

**ANEXO 1**  
**ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO**  
**SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA**



**Rockwood**  
**Lithium**

DICIEMBRE 2015

	<p>ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL          PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL          SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL          SALAR DE ATACAMA</p>	
	<p>ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO          NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA</p>	

## INDICE

1	INTRODUCCION.....	1
1.1	Objetivos y alcances.....	2
1.1.1.	Objetivo General.....	2
1.1.2.	Objetivos Específicos.....	3
1.2	Descripción del área de estudio.....	3
1.2.1	Ubicación y accesos.....	4
1.2.2	Nomenclatura espacial del área de estudio.....	6
2	RECOPIACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE ANTECEDENTES.....	10
3	GEOLOGÍA.....	16
3.1	Revisión de antecedentes.....	17
3.1.1	Breve historia geológica de la cuenca del Salar del Atacama.....	17
3.1.2	Marco estratigráfico.....	21
3.1.3	Marco estructural.....	30
3.1.3.1	Estructuras geológicas a escala de la cuenca del Salar del Atacama.....	30
3.1.3.2	Estructuras geológicas a escala del Salar de Atacama.....	33
3.2	Geofísica.....	38
3.2.1	Introducción.....	38
3.2.2	Geofísica TEM y NanoTEM.....	39
3.2.2.1	Metodología.....	39
3.2.2.2	Campañas realizadas por Rockwood en el marco del EIA.....	41
3.2.2.3	Interpretación de resultados geofísicos TEM.....	43
3.2.3	Otros perfiles TEM revisados.....	46
3.2.4	Sísmica de Reflexión de ENAP.....	48
3.3	Perforaciones.....	50
3.3.1	Campañas de perforación realizadas en el marco del EIA.....	50
3.3.2	Resultados obtenidos.....	52
3.4	Perfiles geológicos.....	52
4	GEOMORFOLOGÍA, TOPOGRAFÍA Y SISTEMA DE COORDENADAS.....	62
4.1	Introducción.....	62
4.2	Geomorfología.....	62
4.2.1	Geomorfología regional.....	62
4.2.2	Geomorfología local.....	64
4.3	Topografía.....	67
4.4	Sistema de coordenadas.....	72
5	EXPLORACIÓN DE LA CUENCA.....	73
5.1	Análisis de derechos de aprovechamiento de aguas en la Cuenca.....	74
5.1.1	Derechos de aprovechamiento de agua otorgados en la cuenca del Salar del Atacama.....	74
5.1.2	Reasignación de usos según nombre del solicitante.....	82
5.1.3	Porcentaje y Coeficientes de uso de los derechos de aprovechamiento de aguas.....	84
5.2	Explotación del acuífero vinculada a proyectos mineros.....	87
5.2.1	Explotación del acuífero realizada por Escondida (MEL).....	89
5.2.2	Explotación realizada por Minera Zaldívar (CMZ).....	92
5.2.3	Explotación realizada por SQM.....	95
5.2.4	Explotación realizada por Rockwood.....	98
5.3	Extracción histórica y actual de la salmuera (núcleo del Salar).....	101
5.3.1	Extracción de SQM.....	101

	<p style="text-align: center;">ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL          PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL          SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL          SALAR DE ATACAMA</p>	
	<p style="text-align: center;">ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO          NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA</p>	

5.3.2	Extracción de Rockwood .....	107
5.4	Resumen de la explotación en la cuenca del Salar .....	116
6	HIDROLOGÍA .....	117
6.1	Clima y marco hidrológico regional .....	117
6.2	Cuenca hidrográfica.....	118
6.3	Pluviometría.....	120
6.3.1	Registros disponibles .....	120
6.3.2	Precipitaciones medias.....	122
6.3.3	Relación Precipitación-Altura .....	127
6.4	Evaporación.....	127
6.4.1	Evaporación de tanque.....	127
6.4.2	Evaporación de tanque de la salmuera.....	130
6.4.3	Tasa de evaporación y evapotranspiración en el Salar de Atacama .....	131
6.4.3.1	Zonas de evaporación Salar de Atacama.....	131
6.4.3.2	Tasa de evaporación .....	134
6.5	Fluviometría .....	135
7	HIDROQUÍMICA.....	143
7.1	Objetivo y alcances.....	143
7.2	Ubicación de sectores y puntos de monitoreo .....	145
7.3	Antecedentes de los puntos de monitoreo .....	148
7.4	Metodología de muestreo y análisis de laboratorio.....	152
7.4.1	Perfiles de Conductividad y Temperatura .....	152
7.4.2	Parámetros físico-químicos in situ y muestreo en terreno .....	152
7.4.3	Almacenamiento y traslado de muestras .....	152
7.4.4	Análisis químico e isotópico de aguas en laboratorio .....	153
7.4.5	Tratamiento de los datos .....	157
7.5	Perfiles de conductividad eléctrica .....	157
7.5.1	Resultados.....	158
7.5.2	Discusión .....	167
7.6	Caracterización físico-química de las aguas y la salmuera .....	169
7.6.1	Clasificación de las aguas dulces, salobres y salmueras .....	170
7.6.2	Parámetros físico-químicos y concentraciones químicas .....	171
7.6.2.1	Sector Núcleo del Salar .....	172
7.6.2.2	Sector Lagunas La Punta y La Brava .....	173
7.6.2.3	Sector Tilopozo .....	176
7.6.2.4	Sector Borde Tilopozo .....	178
7.6.2.5	Sector Lagunar Peine .....	180
7.6.2.6	Sector Tilomonte.....	182
7.6.2.7	Sector Borde Este.....	183
7.6.2.8	Sector Lagunas del Norte .....	184
7.6.3	Evolución temporal de concentraciones químicas .....	187
7.6.3.1	Sector del Núcleo del Salar .....	187
7.6.3.2	Sectores de las lagunas La Punta-La Brava, Peine y Norte del Salar .....	189
7.6.3.3	Sector Tilopozo y Borde Tilopozo .....	194
7.6.3.4	Sector Tilomonte.....	195
7.6.3.5	Sector Borde Este.....	196
7.6.4	Composiciones químicas y distribución espacial .....	197
7.6.4.1	Sector del Núcleo.....	197
7.6.4.2	Sector Borde Este.....	200
7.6.4.3	Sector de las lagunas La Punta-La Brava y de Peine .....	200

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

7.6.4.4	Sector Tilopozo, Borde Tilopozo y Tilomonte .....	205
7.6.4.5	Sector lagunar del Norte .....	210
7.6.5	Discusión .....	212
7.7	Caracterización isotópica de las aguas y la salmuera .....	216
7.7.1	Resultados .....	216
7.8	Conclusiones .....	225
8	HIDROGEOLOGÍA .....	228
8.1	Síntesis de la evolución hidrogeológica del Salar de Atacama .....	228
8.2	Unidades hidrogeológicas y parámetros hidráulicos .....	229
8.2.1	Definiciones .....	230
8.2.2	Descripción de las Unidades Hidrogeológicas .....	232
8.2.2.1	Unidad hidrogeológica Núcleo .....	233
8.2.2.2	Unidad hidrogeológica Zona Marginal .....	237
8.2.2.3	Unidad hidrogeológica borde Este .....	238
8.2.2.4	Unidad Hidrogeológica Delta del río San Pedro .....	242
8.2.2.5	Unidad hidrogeológica Borde Sur .....	245
8.2.2.6	Unidad hidrogeológica Aluvial Cordón de Lila .....	246
8.2.2.7	Unidad Hidrogeológica Llano de la Paciencia .....	246
8.2.2.8	Unidad Hidrogeológica Aluvial Cordillera de la Sal .....	246
8.2.2.9	Unidad hidrogeológica de Baja Permeabilidad .....	247
8.2.3	Distribución espacial de parámetros hidráulicos .....	248
8.2.4	Geometría del acuífero y perfiles hidrogeológicos .....	253
8.3	Evolución de niveles y superficie freática .....	267
8.3.1	Redes de monitoreo hídrico .....	267
8.3.1.1	Nomenclatura de medición de niveles .....	269
8.3.1.2	Red de monitoreo de Rockwood .....	271
8.3.1.3	Red de monitoreo de Minera Escondida .....	279
8.3.1.4	Red de monitoreo de SLM NX Uno de Peine .....	281
8.3.1.5	Red de monitoreo de SQM .....	281
8.3.2	Evolución de niveles .....	283
8.3.2.1	Evolución de niveles freáticos en el Núcleo de halita .....	283
8.3.2.2	Evolución de niveles en la Zona Marginal .....	291
8.3.2.3	Evolución de niveles en Acuíferos detríticos del Borde Este y Sur .....	299
8.3.3	Superficie freática .....	304
8.4	Interfase salina .....	309
8.4.1	Introducción .....	309
8.4.2	Información disponible para definir la posición de la interfase salina .....	313
8.4.2.1	Perfiles de conductividad eléctrica .....	313
8.4.2.2	Geofísica de Superficie .....	317
8.4.2.3	Relación Densidad- Conductividad eléctrica .....	319
8.4.3	Geometría de la interfase salina .....	321
8.4.3.1	Ubicación de la interfase en superficie .....	321
8.4.3.2	Ubicación de la interfase en profundidad .....	323
8.4.4	Evolución temporal de la interfase .....	327
9	MODELO CONCEPTUAL Y BALANCE HÍDRICO .....	334
9.1	Modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico .....	334
9.1.1	Modelo conceptual de la Cuenca .....	334
9.1.2	Comportamiento hidrogeológico de las lagunas .....	342
9.1.2.1	Sistema La Punta-La Brava .....	344
9.1.2.2	Sistema lagunar Peine .....	352

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMERICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

