcleo del salar; y finalmente, las diferentes lagunas, de los Flamencos, Quelana y Peine, no resultan afectadas por los bombeos.

- *SGA. Solución en Gestión Ambiental (2015). Adenda 5. Anexo I. Estudio Hidrogeológico y modelo numérico sector sur del Salar de Atacama. EIA Proyecto modificaciones y mejoramiento del sistema de pozas de evaporación dólar en el Salar de Atacama. Rockwood Lithium.*

El objetivo principal del trabajo consiste en la predicción de la evolución de las diferentes variables del sistema hidrogeológico del Salar de Atacama. A partir de una buena conceptualización del funcionamiento hidráulico de la zona de estudio, el trabajo reproduce las condiciones actuales en la zona de estudio. Una vez realizada la determinación de los parámetros hidráulicos de las diferentes unidades hidrogeológicas, el modelo tiene la capacidad de predecir la evolución del sistema en diferentes escenarios.

- *Igsa Consultores, Prammar Ambiental Consultores e Ingeniería Dictuc. (2004-2006). EIA Cambios y mejoras en la operación minera en Salar de Atacama. SQM Salar S.A.*

El archivo corresponde a un modelo hidrogeológico para la correcta predicción y la evaluación a futuro del funcionamiento del salar, en base a las diferentes operaciones de las empresas mineras que operan en la zona.

El modelo se encuentra realizado en MODFLOW, representando a la zona medio-sur del Salar de Atacama. Presenta un tamaño de celda comprendido entre 250 hasta 1.000 m. las condiciones iniciales del modelo se han definido en base a los registros obtenidos en 180 pozos de observación y de bombeo.

Las condiciones de contorno implementadas corresponden a la evaporación, a la recarga por precipitación y lateral de los diferentes aportes a la cuenca y, finalmente, la representación de los sistemas lacustres de Soncor, Aguas de Quelana y Peine.

- *Durán J. (2012). Modelación numérica y su contribución al estudio del comportamiento hidrogeológico del sector SW del acuífero del salar de atacama. II Región de Antofagasta, Chile. Universidad de Chile.*

Trabajo de modelación numérica concerniente al estudio del comportamiento hidrogeológico del sector SW del Salar de Atacama. La información utilizada es la de SQM, pero solo se expone la información que no es confidencial.

A partir de la información de antecedentes consultada en relación a los modelos numéricos es posible identificar que las áreas de modelación corresponden a zonas concretas donde se desarrolla la operación y además, dichas áreas no coinciden con la que se establece en el modelo conceptual de cada trabajo en particular. Para realizar una gestión sustentable de la cuenca y atendiendo a que los acuíferos existentes presentan conexión hidráulica, se recomienda la construcción de un modelo numérico que integre todos los acuíferos identificados.

Trabajos a realizar:

Se recomienda realizar un modelo numérico hidrológico para determinar la recarga con mayor precisión y un modelo numérico hidrogeológico para obtener el funcionamiento hidrogeológico de la cuenca.

- **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 4-5 meses.

Monto aproximado: 31-33 millones de pesos.

▪ **Elaboración de un nuevo modelo numérico hidrogeológico:**

En la zona de estudio los acuíferos existentes presentan conexión hidráulica por ello se recomienda la construcción de un nuevo modelo numérico que integre la totalidad del sistema acuífero (Salar, Aluviales del entorno del Salar y Aluvial de Monturaqui).

El proyecto a desarrollar podría construirse a partir de la utilización acoplada de los códigos MODFLOW y SEAWAT, por ser una plataforma más económica y estandarizada que otras plataformas y ofrece los mismos resultados para el objetivo del proyecto.

Se recomienda que el modelo numérico se construya 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 de la cuenca esté por debajo del 2%. Tanto los parámetros hídricos como las propiedades del transporte, se calibrarán en función de los datos recopilados en la campaña de terreno.