9.1.2.3	Sistema Aguas de Quelana .....	357
9.1.2.4	Sistema Soncor.....	362
9.2	Metodología y parámetros para el cálculo del balance hídrico .....	367
9.2.1	Marco general.....	367
9.2.2	Subdivisión de la Cuenca .....	368
9.2.3	Esquema de balance hídrico .....	372
9.2.3.1	Descripción del balance .....	372
9.2.3.2	Ecuaciones del balance .....	376
9.2.4	Componentes del balance hídrico .....	378
9.2.4.1	Precipitación.....	378
9.2.4.2	Evaporación .....	388
9.2.4.3	Infiltración.....	402
9.2.4.4	Volumen almacenado .....	406
9.2.4.5	Flujos subterráneos y subsuperficiales.....	409
9.2.4.6	Bombes de agua dulce y salmuera .....	415
9.3	Resultados del balance .....	417
9.3.1	Balance hídrico en la Cuenca del Salar de Atacama .....	417
9.3.2	Balance hídrico en el área del modelo .....	428
9.3.3	Balance hídrico mensual .....	433
10	MODELO HIDROGEOLOGICO NUMERICO .....	439
10.1	Introducción y objetivos .....	439
10.2	Modelo MODFLOW .....	441
10.2.1	Selección código MODFLOW.....	441
10.2.2	Construcción del Modelo .....	441
10.2.2.1	Dominio y Configuración.....	441
10.2.2.2	Parámetros Hidráulicos.....	449
10.2.2.3	Discretización temporal.....	453
10.2.2.4	Condiciones de Borde.....	453
10.2.3	Calibración del modelo .....	470
10.2.3.1	Metodología .....	470
10.2.3.2	Pozos de calibración.....	471
10.2.3.3	Calibración en régimen permanente.....	474
10.2.3.4	Calibración régimen transiente .....	487
10.2.4	Validación del Modelo .....	513
10.2.5	Consistencia del balance hídrico en el modelo .....	526
10.2.6	Análisis de Sensibilidad del MODFLOW .....	527
10.3	Modelo SEAWAT .....	535
10.3.1	Generalidades .....	535
10.3.2	Selección y descripción de la Modelación SEAWAT .....	536
10.3.3	Consideraciones conceptuales en los perfiles .....	538
10.3.4	Construcción de los perfiles SEAWAT .....	539
10.3.4.1	Dominio del modelo SEAWAT .....	539
10.3.4.2	Configuración periodos y discretización temporal de SEAWAT .....	542
10.3.4.3	Parámetros hidráulicos .....	545
10.3.5	Condiciones de Borde .....	549
10.3.5.1	Límite Inferior .....	549
10.3.5.2	Límite Superior – Evapotranspiración (EVT) .....	549
10.3.5.3	Límite Superior – Recarga (R).....	550
10.3.5.4	Límite del Núcleo (altura constante) .....	553
10.3.5.5	Límite de Agua Salobre (altura constante) .....	557
10.3.6	Propiedades del transporte de solutos.....	558

	<p style="text-align: center;">ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL          PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL          SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL          SALAR DE ATACAMA</p>	
	<p style="text-align: center;">ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO          NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA</p>	

10.3.6.1	Condiciones Iniciales y de Límite de Sólidos Disueltos Totales .....	558
10.3.6.2	Propiedades del Modelo de Transporte .....	561
10.3.7	Calibración del modelo .....	562
10.3.7.1	Metodología .....	562
10.3.7.2	Análisis de niveles medidos y simulados.....	562
10.3.7.3	Análisis de la representación de la interfase salina.....	567
10.3.7.4	Análisis de las Conductividades Hidráulicas .....	569
10.3.8	Análisis de sensibilidad del SEAWAT .....	569
10.4	Conclusiones sobre desarrollo de los modelos numéricos .....	573
11	ESCENARIOS PREDICTIVOS .....	575
11.1	Objetivos .....	575
11.2	Aspectos Metodológicos.....	575
11.3	Identificación de pozos para análisis.....	576
11.4	Escenario de Evaluación del Proyecto (Esc1) .....	581
11.4.1	Descripción de Escenario de Evaluación del Proyecto .....	581
11.4.2	Resultados del Escenario de Evaluación del Proyecto .....	585
11.4.2.1	Resultados MODFLOW .....	585
11.4.2.2	Resultados SEAWAT.....	599
11.5	Escenario de Recarga Reducida (Esc2) .....	618
11.5.1	Descripción del Escenario de Recarga Reducida .....	618
11.5.2	Resultados Escenario de Recarga Reducida.....	621
11.5.2.1	Resultados MODFLOW .....	621
11.5.2.2	Resultados SEAWAT.....	626
11.6	Otros escenarios para evaluación .....	634
11.6.1	Escenario de Incremento del Uso de Agua Dulce-salobre (Esc3) .....	634
11.6.1.1	Descripción del Escenario de Incremento del Uso de Agua dulce-salobre.....	634
11.6.1.2	Resultados del Escenario de Incremento del Uso de Agua dulce-salobre .....	636
11.6.2	Escenario de Movilidad al Este de los Pozos Rockwood (Esc4) .....	643
11.6.2.1	Descripción del Escenario de Movilidad al Este de los Pozos Rockwood .....	643
11.6.2.2	Resultados del Escenario de Movilidad al Este de los Pozos Rockwood .....	645
11.6.3	Escenario de Disminución de Extracción de Salmuera por parte de Rockwood (Esc5)...	655
11.6.3.1	Descripción del Escenario de Disminución de Extracción de Salmuera por parte de Rockwood .....	656
11.6.3.2	Resultados Escenario de Disminución de Extracción de Salmuera por parte Rockwood .....	657
11.7	Conclusiones de los resultados de simulación.....	666
12	CONCLUSIONES.....	668
13	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS FINAL .....	672

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1	Formaciones Geológicas de la Región de Antofagasta.....	21
Tabla 3-2	Diferenciación de las Costras Salinas (Moraga et al., 1974) .....	28
Tabla 3-3	Trabajos geofísicos revisados del Salar de Atacama .....	39
Tabla 5-1	Derechos de aprovechamiento de aguas otorgados por subcuenca (Superficiales y Subterráneos) .....	75
Tabla 5-2	Caudales otorgados según naturaleza del agua .....	75
Tabla 5-3	Caudales otorgados según Fuente de Abastecimiento .....	76
Tabla 5-4	Caudales concedidos según uso del agua .....	79

	<p style="text-align: center;">ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL          PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL          SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL          SALAR DE ATACAMA</p>	
	<p style="text-align: center;">ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO          NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA</p>	

Tabla 5-5 Caudales reasignados según uso de las aguas .....	82
Tabla 5-6 Análisis de caudales otorgados para uso minero .....	84
Tabla 5-7 Caudales según uso y naturaleza de las aguas .....	84
Tabla 5-8 Factores de uso de Derechos de Aprovechamiento de Aguas Subterráneas.....	87
Tabla 5-9 Aplicación de los factores de uso a los derechos subterráneos otorgados.....	87
Tabla 5-10 Pozos de Agua de SQM.....	96
Tabla 5-11 Pozos de Agua Industrial y potable Rockwood.....	98
Tabla 5-12 Caudal (L/s) promedio anual bombeo Agua Dulce .....	101
Tabla 5-13 Caudales de Bombeo Máximos promedio anual de SQM.....	105
Tabla 5-14 Caudales (L/s) Históricos de bombeo de Salmuera .....	109
Tabla 5-15 Vértices Polígono A1.....	111
Tabla 5-16 Vértices Polígono A2.....	111
Tabla 5-17 Regla extracción solicitada .....	113
Tabla 5-18 Resumen de Extracciones de salmuera y de Agua Dulce.....	116
Tabla 6-1 Estaciones Meteorológicas .....	121
Tabla 6-2 Precipitaciones Anuales al Interior del Salar (mm) .....	124
Tabla 6-3 Precipitaciones Mensuales y Anual (mm).....	125
Tabla 6-4 Estaciones con Estadística de Evaporación de Tanque.....	128
Tabla 6-5 Evaporación de Tanque Media Mensual (mm) .....	128
Tabla 6-6 Evaporación de Tanque Media Mensual .....	130
Tabla 6-7 Tasa y Flujos de evaporación por zonas .....	135
Tabla 6-8 Estaciones Fluviométricas DGA.....	136
Tabla 6-9 Caudales Medios Mensuales Cauces afluentes al Salar (L/s) .....	138
Tabla 6-10 Caudales promedio aforados por la DGA en sus estaciones fluviométricas con aforos sistemáticos.....	139
Tabla 6-11 Resultados de Aforos.....	141
Tabla 7-1 Red de monitoreo mensual SGA-Rockwood. Periodo 2013-2014 .....	146
Tabla 7-2 Puntos monitoreados por terceros. Periodo 2007-2013 .....	151
Tabla 7-3 Características de los envases tomados en terreno.....	153
Tabla 7-4 Procedimientos analíticos y límites de detección .....	155
Tabla 7-5 Parámetros analizados en el muestreo de aguas.....	156
Tabla 7-6 Clasificación de los tipos de aguas en el área de estudio .....	171
Tabla 7-7 Estadística de los resultados químicos 2013-2014 en el sector del Núcleo.....	172
Tabla 7-8 Estadística de los resultados químicos 2013-2014 en el sector La Punta y Brava. ....	174
Tabla 7-9 Estadística de los resultados químicos 2013-2014 en pozos. Sector La Punta y Brava. ....	175
Tabla 7-10 Estadística de los resultados químicos 2013-2014 en el sector de Tilopozo.....	177
Tabla 7-11 Estadística de los resultados químicos 2013-2014 de pozos. Sector Borde de Tilopozo.....	179
Tabla 7-12 Estadística de los resultados químicos 2013-2014 en el sector lagunar Peine .....	180
Tabla 7-13 Estadística de los resultados químicos 2013-2014 de pozos. Sector Peine .....	181
Tabla 7-14 Estadística de los resultados químicos 2013-2014 en el sector de Tilomonte.....	183
Tabla 7-15 Estadística de los resultados químicos 2013-2014 en el sector de Borde Este.....	184
Tabla 7-16 Estadística de los resultados químicos 2013-2014 en el sector Norte .....	185
Tabla 8-1 Resumen de Pruebas de Bombeo realizadas .....	248
Tabla 8-2 Resumen de ensayos Lefranc realizados.....	249
Tabla 8-3 Red de monitoreo mensual de Rockwood .....	274
Tabla 8-4 Puntos de control de nivel 1997.....	306
Tabla 8-5 Puntos de control de Nivel 2013 (Verano) .....	308
Tabla 8-6 Puntos de perfilado de conductividad eléctrica y su profundidad a Nov-Dic 2013.....	314
Tabla 8-7 Cálculos posición interfase con la relación de Ghijben Herzberg.....	325
Tabla 9-1 Áreas Aportantes Subcuencas.....	371
Tabla 9-2 Precipitación anual en las subcuencas aportantes.....	385
Tabla 9-3 Precipitación total anual en estaciones del Núcleo.....	386

	<p style="text-align: center;">ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL          PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL          SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL          SALAR DE ATACAMA</p>	
	<p style="text-align: center;">ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO          NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA</p>	