La información generada se entregará en formato GIS, en coordenadas WGS 84 Datum 19S y los archivos del modelo de flujo en la plataforma MODFLOW junto a toda la información digital base ordenada bajo una estructura temática acordada.

En la elaboración del modelo numérico de la cuenca, 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 se debe considerar una malla de 200 x 200 y en las zonas de pozos, río y humedales, lagunas, un mayor refinamiento de la malla.
- 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: 6-7 meses

Monto aproximado: 100-120 millones de pesos chilenos.

16. Bibliografía

- Alonso H. y Risacher F. (1996) Geoquímica del Salar de Atacama, parte 1: origen de los componentes y balance salino. Revista geológica de Chile. Vol.23. N°2, p. 113-122.
- AC Ingenieros consultores (1995). Radio de protección zanja sector Tucúcaro. San Pedro de Atacama, II Región, Chile.
- AC Ingenieros consultores (1996). Modelación del sistema acuífero del Salar de Atacama. Informe final, Junio 1996. AC para SCL, Sociedad Chilena del Litio.
- 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.
- Aron, F., González, G., Veloso, E., y Cembrano, J. (2008). Architecture and style of compressive Neogene deformation in the eastern-southeastern border of the Salar de Atacama Basin (22° 30'-24° 15's): A structural setting for the active volcanic arc of the Central Andes. 7th International Symposium on Andean Geodynamics (ISAG), 52-55.
- Arriagada et al. (2006). Salar de Atacama basin: A record of compressional tectonics in the central Andes since the mid-Cretaceous. Tectonics, 25(1)
- Ayala L. & Cabrera G. (1985). Salar de Atacama Northern clay area experiment on movement of pond leakage. Final report. Stage I & Stage II. Vol.2. Sociedad Chilena de Litio Ltda.
- Ayala, Cabrera y Asociados (1989). Asesoría Profesional: Informe de Avance N° 2, Octubre 1989, AC para SCL, Sociedad Chilena del Litio.
- 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.
- Boric, Díaz y MaksaeV (1987). Geología y yacimientos metalíferos de la Región de Antofagasta. Hoja 2 de 2 (Sector Sur). Escala 1:500.000. Región de Antofagasta. Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN).
- Clark, I. y Fritz, P. (1997). Environmental isotopes in hydrogeology.
- CONAMA (2003). Proyecto de estudio y Monitoreo del Recurso Hídrico de la Cuenca del Salar de Atacama, Antofagasta, Chile. Estudio solicitado por CONAMA (Comisión Nacional de Medio Ambiente) a las empresas: SQM (Sociedad Química y Minera de Chile), MEL (Minera Escondida), CMZ (Compañía Minera Zaldívar) y SCL (Sociedad Chilena del Litio).
- CORFO (1978). Cubicación del yacimiento Salar de Atacama. Corporación de fomento de la producción. Subgerencia desarrollo agrícola industrial. Área química. Santiago, Chile.

CORFO-FOOTE (1979). Proyecto de Desarrollo del Litio en Salar de Atacama. Convenio de colaboración de CORFO con Foote Lithium.

Corporación de Fomento de la Producción (1983). The Salar de Atacama Project. Papers presented to the Sixth International Symposium on Salt, Toronto.

CPH & Asociados S.A (2017). Adenda 3. Anexo 6. Estudio hidrogeológico del Salar de Atacama. Modelación numérica. Rev. 0. SLM NX Uno de Peine.

CPH Consultores y Asociados S.A. (2008). Adenda 2: EIA Planta de Producción de sales de potasio SLM NX Uno de Peine. Modelo numérico.

CPH Consultores y asociados S.A. (2017). Adenda III Anexo 5. Estudio Hidrogeológico del Salar de Atacama. Modelo Conceptual. Proyecto SLM NX Uno de Peine Rev.0. EIA Planta de Producción de Sales de Potasio. Realizado para Minera SLM NX Uno de Peine.