Tabla 9-4 Factor de ocupación por pixel para cada tipo de cubierta vegetal.....	390
Tabla 9-5 Coeficientes de cultivo, kc.....	395
Tabla 9-6 Coeficiente de Cultivo según Plantación .....	396
Tabla 9-7 Evaporación en Subcuencas Aportantes .....	396
Tabla 9-8 Flujos de evapotranspiración promedio anual en el Salar de Atacama.....	401
Tabla 9-9 Desglose de flujos de evapotranspiración promedio anual en la zona A11 (lagunas) .....	401
Tabla 9-10 Cálculo de las tasas de recarga y porcentaje de infiltración según Balance de cloruros .....	405
Tabla 9-11 Antecedentes de coeficientes de almacenamiento.....	408
Tabla 9-12 Antecedentes de coeficientes de almacenamiento.....	408
Tabla 9-13 Volúmenes almacenados subcuencas .....	408
Tabla 9-14 Cálculo del flujo subterráneo al área del modelo desde subcuencas del Norte .....	414
Tabla 9-15 Cálculo del flujo subterráneo al área del modelo desde subcuenca 17N.....	414
Tabla 9-16 Coeficiente de embalse zona Norte .....	415
Tabla 9-17 Derechos otorgados por subcuenca .....	417
Tabla 9-18 Balance Hídrico zonas Este y Sur.....	421
Tabla 9-19 Balance hídrico Zona Norte .....	422
Tabla 9-20 Balance hídrico zona Oeste .....	424
Tabla 9-21 Resumen de resultados del balance hídrico en la cuenca del Salar de Atacama.....	426
Tabla 9-22 Comparación balance hídrico con antecedentes.....	428
Tabla 9-23 Flujos de entrada que serán incorporados en el modelo numérico.....	432
Tabla 9-24 Coeficientes de embalse.....	435
Tabla 9-25 Derechos de agua efectivos por subcuenca .....	436
Tabla 10-1 Recarga por precipitación directa en Núcleo y Zona Marginal Intermedia .....	455
Tabla 10-2 Recarga por precipitación directa en la Zona Marginal .....	456
Tabla 10-3 Recarga subterránea desde las subcuencas afluentes al Salar.....	458
Tabla 10-4 Recarga incorporada en el área del modelo.....	461
Tabla 10-5 Flujo de evaporación por zonas (L/s).....	462
Tabla 10-6 Parámetros de evapotranspiración .....	467
Tabla 10-7 Caudal medio afloramientos .....	468
Tabla 10-8 Balance hídrico año 1997 modelo numérico (L/s) .....	481
Tabla 10-9 Flujo a través de Interfase.....	481
Tabla 10-10 Niveles Medidos y Simulados calibración permanente .....	483
Tabla 10-11 Estadísticos de la calibración permanente .....	484
Tabla 10-12 Recarga Media Periodo Calibración y Validación en Régimen Transiente (1998-2013) .....	489
Tabla 10-13 Bombeo durante el periodo de calibración .....	492
Tabla 10-14 Estadísticos calibración transiente.....	503
Tabla 10-15 Estadísticos validación.....	514
Tabla 10-16 Sensibilidad modelo permanente a conductividad hidráulica .....	529
Tabla 10-17 Resumen del método usado en periodos de modelación.....	544
Tabla 10-18 Estadística de Calibración Modelo SEAWAT .....	567
Tabla 10-19 Análisis de sensibilidad en el perfil La Punta – La Brava .....	571
Tabla 10-20 Análisis de sensibilidad en el perfil Peine .....	572
Tabla 10-21 Análisis de sensibilidad en el perfil de Quelana.....	573
Tabla 11-1 Bombeos salmuera y agua salobre Caso Base (Esc1-CB).....	582
Tabla 11-2 Bombeos salmuera y agua salobre Caso Con Proyecto (Esc1-CP) .....	583
Tabla 11-3 Caudal de bombeo en escenario (Esc1) de evaluación del Proyecto (L/s).....	585
Tabla 11-4 Descenso máximo en puntos de control para modelo SEAWAT .....	587
Tabla 11-5 Flujos de salida promedio (2014-2065) en escenario de evaluación del proyecto (Esc1) .....	598
Tabla 11-6 Descenso máximo en puntos de observación del perfil La Punta – La Brava. Esc1-CP y Esc1-CB.....	609
Tabla 11-7 Descenso máximo en puntos de observación del perfil Peine. Esc1-CB y Esc1-CP.....	609

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

Tabla 11-8 Descenso máximo en puntos de observación y verificación del perfil Quelana. Esc1-CB y Esc1-CP.....	609
Tabla 11-9 Comparación descensos simulados con descenso máximo permitido por PC de SQM.....	611
Tabla 11-10 Flujos de salida en escenarios Esc1 y Esc2.....	625
Tabla 11-11 Descenso máximo en puntos de observación y verificación del perfil La Punta – La Brava Esc2.....	630
Tabla 11-12 Descenso máximo en puntos de observación y verificación del perfil Peine Esc2.....	631
Tabla 11-13 Descenso máximo en puntos de observación y verificación del perfil Quelana Esc2.....	631
Tabla 11-14 Factores de uso derechos subterráneos otorgados en la Cuenca.....	635
Tabla 11-15 Caudales de extracción de agua dulce y salobre.....	635
Tabla 11-16 Flujos de salida en escenarios Esc1 y Esc3.....	640
Tabla 11-17 Descenso máximo en puntos de observación del perfil Quelana Esc3.....	642
Tabla 11-18 Flujos de salida en escenarios Esc1 y Esc4.....	647
Tabla 11-19 Descenso máximo en puntos de observación del perfil La Punta – La Brava Esc4.....	652
Tabla 11-20 Descenso máximo en puntos de observación del perfil Peine Esc4.....	653
Tabla 11-21 Descenso máximo en puntos de observación del perfil Quelana Esc4.....	653
Tabla 11-22 Flujos de salida en escenarios Esc1 y Esc5.....	659
Tabla 11-23 Descenso máximo en puntos de observación del perfil La Punta – La Brava Esc5.....	664
Tabla 11-24 Descenso máximo en puntos de observación del perfil Peine Esc5.....	665
Tabla 11-25 Descenso máximo en puntos de observación del perfil Quelana, Esc5.....	665

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Ubicación General del Área de Estudio.....	5
Figura 1-2 Vías de acceso al Salar de Atacama.....	6
Figura 1-3 Terminología espacial del estudio.....	9
Figura 3-1 Localización área modelo numérico.....	16
Figura 3-2 Mapa geológico del Salar de Atacama.....	20
Figura 3-3 Mapa Geológico Salar de Atacama según Moraga et al., 1974.....	27
Figura 3-4 Fotolineamientos mayores de la Hoja de Toconao (1982).....	31
Figura 3-5 Ubicación del Sistema de Fallas del Salar e isopacas unidad de halita (Jordan et al., 2007) ..	34
Figura 3-6 Perfil de sísmica de reflexión 1g018 en el centro del Salar del Atacama.....	35
Figura 3-7 Interpretación del perfil geofísico 1g022, mostrando la posición de las fallas del SFS.....	36
Figura 3-8 Distribución de permeabilidades propuesta por SQM.....	37
Figura 3-9 Ubicación perfiles geofísicos realizados en el marco de este EIA (años 2012, 2013 y 2014) ..	42
Figura 3-10 Traza superficial del perfil geofísico (Line 16), de Graham et al (2012).....	47
Figura 3-11 Perfil MT/AMT Línea 16 (Graham et. al, 2012).....	47
Figura 3-12 Mapa del Salar De Atacama mostrando la ubicación de los perfiles geofísicos de sísmica de reflexión realizados por la ENAP.....	49
Figura 3-13 Ubicación de las perforaciones realizadas durante 2013 y 2014.....	51
Figura 3-14 Mapa situación de los perfiles geológicas.....	53
Figura 3-15 Corte geológico A-A'.....	55
Figura 3-16 Corte geológica B-B'.....	56
Figura 3-17 Corte geológico C-C'.....	57
Figura 3-18 Corte geológico D-D'.....	58
Figura 3-19 Corte geológico E-E'.....	59
Figura 3-20 Corte geológico F-F'.....	60
Figura 3-21 Corte geológico G-G'.....	61
Figura 4-1 Unidades Geomorfológicas Regionales.....	63
Figura 4-2 Subunidades Geomorfológicas.....	65
Figura 4-3 Composición realizada para obtener topografía.....	71

	<p>ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL          PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL          SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL          SALAR DE ATACAMA</p>	
	<p>ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO          NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA</p>	

Figura 5-1 Distribución Derechos de Agua otorgados en la cuenca del Salar del Atacama .....	77
Figura 5-2 Distribución Derechos de Agua de acuerdo a su fuente de abastecimiento .....	78
Figura 5-3 Distribución Derechos de Agua de acuerdo a su uso.....	81
Figura 5-4 Distribución espacial de los derechos de aprovechamiento de aguas luego de reasignar su uso de acuerdo a nombre del solicitante .....	83
Figura 5-5 Porcentaje de explotación Derechos de agua destinado a minería .....	86
Figura 5-6 Ubicación del Campo de Pozos.....	90
Figura 5-7 Caudales medios anuales de bombeo Campo de Pozos MEL .....	91
Figura 5-8 Ubicación del Campo de Pozos.....	93
Figura 5-9 Caudales medios anuales de bombeo Campo de Pozos CMZ.....	94
Figura 5-10 Ubicación Pozos de Agua de SQM .....	95
Figura 5-11 Extracción de pozos de Agua de SQM 1997 – 2014.....	97
Figura 5-12 Pozos de Extracción de Agua de Rockwood.....	99
Figura 5-13 Extracción de Agua de Rockwood entre 1999 y 2014.....	100
Figura 5-14 Ubicación de las áreas de Extracción de Salmuera de SQM.....	102
Figura 5-15 Explotación de salmueras de las áreas de extracción (MOP + SOP) de SQM entre 1994 y 2013 .....	104
Figura 5-16 Regla Operacional bombeos de salmuera SQM .....	106
Figura 5-17 Extracción promedio mensual de Salmuera de Rockwood entre 1983 y 2014 .....	108
Figura 5-18 Ubicación de Pozos de Extracción de Salmuera de Rockwood.....	110
Figura 5-19 Perfil Pozo Típico Rockwood .....	112
Figura 5-20 Aumento de Extracción de salmuera propuesto.....	113
Figura 5-21 Extracción de Salmuera Histórica, Actual y Futura de SQM y Rockwood .....	115
Figura 6-1 Cuenca Hidrográfica Salar de Atacama .....	119
Figura 6-2 Periodo del Registro Pluviométrico.....	121
Figura 6-3 Ubicación Estaciones Meteorológicas .....	122
Figura 6-4 Plano Isoyetas Precipitación Promedio Anual .....	126
Figura 6-5 Precipitación Anual versus Altura sector Este .....	127
Figura 6-6 Variación Estacional de la Evaporación .....	129
Figura 6-7 Relación Evaporación versus Altura .....	130
Figura 6-8 Variación mensual de la evaporación de salmuera .....	131
Figura 6-9 Representación espacial zonas de evaporación .....	133
Figura 6-10 Ubicación Estaciones Fluviométricas DGA .....	137
Figura 6-11 Variación Estacional Cauces afluentes al Salar .....	138
Figura 6-12 Ubicación Puntos de Aforo .....	140
Figura 6-13 Aforos Lagunas Sistema Peine.....	142
Figura 7-1 Área de estudio y ubicación de sistemas lagunares.....	144
Figura 7-2 Puntos de monitoreo con información química y/o isotópica .....	147
Figura 7-3 Ubicación de los sondeos con perfiles de conductividad. ....	158
Figura 7-4 Perfil de Conductividad piezómetro MP-01C, La Punta- La Brava.....	159
Figura 7-5 Perfil de Conductividad piezómetro MP-03C, Sector Tilopozo.....	160
Figura 7-6 Perfil de Conductividad piezómetro MP-02C, Sector Tilopozo.....	161
Figura 7-7 Perfil de Conductividad piezómetro MP-04C, Sector Tilopozo.....	162
Figura 7-8 Perfil de Conductividad piezómetro MP-05C, Sector Borde Tilopozo .....	163
Figura 7-9 Perfil de Conductividad piezómetro MP-06C, Sector Borde Tilopozo .....	164
Figura 7-10 Perfil de Conductividad piezómetro MPS-AC, Sector Peine .....	165
Figura 7-11 Perfil de Conductividad piezómetro MPS-CC, Sector Peine .....	166
Figura 7-12 Perfil de Conductividad piezómetro TS-8, Sector Tilomonte.....	167
Figura 7-13 Corte transversal esquemático. Sector Tilopozo-La Punta-La Brava.....	169
Figura 7-14 Relación contenido de sólidos totales disueltos y conductividad eléctrica 2013-2014 .....	170
Figura 7-15 Diagramas de caja de la concentración química de las aguas monitoreadas entre 2013-2014. ....	186