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>

CSIC (2017). Cuarta actualización del modelo hidrogeológico del Salar de Atacama. SQM Salar S.A

Custodio, E. y Llamas, R. (2001). Hidrología Subterránea. 2 ed. Ediciones Omega S.A., Barcelona, ISBN 84-282-0446-2. (Tomo I y II).

Dalannais, L. (1979). Hidrogeología del Borde Oriental del Salar de Atacama. Tesis de Grado para optar a Título de Geólogo, Universidad del Norte, Departamento de Geología, Antofagasta, Chile.

De Bruin, HAR; Wang, J. (2017). Scintillometry: a review.

DGA (1987). Balance Hídrico de Chile. Ministerio de Obras públicas. Departamento de Administración de Recursos Hídricos.

DGA (1999). Evaluación de la disponibilidad de recursos hídricos para constituir derechos de aprovechamiento en las subcuencas afluentes al Salar de Atacama. II Región. Minuta técnica N°60. Ministerio de Obras Públicas. Departamento de Administración de Recursos Hídr.

DGA (2010). Actualización de la evaluación de la disponibilidad de recursos hídricos para construir derechos de aprovechamiento en las subcuencas afluentes al salar de Atacama.S.I.T. 210, pp 277). Ministerio de Obras Públicas. Realizado por GCF.

DGA (2012). Informe Técnico SDT N° 324 de febrero de 2012. “Evaluación de los Recursos Hídricos Subterráneos del Acuífero del Salar de Atacama”.

DGA (2013). Informe Técnico SDT N°339 de 2013 “Análisis de la Oferta Hídrica del Salar de Atacama”.

DGA (2014). Informe Técnico DARH N° 234 (DGA, 2014). Evaluación de la disponibilidad de recursos hídricos subterráneos en los sectores acuíferos del Salar de Atacama.

Díaz del Río et al. (1999). Informe final del estudio, análisis y planificación de los recursos de agua en la Segunda Región de Antofagasta. Informe técnico (inédito). Intendencia II Región, 185 p.

Díaz del Río, Bonilla Parra y Peralta Toro (1972). Geología de superficie, sub-superficie y geoquímica del Salar de Atacama. Departamento de recursos hidráulicos Corfo.

DGA-DIHA PUC (2009). Levantamiento hidrogeológico para el desarrollo de nuevas fuentes de agua en áreas prioritarias de la zona norte de Chile.

DICTUC. (2004). Modelo hidrogeológico del acuífero de Salmuera del Núcleo del Salar de Atacama. Descripción del modelo y simulaciones. Estudio de Impacto Ambiental Cambios y Mejoras en la operación minera del Salar de Atacama. Informe para SQM. DICTUC (2009)

División de Estudios y Planificación de la DGA (2016). Sistematización de información de los recursos hídricos del Salar de Atacama para un futuro plan de gestión. SDT N 392. Santiago, Chile.

Durán J. (2012). Modelación numérica y su contribución al estudio del comportamiento hidrogeológico del sector sw del acuífero del salar de atacama. II Región de Antofagasta, Chile. Universidad de Chile.

EDRA. (1997). Evaluación Hidrogeológica Acuífero Sector Norte Salar de Atacama. Compañía Minera RioChilex. Santiago, Chile.

Escuder R.; Fraile, J.; Jordana, S. Ribera, F. Sánchez, V. y Vázquez, E. (2009). Hidrogeología. Conceptos Básicos de Hidrología Subterránea. Editores: Comisión Docente Curso Internacional de Hidrología Subterránea. Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea (FCIHS). Primera Edición. Barcelona (España).

Everitt, JD; Escobar, DE; Gerbermann, AH; Alaniz, MA. (1988). Detecting saline soils with video imagery. Photogramm. Eng. Remote Sens. 54.

G.E. Ericksen, G. Chong, T. Vila (2000). Lithium Resources of Salars in the Central Andes. U.S. Geological Survey, Universidad del Norte (Antofagasta) & Instituto de Investigaciones Geológicas.

Finger, Michael; et al. (2013). Análisis de la oferta hídrica del salar de Atacama. SDT N° 339. División de estudios y planificación, DGA.

Flint, S. T. (1993). Extensional tectonics in convergent margin basins: An example from the Salar de Atacama, Chilean Andes. Geological Society of America. Bulletin 105, 603-617.

Fock, A. (2009). Estudio del Acuífero aluvial del borde Este del Salar de Atacama, entre Quebradas Camar y Socaire, Comuna San Pedro de Atacama, II Región de Antofagasta, Chile. FCIHS Fundación centro Internacional de Hidrología subterránea.

GCF Ingenieros Consultores (2001). Sondajes de exploración de salmueras en el Salar de Atacama: Asesoría y Estudio para la caracterización de las reservas de salmueras. Informe Final GCF para SCL, Sociedad Chilena del Litio.

Gestión Ambiental Consultores (2009). Estudio de Impacto Ambiental Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama Región de Antofagasta, Chile. Para SCL Sociedad Chilena del Litio. Santiago, Chile.

GCF Ingenieros Limitada (2010). Actualización de la evaluación de la disponibilidad de recursos hídricos para constituir derechos de aprovechamiento en las subcuencas afluentes al salar de Atacama. Región II. DGA.

Geodatos - SAIC (2015). Estudio geofísico para la modelación hidrogeológica del Salar de Atacama. Estudio geofísico mediante MT, GRAV y TEM. Geofísica Salar de Atacama. Región de Antofagasta. Dirección General de Aguas. SIT N°368.

Geodatos (2004). Estudio geofísico de transiente electromagnético TEM. Margen oriental Salar de Atacama. Antofagasta II Región de Chile. Cominor Ingeniería y Proyectos S.A. Adenda 2. Anexo 5.2. Proyecto Planta de Producción de Sales de Potasio. SLM NX Uno de Peine.

Geodatos (2008). Estudio geofísico de transiente electromagnético TEM. Sector Borde Oeste Salar de Atacama. Recopilación años 2004-2006-2007. Comuna: San Pedro de Atacama. Provincia: El Loa-II Región. Cominor S.A. Adenda 2. Anexo 5.3. Proyecto Planta de Producción de Sales de Potasio. SLM NX Uno de Peine.

Geodatos (2011). Estudio geofísico de transiente electromagnético TEM y NanoTem. Proyecto: Soncor. Salar de Atacama, II Región. Adenda 2. Anexo 4. Proyecto Planta de Producción de Sales de Potasio. SLM NX Uno de Peine.

Geodatos (2013). Estudio geofísico NanoTEM y TEM: Proyecto sector Sur Salar de Atacama. Región de Antofagasta, Chile. Informe Geodatos para SCL (Sociedad Chilena del Litio).

Geodatos (2015). Estudio geofísico para la modelación hidrogeológica del Salar de Atacama

Geodatos (2014). Estudio geofísico mediante MT y TEM. Proyecto borde oriental cuenca Salar de Atacama. ICASS LTDA - Dirección General de Aguas.

Golder Associates (2007). Estudio de impacto ambiental Proyecto Monturaqui.

Golder Associates (2017). Anexo IV.1 Modelo Hidrogeológico. Modelo Hidrogeológico conceptual y Numérico para el Acuífero de Monturaqui-Negrillar-Tilopozo. EIA Proyecto Monturaqui. Minera Escondida.

Gustavo Lagos et al., (1982). EL LITIO, un nuevo recurso para Chile. Universidad de Chile. Departamento de Ingeniería en Minas. Inscripción N° 64.793.

Harza (1978). Desarrollo de los recursos de agua en el norte grande, Chile. Con el Proyecto CHI-69/535 CORFO-DGA-CCC-P.N.U.D. para las Naciones Unidas.