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

Figura 7-16 Variación temporal de la conductividad (arriba) y pH (abajo) en pozos del Núcleo del Salar. Período 2013-2014.....	188
Figura 7-17 Variación temporal de Litio (izq.) y Boro (der.) en pozos del Núcleo del Salar. Período 2013-2014.....	189
Figura 7-18 Comparación valores de conductividad entre la salmuera del Núcleo y las lagunas del sector sur Salar. Período 2013-2014. ....	190
Figura 7-19 Variación temporal de conductividad y pH de pozos y lagunas del sector sur del Salar: La Punta-La Brava. Período 2013-2014.....	191
Figura 7-20 Variación temporal de Conductividad y pH de pozos y lagunas del sector sur del Salar: Sector Peine. Período 2013-2014.....	192
Figura 7-21 Comparación valores de conductividad entre la salmuera del núcleo y las lagunas del sector norte de la cuenca del Salar. Período 2013-2014.....	193
Figura 7-22 Concentraciones de Litio y Boro en lagunas del sector Norte.....	193
Figura 7-23 Variación temporal de conductividad (arriba) y pH (abajo) de pozos someros y profundos en el sector de Tilopozo y Borde Tilpozo. Período 2013-2014. ....	194
Figura 7-24 Variación temporal de conductividad y pH de aguas superficiales y de pozo en el sector de Tilomonte. Período 2013-2014.....	195
Figura 7-25 Variación temporal de conductividad y pH entre aguas del Borde Este. Período 2013-2014.....	196
Figura 7-26 Diagrama de Piper de muestras en el sector del Núcleo. Período 2013-2014 .....	198
Figura 7-27 Diagramas de Stiff Sector Núcleo.....	199
Figura 7-28 Diagrama de Piper de los puntos monitoreados en el sector Borde Este.....	200
Figura 7-29 Diagrama de Piper de los puntos monitoreados en el sector Punta-La Brava.....	201
Figura 7-30 Diagrama de Piper de los puntos monitoreados en el sector Peine.....	201
Figura 7-31 Diagramas de Stiff muestras de la zona marginal sur de la cuenca .....	202
Figura 7-32 Relación Cl versus Na, en las aguas de aporte y de las lagunas del sector Peine .....	204
Figura 7-33 Relación SO <sub>4</sub> versus Ca+Mg, en las aguas de aporte y de las lagunas del sector Peine ...	204
Figura 7-34 Diagrama de Piper de los puntos monitoreados en el sector Tilopozo .....	205
Figura 7-35 Diagrama de Piper de los puntos monitoreados en el sector Borde Tilopozo .....	206
Figura 7-36 Diagrama de Piper de los puntos monitoreados en el sector Tilomonte.....	206
Figura 7-37 Diagramas de Stiff Sector Tilopozo y Borde Tilopozo .....	207
Figura 7-38 Concentración Na vs Cl sectores La Punta-La Brava y Tilopozo.....	208
Figura 7-39 Concentración Ca+Mg vs SO <sub>4</sub> sectores La Punta-La Brava y Tilopozo.....	209
Figura 7-40 Diagrama de Piper de los puntos monitoreados en el sector Norte .....	210
Figura 7-41 Diagramas de Stiff sector Norte. Sistema Soncor y Aguas de Quelana .....	211
Figura 7-42 Diagrama Piper compilado de los puntos monitoreados .....	213
Figura 7-43 Mapa de isolíneas de la relación rCl/HCO <sub>3</sub> .....	214
Figura 7-44 Perfil esquemático hidroquímico.....	215
Figura 7-45 Composición isotópica δ <sup>18</sup> O y δD de las aguas monitoreadas en Salar .....	217
Figura 7-46 Composición isotópica δ <sup>18</sup> O y δD de la salmuera del Núcleo .....	218
Figura 7-47 Resultados Análisis Deuterio vs Oxígeno-18, sector La Punta-La Brava y Tilopozo (Febrero 2013- Diciembre 2014).....	220
Figura 7-48 Gráfico Deuterio vs Oxígeno-18, sector Peine .....	222
Figura 7-49 Diagrama Oxígeno-18 vs Cloruros Sector Peine.....	223
Figura 7-50 Resultados Análisis Isótopos de Deuterio y Oxígeno-18 Lagunas Sector Norte .....	224
Figura 7-51 Modelo Conceptual Hidrogeoquímico.....	227
Figura 8-1 Unidades hidrogeológicas.....	233
Figura 8-2 Distribución de porosidad .....	236
Figura 8-3 Coeficiente almacenamiento de muestras de la Zona Marginal Sur .....	238
Figura 8-4 Trazado en planta del perfil hidrogeológico borde Este .....	240
Figura 8-5 Correlación de subunidades hidrogeológicas.....	241
Figura 8-6 Esquema estratigrafía Delta del Río San Pedro.....	243

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

Figura 8-7 Surgencias (Ojos) en Delta del río San Pedro.....	244
Figura 8-8 Valores puntales de conductividad hidráulica sobre 50 m .....	250
Figura 8-9 Valores puntales de conductividad hidráulica bajo 50 m.....	251
Figura 8-10 Valores puntales del coeficiente de almacenamiento sobre 50 m .....	252
Figura 8-11 Perfil hidrogeológico A-A' .....	255
Figura 8-12 Perfil hidrogeológico B-B' .....	256
Figura 8-13 Perfil hidrogeológico C-C' .....	257
Figura 8-14 Perfil hidrogeológico D-D' .....	258
Figura 8-15 Perfil hidrogeológico E-E' .....	259
Figura 8-16 Perfil hidrogeológico F-F' .....	260
Figura 8-17 Perfil hidrogeológico G-G' .....	261
Figura 8-18 Localización perfiles de detalle de los sistemas lagunares .....	263
Figura 8-19 Perfil Hidrogeológico La Punta- La Brava.....	264
Figura 8-20. Perfil hidrogeológico Sistema Lagunar Peine .....	265
Figura 8-21. Perfil hidrogeológico Quelana.....	266
Figura 8-22 Redes de monitoreo actual sobre el recurso hídrico en la cuenca.....	268
Figura 8-23 Nomenclatura usada en pozos y/o piezómetros.....	270
Figura 8-24 Nomenclatura usada en reglillas.....	270
Figura 8-25 Nomenclatura usada en zanjas .....	270
Figura 8-26 Red actual de monitoreo de Rockwood según tipología .....	273
Figura 8-27 Red de monitoreo de Minera Escondida según tipología .....	280
Figura 8-28 Red de monitoreo de SQM según tipología.....	282
Figura 8-29 Ubicación pozos analizados con registro histórico de niveles en el núcleo .....	284
Figura 8-30 Evolución niveles de Salmuera .....	285
Figura 8-31 Evolución niveles de Salmuera (2) .....	286
Figura 8-32 Evolución niveles de Salmuera (3) .....	287
Figura 8-33 Evolución niveles de Salmuera (4) .....	288
Figura 8-34 Evolución niveles en punto Zanja Cord. Sal .....	289
Figura 8-35 Evolución niveles en punto M7 .....	289
Figura 8-36 Evolución niveles en punto CL-28 .....	290
Figura 8-37 Ubicación pozos analizados con registro histórico de niveles en la Zona Marginal.....	292
Figura 8-38 Evolución niveles de Zona Marginal .....	293
Figura 8-39 Evolución niveles de Zona Marginal (2).....	294
Figura 8-40 Evolución niveles de Zona Marginal (3).....	295
Figura 8-41 Evolución niveles de Zona Marginal (4).....	296
Figura 8-42 Evolución niveles de Zona Marginal (5).....	297
Figura 8-43 Evolución niveles de Zona Marginal (6).....	298
Figura 8-44 Ubicación pozos analizados con registro histórico de niveles en depósitos Aluviales Este y Sur .....	300
Figura 8-45 Evolución niveles depósitos aluviales.....	301
Figura 8-46 Evolución niveles depósitos aluviales (2) .....	302
Figura 8-47 Nivel L2-3 y caudal bombeado en Allana .....	303
Figura 8-48 Superficie freática elaborada por Rockwood correspondiente al año 1997 .....	305
Figura 8-49 Superficie freática elaborada por Rockwood correspondiente al año 2013 .....	307
Figura 8-50 Diagrama interfase.....	311
Figura 8-51. Plano de isodensidades en el Salar de Atacama .....	312
Figura 8-52 Perfiles de conductividad eléctrica al Sur del Salar .....	315
Figura 8-53 Perfiles de conductividad eléctrica al Este y Norte del Salar .....	316
Figura 8-54 Profundidad de la interfase estimada por TEM en el Sector La Punta La Brava .....	318
Figura 8-55 Relación Densidad - Conductividad eléctrica .....	319
Figura 8-56 Relación Densidad - Conductividad eléctrica hasta 160000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ .....	320
Figura 8-57 Posición de la interfase salina en superficie .....	322

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

Figura 8-58 Posición de la interfase según las hipótesis de Ghijben-Herzberg .....	324
Figura 8-59 Superficie de la interfase .....	326
Figura 8-60 Evolución de la posición del nivel y la interfase en el punto TP-1 .....	328
Figura 8-61 Evolución de la posición del nivel y la interfase en el punto TP-2 .....	329
Figura 8-62 Evolución de la posición del nivel y la interfase en el punto TP-3 .....	330
Figura 8-63 Perfiles de conductividad eléctrica para los pozos Cuña 1, Cuña 2 y Cuña 3 de Diciembre de 2010 a Diciembre de 2013 .....	331
Figura 8-64 Perfiles de conductividad eléctrica para los pozos Cuña 5, Cuña 4 y L4-3 de Diciembre de 2010 a Diciembre de 2013 .....	332
Figura 8-65 Perfiles de conductividad eléctrica para los pozos Cuña 7, L10-1 y Cuña 6 de Diciembre de 2010 a Diciembre de 2013 .....	333
Figura 9-1 Esquema del modelo conceptual general de funcionamiento hidrogeológico de la cuenca del Salar de Atacama .....	335
Figura 9-2 Esquema de modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico de la Zona Marginal Este y Sur .....	338
Figura 9-3 Presencia de agua salobre en la Zona Marginal Intermedia .....	339
Figura 9-4 Distribución de conductividad eléctrica de aguas subterráneas en la Zona Marginal sur.....	340
Figura 9-5 Esquema del modelo conceptual general – sección transversal.....	341
Figura 9-6 Sistema La Punta-La Brava .....	345
Figura 9-7 Puntos de afloramiento de agua subterránea en las lagunas de La Punta- La Brava .....	346
Figura 9-8 Puntos de control de nivel en el sistema de La Punta – La Brava .....	347
Figura 9-9 Evolución de niveles en pozos del acuífero y evaporación registrada en la estación de Peine. ....	348
Figura 9-10 Evolución de niveles en la laguna La Brava .....	349
Figura 9-11 Modelo conceptual Sistema La Punta-La Brava.....	351
Figura 9-12 Sistema Peine .....	352
Figura 9-13 Nacimiento Sistema Peine .....	353
Figura 9-14 Modelo conceptual Sistema Peine .....	356
Figura 9-15 Sistema Aguas de Quelana .....	357
Figura 9-16 Caudal de agua dulce bombeado en CAMAR 2 frente a nivel en L3-2.....	358
Figura 9-17 Puntos de salida en el Sistema Aguas de Quelana.....	359
Figura 9-18 Diagrama Piper del Sistema Aguas de Quelana 2009 .....	360
Figura 9-19 Modelo conceptual Sistema Aguas de Quelana.....	361
Figura 9-20 Sistema Soncor.....	362
Figura 9-21 Esquema de funcionamiento del Sistema Soncor .....	363
Figura 9-22 Caudal Puente San Luis comparado con la evaporación.....	365
Figura 9-23 Modelo conceptual Sistema Soncor .....	366
Figura 9-24 Subcuencas Salar de Atacama.....	370
Figura 9-25 Delimitación de las zonas utilizadas para representar el balance hídrico .....	373
Figura 9-26 Esquema de bloques del Modelo Conceptual del balance hídrico .....	375
Figura 9-27 Esquema explicativo de la evaporación en la Zona Marginal Intermedia .....	377
Figura 9-28 Bandas de altura en área de estudio .....	379
Figura 9-29 Gradientes mensuales de precipitación.....	381
Figura 9-30 Plano de las subcuencas e isoyetas de precipitación promedio anual .....	383
Figura 9-31 Gradiente de altura sector poniente .....	384
Figura 9-32 Polígonos de Thiessen de precipitación en el Núcleo y en la Zona Marginal Intermedia del Salar .....	387
Figura 9-33 NDVI en las Subcuencas en estudio .....	389
Figura 9-34 Cobertura vegetal detectada en las subcuencas aportantes .....	391
Figura 9-35 Gradientes mensuales de evaporación .....	393
Figura 9-36 Zonas de evapotranspiración para el Núcleo y la Zona Marginal, definidas por Mardones, 1986 y actualizadas por el Titular.....	398

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

Figura 9-37 Estimación de tipo de agua evaporada en la Zona Marginal Intermedia .....	400
Figura 9-38 Delimitación de la superficie permeable en cada subcuenca.....	407
Figura 9-39. Esquema del flujo que sobrepasa la interfase en las lagunas de Soncor.....	410
Figura 9-40. Esquema del flujo que sobrepasa la interfase en las lagunas de Peine .....	411
Figura 9-41. Esquema del flujo que sobrepasa la interfase en la Zona Marginal.....	412
Figura 9-42 Zona de balance al Norte del límite del modelo numérico .....	413
Figura 9-43 Extracción de salmuera por parte de SQM y de Rockwood durante el período de calibración .....	416
Figura 9-44 Zonas de demanda evapotranspirativa sector Este y Sur .....	419
Figura 9-45 Resultados del balance en el área de la cuenca (L/s).....	425
Figura 9-46 Recarga Subterránea desde las Subcuencas Aportantes (L/s) .....	427
Figura 9-47 Esquema de resultados del balance hídrico en el área del modelo (L/s).....	429
Figura 9-48 Flujos incorporados como condición de entrada en el modelo .....	431
Figura 9-49 Precipitación efectiva mensual sobre el Núcleo y la Zona Marginal Intermedia durante el período de calibración .....	434
Figura 9-50 Evolución de la recarga al modelo desde el Norte durante el período de calibración .....	437
Figura 9-51 Evolución de la recarga al modelo desde el Este y Sur durante el período de calibración ..	438
Figura 9-52 Evolución de la recarga al modelo desde el Oeste durante el período de calibración.....	438
Figura 10-1 Ubicación Área Modelo Numérico .....	442
Figura 10-2 Perfil esquemático Modelo Conceptual .....	444
Figura 10-3 Esquema de configuración geométrica vertical del área de Modelación .....	444
Figura 10-4 Elevación topográfica modelo MODFLOW (msnm).....	446
Figura 10-5 Área Grilla Modelo .....	447
Figura 10-6 Perfiles de la Malla del Modelo .....	448
Figura 10-7 Distribución conductividad hidráulica inicial de la capa superior .....	450
Figura 10-8 Distribución coeficiente de almacenamiento inicial de la capa superior .....	452
Figura 10-9 Celdas de Altura Constante en Recarga desde el Norte.....	454
Figura 10-10 Áreas de recarga en el modelo MODFLOW .....	457
Figura 10-11 Pozos de recarga en modelo MODFLOW .....	459
Figura 10-12 Zonas de evapotranspiración en el modelo MODFLOW .....	464
Figura 10-13 Curva de evaporación modelo dos segmentos .....	466
Figura 10-14 Descarga en celdas tipo Dren.....	469
Figura 10-15 Distribución Pozos Calibración Permanente .....	472
Figura 10-16 Distribución Pozos Calibración Transiente .....	473
Figura 10-17 Permeabilidad calibración modelo (m/d) capa 1.....	476
Figura 10-18 Permeabilidad calibración modelo (m/d) capa 2.....	477
Figura 10-19 Permeabilidad calibración modelo (m/d) capa 3.....	478
Figura 10-20 Zonas de Balance Modelo Numérico.....	480
Figura 10-21 Balance de Masas Calibración Régimen Permanente .....	482
Figura 10-22 Ajuste entre niveles observados y simulados.....	484
Figura 10-23 Superficie freática calibración permanente.....	486
Figura 10-24 Recarga Mensual Área del Modelo .....	490
Figura 10-25 Bombeo Periodo Transiente .....	493
Figura 10-26 Distribución de los pozos de bombeo utilizados en la calibración transiente (período 1997-2008).....	495
Figura 10-27 Coeficiente de almacenamiento en la Capa 1 .....	497
Figura 10-28 Coeficiente de almacenamiento en la capa 2.....	498
Figura 10-29 Coeficiente de almacenamiento en la Capa 3 .....	499
Figura 10-30 Entradas y salidas período de calibración .....	500
Figura 10-31 Error de balance de masa período de calibración .....	500
Figura 10-32 Descarga Modelo Calibración Transiente.....	502
Figura 10-33 Calibración niveles sector Agua Salobre .....	504

	<p style="text-align: center;">ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL          PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL          SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL          SALAR DE ATACAMA</p>	
	<p style="text-align: center;">ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO          NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA</p>	

Figura 10-34 Calibración de niveles en el sector de salmuera .....	507
Figura 10-35 Entradas y salidas período de validación .....	513
Figura 10-36 Error de balance de masa período de validación .....	514
Figura 10-37 Distribución de pozos de bombeo periodo validación (2009-2014).....	515
Figura 10-38 Validación transiente sector agua salobre .....	517
Figura 10-39 Validación transiente sector salmuera .....	520
Figura 10-40 Zonas de permeabilidad para análisis de sensibilidad .....	528
Figura 10-41 Sensibilidad de niveles simulados a conductividad hidráulica .....	531
Figura 10-42 Zonas de coeficiente de almacenamiento para análisis de sensibilidad .....	532
Figura 10-43 Sensibilidad de niveles simulados a coeficiente de almacenamiento .....	534
Figura 10-44 Proceso modelo SEAWAT .....	537
Figura 10-45 Ubicación de los perfiles SEAWAT .....	540
Figura 10-46 Malla de los perfiles SEAWAT .....	542
Figura 10-47 Conductividad hidráulica inicial y calibrada. Perfil La Punta – La Brava.....	546
Figura 10-48 Conductividad hidráulica inicial y calibrada. Perfil Peine.....	547
Figura 10-49 Conductividad hidráulica inicial y calibrada. Perfil Quelana.....	548
Figura 10-50 Configuración Zonas de Recarga Vertical en Perfiles SEAWAT.....	552
Figura 10-51 Altura constante en límites del perfil La Punta – La Brava.....	554
Figura 10-52 Altura constante en límites del perfil Peine.....	555
Figura 10-53 Altura constante en límites del perfil Quelana .....	556
Figura 10-54 Configuración conceptual de TDS iniciales y condiciones de borde en perfiles SEAWAT .	559
Figura 10-55 Configuración inicial TDS perfiles SEAWAT .....	560
Figura 10-56 Localización Pozos utilizados para la calibración de perfiles SEAWAT .....	564
Figura 10-57 Comparación niveles medidos y simulados perfil La Punta / La Brava .....	565
Figura 10-58 Comparación niveles medidos y simulados perfil Peine .....	565
Figura 10-59 Comparación niveles medidos y simulados perfil Quelana .....	566
Figura 10-60 Distribución de la Interfase medida y simulada .....	568
Figura 11-1 Puntos de acople entre los modelos MODFLOW y SEAWAT .....	577
Figura 11-2 Puntos de observación en el perfil SEAWAT de La Punta-La Brava .....	579
Figura 11-3 Puntos de observación en el perfil SEAWAT de Peine .....	580
Figura 11-4 Puntos de observación en el perfil SEAWAT de Quelana.....	581
Figura 11-5 Distribución de pozos en escenario de evaluación del Proyecto .....	584
Figura 11-6 Evolución de niveles simulados en puntos de control SEAWAT Esc1-CB y Esc1-CP .....	586
Figura 11-7 Mapa de isofreáticas Esc1-CB: Año 5 .....	588
Figura 11-8 Mapa de isofreáticas Esc1-CB: Año 10 .....	589
Figura 11-9 Mapa de isofreáticas Esc1-CB: Año 25 .....	590
Figura 11-10 Mapa de isofreáticas Esc1-CP: Año 5 .....	591
Figura 11-11 Mapa de isofreáticas Esc1-CP: Año10 .....	592
Figura 11-12 Mapa de isofreáticas Esc1-CP: Año25 .....	593
Figura 11-13 Descenso adicional año 5 (Esc1CP- Esc1CB) .....	594
Figura 11-14 Descenso adicional año 10 (Esc1CP- Esc1CB) .....	595
Figura 11-15 Descenso adicional año 25 (Esc1CP- Esc1CB) .....	596
Figura 11-16 Flujos de entrada y salida Esc1-CB.....	597
Figura 11-17 Flujos de entrada y salida Esc1-CP.....	598
Figura 11-18 Nivel simulado en puntos de observación del perfil La Punta – La Brava, Esc1-CB y Esc1-CP .....	600
Figura 11-19 Nivel simulado en puntos de observación del perfil Peine, Esc1-CB y Esc1-CP.....	603
Figura 11-20 Nivel simulado en puntos de observación del perfil Quelana, Esc1-CB y Esc1-CP .....	606
Figura 11-21 Comparación de distribución de TDS en Esc1 perfil La Punta- La Brava.....	612
Figura 11-22 Comparación de distribución de TDS en Esc1 perfil Peine .....	613
Figura 11-23 Comparación de distribución de TDS en Esc1 perfil Quelana .....	614