Hauser (1997). Catastro y caracterización de las fuentes de aguas minerales y termales de Chile.

Houston, John (2006). Evaporation in the Atacama Desert: An empirical study of spatio-temporal variations and their causes. *International Journal of Hydrology* 330.

Houston, John (2006). Variability of precipitation in the Atacama Desert: its causes and hydrological impact. *International Journal of Climatology* 26.

Hydrotechnica (1987). Evaluation of brine reserves in the Salar de Atacama.

Hydrotechnica (1988). Evaluation of brine reserves in the Salar de Atacama. Salar de Atacama. Phase 3B. Hydrological Investigations. Volume I. Report Text. 5.1076/R7. Minsal Ltda. Santiago de Chile.

ICASS (2014). Análisis de los Mecanismos de Evaporación y Evaluación de los Recursos Hídricos del Salar de Atacama. Informe Final. S.I.T. N°357. Santiago, diciembre de 2014. Realizado para DGA.

ICASS (2014). Análisis de los Mecanismos de Evaporación y Evaluación de los Recursos Hídricos del Salar de Atacama. Dirección General de Aguas (DGA) SIT N° 137. Santiago, Chile.

Igsa Consultores, Pramar Ambiental Consultores e Ingeniería Dictuc. (2004-2006). EIA Cambios y mejoras en la operación minera en Salar de Atacama. Realizado para SQM Salar S.A.

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.

Jordan TE, Mpodozis C., Muñoz N., Blanco N., Panamont P., Gardew M. (2007). Cenozoic subsurface stratigraphy and structure of the Salar de Atacama Basin, northern Chile. *Journal of South American Earth Sciences* 23,122-146.

Kampf, Stephanie; et al. (2005). Evaporation and land surface energy budget at the salar de Atacama, northern Chile. *Journal of Hydrology* 310.

Kampf, Stephanie; Tyler, Scott (2006). Spatial characterization of land surface energy fluxes and uncertainty estimation at the salar de Atacama, northern Chile. *Advances in Water Resources* 29.

Kostiakov, A.N. (1932). On the dynamics of the coefficient of water-percolation in soils and on the necessity of studying it from a dynamic point of view for purposes of amelioration, Transactions Congress International Society for Soil Science, 6th, Moscow Part A, p.17-21

Li, Linlin; et al. (2015). Evaluation of MODIS Spectral Indices for Monitoring Hydrological Dynamics of a Small, Seasonally-Flooded Wetland in Southern Spain. *Wetlands* 35.

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.

Marinovic, N. y Lahsen, A. (1984). Carta geológica de Chile. Escala 1:250.000. Hoja de Calama. Región de Antofagasta. Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN).

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.

Moraga, A.; Chong, G.; Fortt, M.A. y Henríquez, H. (1974). Estudio geológico del Salar de Atacama, Provincia de Antofagasta. Boletín N° 29 del Instituto de investigaciones Geológicas, Chile. Mpodozis y Ramos, 1990.

Muñoz J. 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 IV. Campañas de Muestreo Geoquímicos e Isotópicos. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental Pontificia Universidad Católica de Chile. S.I.T. N° 195, DGA.

Muñoz N. y Townsend F. (1997). Estratigrafía de la Cuenca Salar de Atacama. Resultados del Pozo exploratorio Toconao-1. Implicancias Regionales. Universidad Católica del Norte. Departamento de Ciencias Geológicas. VIII Congreso Geológico Chileno. Actas Vol. I. Sesión Temática 3. Páginas 555-558.

Muñoz N., Charrier R., Jordan T. (2002). Interactions between basement and cover during the evolution of the Salar de Atacama Basin, Northern Chile. *Revista geológica de Chile.* Vol. 29. N° 1. P. 55-80.