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

Figura 11-24 Comparación detallada entre distribuciones de TDS y posición de interfase en Esc1 perfil La Punta – La Brava.....	615
Figura 11-25 Comparación detallada entre distribuciones de TDS y posición de interfase en Esc1, perfil Peine.....	616
Figura 11-26 Comparación detallada entre distribuciones de TDS y posición de interfase en Esc1, perfil Quelana.....	617
Figura 11-27 Precipitaciones El Tatio.....	619
Figura 11-28 Precipitaciones Peine.....	620
Figura 11-29 Promedio de precipitaciones en el Núcleo.....	621
Figura 11-30 Evolución de niveles simulados en puntos de acople SEAWAT-MODFLOW. Esc1 y Esc2.....	622
Figura 11-31 Resultados de simulación de niveles en puntos de control PAT en salmuera. Esc1 y Esc2.....	623
Figura 11-32 Flujos de entrada y salida Esc2-CB.....	624
Figura 11-33 Flujos de entrada y salida Esc2-CP.....	625
Figura 11-34 Nivel simulado en puntos de observación prioritarios del perfil La Punta – La Brava. Esc1 y Esc2.....	627
Figura 11-35 Nivel simulado en puntos de observación prioritarios del perfil Peine Esc1 y Esc2.....	628
Figura 11-36 Nivel simulado en puntos de observación prioritarios del perfil Quelana. Esc1 y Esc2.....	629
Figura 11-37 Concentración de TDS en perfil La Punta – La Brava. Esc2-CP versus Esc1-CP (línea discontinua).....	632
Figura 11-38 Concentración de TDS en perfil Peine. Esc2-CP versus Esc1-CP (línea discontinua).....	632
Figura 11-39 Concentración de TDS en perfil Quelana. Esc2-CP versus Esc1-CP (línea discontinua) ..	633
Figura 11-40 Evolución de niveles simulados en puntos de control SEAWAT Esc1 y Esc3.....	637
Figura 11-41 Flujos de entrada y salida Esc3-CB.....	638
Figura 11-42 Flujos de entrada y salida Esc3-CP.....	639
Figura 11-43 Nivel simulado en puntos de observación prioritarios del perfil Quelana Esc1 y Esc3.....	641
Figura 11-44 Ubicación de pozos del proyecto de Rockwood al Este del área A-1 (Esc4-CP).....	644
Figura 11-45 Evolución de niveles simulados en puntos de control SEAWAT Esc1 y Esc4.....	646
Figura 11-46 Flujos de entrada y salida Esc4-CP.....	647
Figura 11-47 Nivel simulado en puntos de observación prioritarios del perfil La Punta – La Brava Esc1 y Esc4.....	649
Figura 11-48 Nivel simulado en puntos de observación prioritarios del perfil Peine Esc1 y Esc4.....	650
Figura 11-49 Nivel simulado en puntos de observación prioritarios del perfil Quelana Esc1 y Esc4.....	651
Figura 11-50 Concentración de TDS en perfil La Punta – La Brava (Esc1-CP vs. Esc4-CP).....	654
Figura 11-51 Concentración de TDS en perfil Peine (Esc1-CP vs. Esc4-CP).....	654
Figura 11-52 Concentración de TDS en perfil Quelana (Esc1-CP vs. Esc4-CP).....	655
Figura 11-53 Reducción de extracción de salmuera por Rockwood Esc5-CP.....	656
Figura 11-54 Evolución de niveles simulados en puntos de control SEAWAT, Esc1 y Esc5.....	657
Figura 11-55 Flujos de entrada y salida Esc5-CP.....	659
Figura 11-56 Nivel simulado en puntos de observación y verificación del perfil La Punta – La Brava Esc1 y Esc5.....	661
Figura 11-57 Nivel simulado en puntos de observación y verificación del perfil Peine Esc1 y Esc5.....	662
Figura 11-58 Nivel simulado en puntos de observación y verificación del perfil Quelana Esc1 y Esc5.....	663

## ÍNDICE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 3-1 Equipo de prospección geofísica.....	40
---	----

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

## APÉNDICES

Apéndice A: Topografía

Apéndice B: Geofísica

Apéndice C: Perforaciones

Apéndice D: Determinación del área de influencia de bombeo en el pozo de Tilopozo y en la zanja de Tucúcaro

Apéndice E: Hidrología

Apéndice F: Análisis físico-químico e isotópico del agua

Apéndice F-1: Certificados de laboratorio de análisis de aguas (sólo digital)

Apéndice G: Registro histórico de niveles

Apéndice H: Ensayos hidráulicos

Apéndice I: Funcionamiento hidrogeológico de los sistemas lagunares: Peine, La Punta-La Brava, Soncor y Aguas Quelana.

Apéndice J: Estimación de tasas de evaporación y evapotranspiración en el Salar de Atacama

Apéndice J-1: Resultados Mediciones de Evaporación en el Salar

Apéndice K: Tablas modelo de simulación

Apéndice K-1: Planillas Digitales de los modelos MODFLOW y SEAWAT (sólo digital)

Apéndice L: Monitoreo de dinámica espacio-temporal de lagunas de la Zona Marginal del Salar de Atacama a través de imágenes satelitales LANDSAT

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

## 1 INTRODUCCION

El Salar de Atacama es el depósito salino más grande del país y concentra las mayores reservas de litio en salmuera. Se trata de una cuenca tectónica cerrada, rellena parcialmente por sedimentos clásticos y evaporitas que, debido a su recarga continua y permanente evaporación, ha generado un Núcleo salino central cercano a los 1.400 km<sup>2</sup>, compuesto casi exclusivamente de cloruro de sodio. Las características topográficas de la Cuenca del Salar, con un fondo plano que coincide con el Núcleo de los depósitos salinos de cloruro de sodio, ha generado que en este sector central se dispongan las salmueras más concentradas.

En esta área de la Cuenca del Salar, la Sociedad Chilena del Litio Ltda. (hoy Rockwood), con la instalación de la denominada Planta “Salar de Atacama” inició en el año 1984 su proyecto de producción de salmuera concentrada en litio a partir de la extracción de salmuera y su proceso de evaporación solar, encontrándose en la actualidad ambientalmente autorizada para extraer 142 L/s de salmuera y una producción de 80.000 m<sup>3</sup>/año.

A través del Proyecto “Modificaciones y mejoramiento del sistema de pozas de evaporación solar en el Salar de Atacama”, en actual proceso de evaluación ambiental, en etapa de dar respuesta al Informe Consolidado de Solicitudes de Aclaración, Rectificación y Ampliación - ICSARA 5, se evalúa la solicitud de mayor extracción de salmuera en 300 L/s como promedio anual, que se implementará mediante incrementos semestrales de 60 L/s, a partir de la habilitación progresiva de las nuevas pozas de evaporación. También se solicita un aumento de 6 L/s en la extracción de agua salobre de los pozos de Tucúcaro y Tilopozo, que actualmente cuentan con autorización ambiental para extraer 10,9 L/s en conjunto.

El aumento de 300 L/s se sumará a la extracción actual de salmuera de 142 L/s como promedio anual autorizada ambientalmente, por lo que la extracción máxima de salmuera será de 442 L/s como promedio anual, en tanto que la producción de salmuera concentrada en litio aumentará desde 80.000 m<sup>3</sup>/año a 150.000 m<sup>3</sup>/año, contribuyendo de este modo a responder con oportunidad y suficiencia a los incrementos esperados en la demanda mundial de carbonato de litio, mercado en el cual Chile tiene un reconocido liderazgo.

Con el objeto de dar respuesta a las consultas formuladas por la Autoridad Ambiental en el ICSARA 4 y en el actual ICSARA 5, Rockwood encargó a SGA la realización del presente modelo hidrogeológico, cuyos resultados se presentan en este anexo.

Los trabajos realizados directamente en terreno por SGA o dirigidos por esta empresa consultora, ha consistido en la ejecución de monitoreos mensuales de niveles de aguas subterráneas, salmuera y aguas superficiales, de muestreos mensuales de aguas para su análisis de calidad e isotópico, de mediciones mensuales de perfiles verticales de conductividad y temperatura en pozos, de mediciones mensuales de caudales de aguas superficiales, de campañas trimestrales de medición de evaporación y

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

evapotranspiración, así como la complementación de perfiles geofísicos, construcción de piezómetros someros, piezómetros y multipiezómetros ejecución de pruebas de bombeo, y levantamiento topográfico de cotas de terreno en todos los puntos de mediciones de nivel.

El objetivo de estos trabajos fue reconocer y caracterizar las diferentes unidades hidrogeológicas, determinar su comportamiento hidráulico, conocer la existencia y posición de la interfase salina, describir el funcionamiento hidráulico de las lagunas y su interacción con el acuífero, etc.

Con esta información se ha generado un modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico que abarca el conjunto de la cuenca hidrológica del Salar y que se ha representado en un modelo numérico en tres dimensiones con el programa Visual MODFLOW. Dentro de este modelo se han generado tres perfiles en dos dimensiones con el programa SEAWAT, para modelar el comportamiento de la interfase salina generada por la diferencia de densidades entre la salmuera y los acuíferos de agua dulce o salobre situados al Este y al Sur del Salar.

Utilizando estas herramientas ha sido posible modelar distintos escenarios de explotación, los cuales muestran la no afectación sobre el funcionamiento hidrogeológico de los sistemas lagunares situados en el Este y Sur del Salar como resultado de la explotación de la salmuera por parte de Rockwood a una tasa ya señalada de 442 L/s, vale decir, 300 L/s sobre el valor autorizado actual de este titular de 142 L/s (RES 3132/06). Estos escenarios obviamente, consideran todos los derechos de explotación de salmuera en la cuenca, para la producción de litio y otras sales, tanto de terceros como del propio titular, así como también, los derechos de aprovechamiento de aguas de la misma.

## 1.1 Objetivos y alcances

### 1.1.1. Objetivo General

El objetivo general del trabajo que se presenta en este Anexo es estudiar y definir el modelo conceptual hidrogeológico más real posible aplicable a los sectores Sur y Este del Salar de Atacama, para luego construir un modelo numérico que permita dar respuesta a las consultas referentes a los recursos hídricos realizadas en el ICSARA 4 e ICSARA 5 del Estudio de Impacto Ambiental “Modificaciones y mejoramiento del sistema de pozas de evaporación solar en el Salar de Atacama”.

Este modelo numérico debe permitir establecer si existen afectaciones a los Sistemas Lagunares naturales del Salar derivado de la explotación actual de salmuera en el Núcleo, considerando todos los derechos de terceros, y el incremento solicitado por Rockwood de 300 L/s adicionales a los 142 L/s ambientalmente autorizados.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

### 1.1.2. Objetivos Específicos

Para satisfacer el objetivo general de este Estudio, se plantearon los siguientes objetivos específicos:

- Recopilar y analizar los antecedentes hidrogeológicos de la zona comprendiendo la geología, geomorfología, antecedentes meteorológicos e hidrológicos, mediante la revisión de bibliografía específica y de los trabajos en terreno.
- Diseñar y supervisar diferentes trabajos de terreno, tales como campañas de geofísica, levantamiento topográfico, construcción de piezómetros someros, piezómetros y multipiezómetros en torno o cercanos a los sistemas de lagunas, y realización de diferentes pruebas de bombeo. Todo ello, para determinar las características de permeabilidad, comportamiento hidráulico y que permitan medir niveles y calidad.
- Realizar campañas de monitoreo mensual de aguas subterráneas y superficiales midiendo niveles estáticos en la salmuera y el acuífero de agua dulce/salobre, niveles y caudales de aguas superficiales, muestreo y análisis de calidad de agua y composición isotópica, y medición de perfiles de conductividad y temperatura en pozos del sur de la Zona Marginal del Salar.
- Realizar campañas trimestrales de medición de evaporación y evapotranspiración en la cuenca, para determinar el valor de la descarga del balance de aguas.
- Con la información recopilada y analizada generar un modelo conceptual de funcionamiento hídrico del sector sur del Salar de Atacama.
- Desarrollar un modelo de simulación numérico que represente el funcionamiento hidrogeológico de la cuenca del Salar del Atacama, con foco en el este y sur del Salar, y evaluar su comportamiento temporal con la finalidad de conocer los posibles efectos en el funcionamiento hidrogeológico de los sistemas lagunares del borde Este y Sur del Salar producto de la explotación del litio.
- Desarrollar un Plan de Seguimiento Ambiental y un Plan de Alerta Temprana para el monitoreo de los efectos del proyecto operando a una tasa de extracción de salmuera de 442 L/s.

## 1.2 Descripción del área de estudio

El límite espacial del área en estudio es el núcleo del Salar de Atacama y su Zona Marginal en sus bordes Este y Sur como se muestra en la Figura 1-3, sin perjuicio de que el estudio utiliza y analiza información de toda la Cuenca del Salar del Atacama y cuyo límite se muestra en línea azul en la misma figura.

Desde un punto de vista hidrogeológico, el área de estudio se considera toda la cuenca del Salar del Atacama, si bien los objetivos del estudio se centran en conocer de buena forma y obtener buenos

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

resultados en las predicciones del funcionamiento hidrogeológico de la zona central, Oeste y Sur del Salar, con foco en el borde oriental y sector Sur de la cuenca, donde se encuentra la explotación de salmuera de Rockwood y los sistemas lagunares de La Punta y la Brava y Peine, en el Sur, y de Aguas de Quelana, y Soncor situados en el Este de la Zona Marginal del Salar.

A continuación se describe la ubicación y accesos del área de estudio, así como una descripción de la terminología utilizada a lo largo del documento, y de los límites espaciales de los distintos sectores que se mencionan, áreas de interés, dominio espacial del modelo, etc.

### 1.2.1 Ubicación y accesos

La cuenca hidrológica del Salar de Atacama se encuentra administrativamente en la comuna de San Pedro de Atacama, en el extremo oriente de la Región de Antofagasta y cercana al límite con las repúblicas de Argentina y Bolivia.

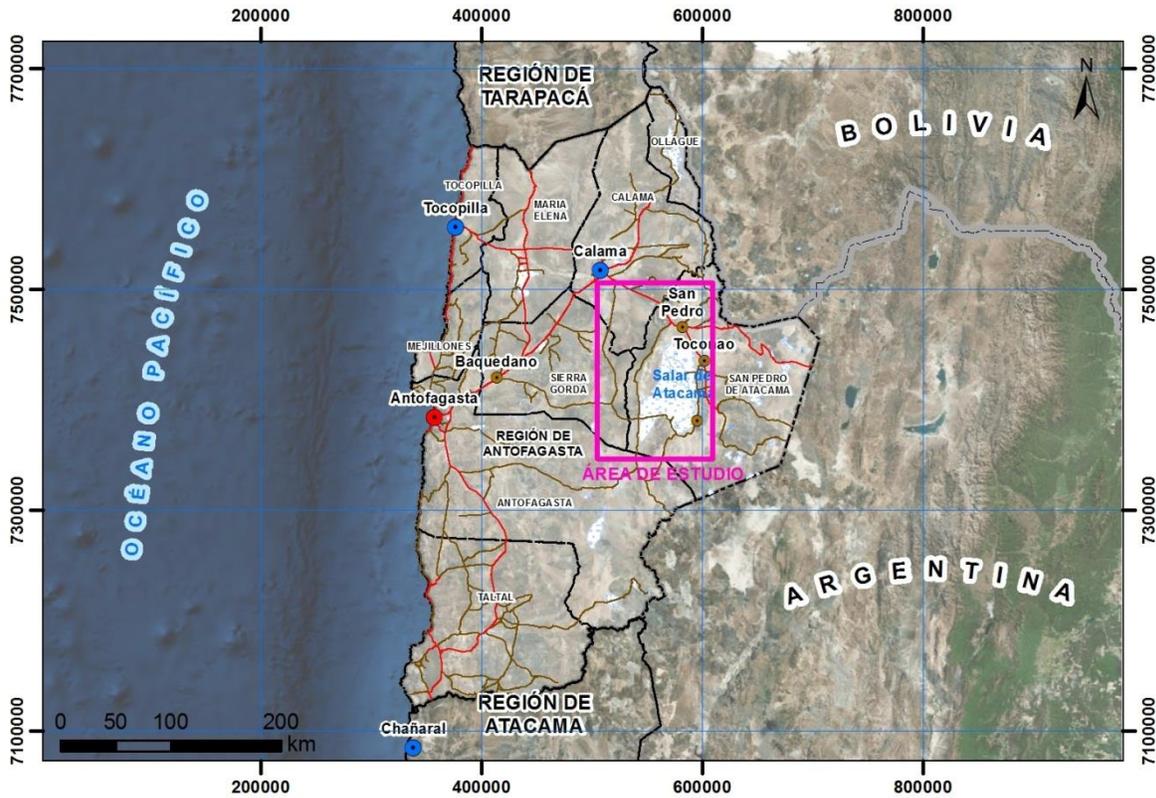
En el contexto regional la cuenca se encuentra distanciada de las principales ciudades, así la ciudad de Antofagasta, capital regional, se localiza aproximadamente a 220 km, Tocopilla a 270 km y Calama a 160 km.

A nivel local, el área de estudio se sitúa en el centro Oeste del territorio comunal de San Pedro de Atacama. La superficie comunal es de 23.439 km<sup>2</sup> y cuenta con una población aproximada de 5.000 habitantes, los cuales se distribuyen principalmente en los centros poblados de San Pedro de Atacama, Toconao, Socaire y Peine.

Topográficamente el Salar de Atacama, se sitúa en una zona plana con una altitud promedio de 2.300 msnm, constituyendo la zona más baja o depocentro de la cuenca. Geográficamente se ubica dentro de la denominada “Gran Fosa”, rodeada al Oeste por la Precordillera de Domeyko y al Este por la Cordillera Prealtiplánica.

La Figura 1-1, muestra la ubicación general de la cuenca del Salar del Atacama, en su contexto con las ciudades y centros poblados de la Región de Antofagasta y de la comuna de San Pedro de Atacama y su condición limítrofes con las repúblicas de Argentina y Bolivia.

**Figura 1-1 Ubicación General del Área de Estudio**

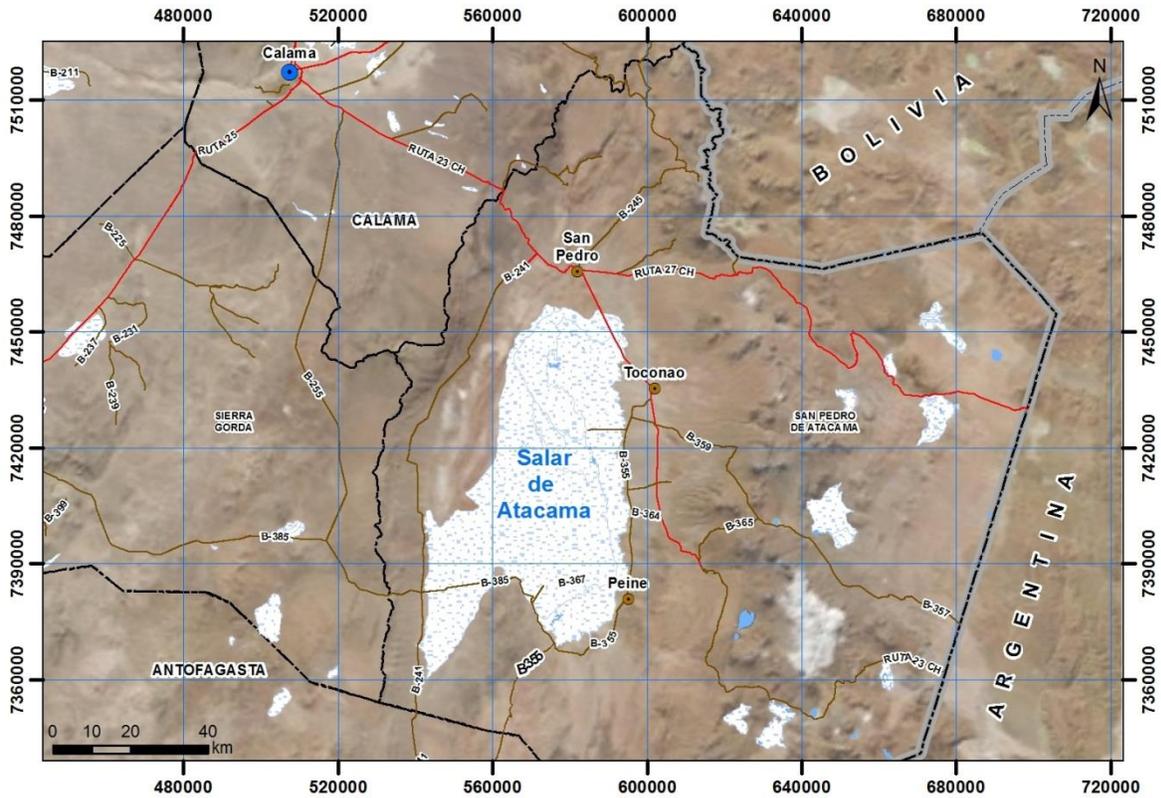


Fuente: Elaboración Propia

Desde Antofagasta es posible acceder a la cuenca del Salar del Atacama a través de la ruta 5 Norte, la cual desde la localidad de Baquedano conecta con la ruta de superficie de bischofita B-385, la cual se inserta en la cuenca, hacia el oriente, hasta el sector Sur del Salar donde se emplaza la planta Salar de Rockwood.