Muñoz, J; Ortiz, C; Mardones, L; y Vidts, P. (2004). Funcionamiento Hidrogeológico del acuífero del núcleo del Salar de Atacama, Chile. *Ingeniería Hidráulica en México*, vol. XIX, nº3, 69-81.

Ordoyne, C; Friedl, MA. (2008). Using MODIS data to characterize seasonal inundation patterns in the Florida Everglades. *Remote Sensing of Environment* 112.

Pettorelli, N; Vik, JO; Mysterud, A; et al. (2005). Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in Ecology & Evolution* 20.

Peña, Humberto et al. (1986). Balance Hidrológico Nacional, II Región. DGA.

PRAMAR Ambiental (2006). Anexo V: Adenda II: Estudio de Impacto Ambiental Cambios y Mejoras de la Operación minera en el Salar de Atacama. Pramar Ambiental para SQM, Sociedad Química y Minera de Chile

Quinta Drilling (2014). Estimación de Reservas de Litio, Sector borde Sur, Salar de Atacama, Región de Antofagasta. Informe Final, Quinta Drilling para Rockwood Lithium

Ramirez, C. y Gardeweg, M. (1982). Carta geológica de Chile. Escala 1:250.000. Hoja de Toconao. Región de Antofagasta. Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN).

RCA N°021/2016 "EIA Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de evaporación Solar en el salar de Atacama" de Rockwood Lithium

RCA N° 0226 del 19 de octubre de 2006. "Cambios y Mejoras en la operación minera en el Salar de Atacama" de SQM Salar S.A. Según lo dispuesto en la Ley N° 19.300. Bases Generales del Medio Ambiente. Comisión Regional del Medio Ambiente. Región de Antofagasta.

Risacher F., Alonso H. y Salazar C. (1999). Geoquímica de Aguas en Cuencas cerradas: I, I y III Regiones – Chile. Volumen III. DGA – UCN – IRD. S.I.T.N°51.

Risacher, F. y Alonso, H. (1996). Geoquímica del Salar de Atacama, parte 2: evolución de las aguas. *Revista geológica de Chile*. Vol. 23. N° 2, p. 123-134.

Rubilar (2015). Arquitectura interna y desarrollo Oligoceno-Néógeno de la cuenca del Salar de Atacama, Andes centrales del norte de Chile. Tesis para optar al grado de magíster en ciencias mención geología.

Salas, J.; Guimera, J.; Cornellà, O.; Aravena, R.; Guzmán, E.; Tore, C.; et al. (2010). Hidrogeología del sistema lagunar del margen Este del Salar de Atacama (Chile). *Boletín Geológico y Minero*, 121 (4): 357-372. ISSN: 0366-0176.

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.

SEA (2012). Guía para el uso de modelos de aguas subterráneas en el SEIA.

SGA. Solución en Gestión Ambiental (2015). Estudio Hidrogeológico y modelo numérico sector sur del Salar de Atacama. EIA Proyecto modificaciones y mejoramiento del sistema de pozas de evaporación solar en el Salar de Atacama. Rockwood Lithium

Applus+ (Norcontrol Chile S.A.) (2010). Declaración de impacto ambiental Proyecto "Nueva planta de secado y compactado de cloruro potásico". SQM

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.

SWS (2016a). Avance Modelo Conceptual Hidrogeológico MNT.SWS-AguaEx, 2016. Integración Geofísica-Geológica Acuífero Monturaqui-Negrillar-Tilopozo, II Región Antofagasta.

Tesam S. A. (2005). Estudio de Impacto Ambiental Modificaciones y mejoramiento del sistema de pozas de evaporación solar en el salar de Atacama. SQM Salar S.A.

R. Troncoso, O. Ercilla, R. Carrasco & W. Vivallo (2013). Estudio del Potencial de Litio en Salares del Norte de Chile. SERVICIO NACIONAL DE GEOLOGÍA Y MINERÍA, Subdirección Nacional de Geología. Departamento de Geología Aplicada.

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.