Desde Calama el acceso es a través de la Ruta Internacional 23-CH, que une la ciudad de Calama con el paso internacional Sico, en el límite con la República Argentina. Se trata de una ruta asfaltada desde Calama hasta la localidad de Toconao, donde se puede acceder a la ruta B-355, la cual posee una superficie tratada con bischofita, que es la ruta que recorre el borde oriental del Salar y que permite conectarse con la localidad de Peine y con la planta Salar de Rockwood. Las principales vías de acceso al área de estudio se presentan a continuación en la Figura 1-2.

**Figura 1-2 Vías de acceso al Salar de Atacama**



Fuente: Elaboración Propia

### 1.2.2 Nomenclatura espacial del área de estudio

A continuación se describe la terminología espacial utilizada a lo largo de este trabajo, para una mejor comprensión de lo que se presenta (ver Figura 1-3).

1. **Cuenca Salar de Atacama:** corresponde a la hoya hidrográfica del Salar de Atacama, es decir, a todo el territorio que drena en forma natural hacia el depocentro de la misma, y que corresponde a un Salar endorreico. En este estudio, cuando se menciona el término de cuenca del Salar del Atacama, nos referiremos a la hoya hidrográfica cuyos límites se tomaron de la información publicada por la DGA (2010).

Además, para este estudio, la cuenca se ha dividido en 5 zonas o sectores de interés que se describen a continuación:

Salar de Atacama: Corresponde a los depósitos salinos que se encuentran en el depocentro de la cuenca, y está dividido a su vez por otras dos áreas, o subcuenca: el Núcleo y la Zona Marginal. En

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

el núcleo del Salar se sitúan las plantas de explotación de salmuera de SQM (MOP y SOP) y de Rockwood, mientras que en la Zona Marginal se encuentran los sistemas lagunares de Soncor, Aguas de Quelana, Peine y La Punta - La Brava, y la localidad de San Pedro de Atacama.

Borde Norte: Corresponde al área norte de la Cuenca donde se sitúan los cursos medio y superior de los ríos San Pedro y Vilama.

Borde Sur: Corresponde al área sur de la cuenca, donde se localizan los callejones de Tilopozo, Tilomonte, las lomas de Tilocalar, el Cordón de Lila, y las zonas de acuíferos de Monturaqui y Negrillar

Borde Este: Corresponde al área este de la cuenca, cuyas quebradas principales son las de Camar, Soncor y Peine.

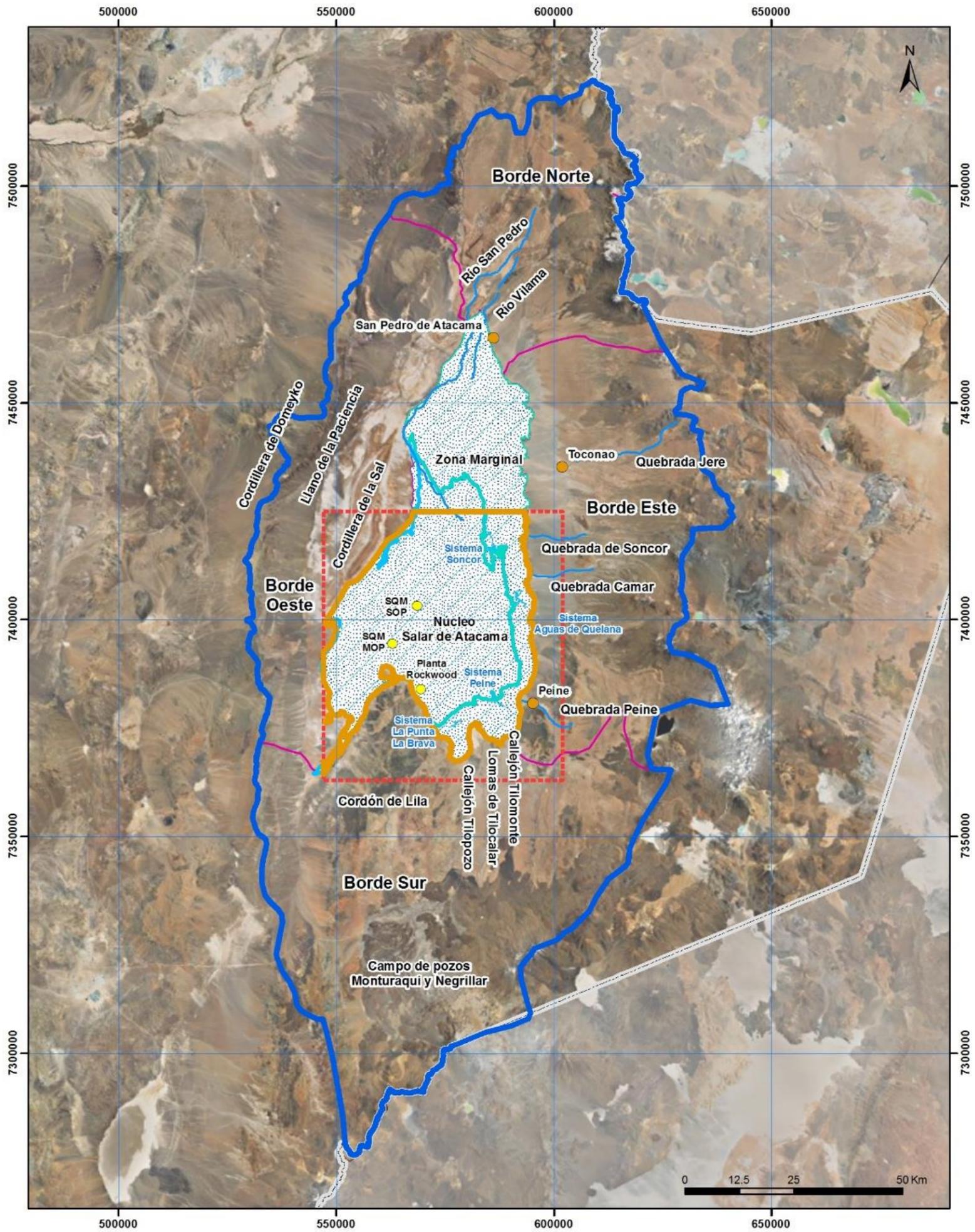
Borde Oeste: Corresponde al área oeste de la cuenca donde ubica la Cordillera Domeyko, la Cordillera de la Sal y el Llano de la Paciencia.

2. *Núcleo o Núcleo de Halita:* este término hace referencia a todo el área del Salar de Atacama ocupada mayoritariamente, desde un punto de vista geológico, por los depósitos evaporíticos de cloruro, denominados también de halita. Hidrogeológicamente el núcleo del Salar, en su zona saturada está relleno de salmuera.
3. *Zona Marginal:* Es el área dentro del Salar de Atacama que se define como de transición entre los depósitos sedimentarios del borde del Salar y los depósitos evaporíticos del Núcleo. Así, la Zona Marginal, desde un punto geológico, está ocupada principalmente por los depósitos evaporíticos de carbonatos y sulfatos, con intercalaciones de depósitos sedimentarios, y en menor medida por depósitos de cloruros. En esta zona se encuentran los sistemas lagunares, y en profundidad, en la zona saturada, el acuífero de agua dulce-salobre, la interfase salina y la salmuera debajo de éste. En la Zona Marginal ocurre la mayor parte de la evaporación de la cuenca.
4. *Área de concesión de Explotación de Rockwood:* Corresponde al área denominada OMA 1-59820, cuyo titular es la Sociedad Chilena del Litio Ltda. y fueron aportadas por la CORFO en el año 1977, esta concesión corresponde a 3343 pertenencias, cuya superficie actual equivale a 16.720 hectáreas.
5. *Zona de extracción de Salmuera:* La extracción de salmuera por parte de Rockwood, se realiza en el interior de dos polígonos denominados A1 y A2 cuya superficie total es de 7.219,5 hectáreas, Actualmente la extracción de salmuera se realiza en 21 pozos. Estas zonas y los pozos de extracción fueron aprobados por las RCA's 092/2000 y 3132/2006.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

6. *Dominio espacial del modelo numérico:* Corresponde al área modelada por el software MODFLOW, y representada mediante celdas, activas o inactivas. No considera el total de la cuenca hidrográfica del Salar de Atacama, pero se alimenta de información procedente de toda ella.

**Figura 1-3 Terminología espacial del estudio**



**Leyenda**

- |                             |               |                                   |
|-----------------------------|---------------|-----------------------------------|
| Área de estudio             | Núcleo        | Centro poblado                    |
| Cuenca del Salar de Atacama | Zona Marginal | Plantas de extracción de salmuera |
| Salar de Atacama            | Zonas         | Red hídrica                       |
| Dominio del Modelo          | Lagunas       |                                   |

Fuente: Elaboración Propia

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

## 2 RECOPIACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE ANTECEDENTES

Para la elaboración de esta Adenda se revisaron los siguientes estudios y bases de datos entregados por Rockwood y recopilados por SGA, los que contienen antecedentes con respecto a la geología, geofísica, hidrología, meteorología, hidrogeología e hidrogeoquímica del sector.

- Börgel (1983) Geografía de Chile Tomo 2 Geomorfología. Instituto geográfico militar. Incluye una descripción de la geomorfología regional del Salar de Atacama
- Conama (2003) “Proyecto de Estudio y Monitoreo del Recurso Hídrico de la cuenca del Salar del 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). Recopila antecedentes aportados por las 4 empresas participantes (Rockwood, SQM, MEL y Zaldívar). Presenta un plan de monitoreo, seguimiento y evaluación de las variables que definen el comportamiento del sistema hídrico, especialmente en las zonas sensibles de las vegas de Tilopozo y borde Este del Salar. Se desarrolla un modelo numérico utilizando programa MODFLOW considerando 1 estrato de 30 m de profundidad. Para simular el comportamiento de la interfase salina, se utilizó el programa SEAWAT en dos dimensiones (una fila de 15 capas), aplicado a perfiles del sistema Tilopozo, Soncor y Quelana.
- Conama (2004) “Proyecto de Estudio y Monitoreo del Recurso Hídrico de la cuenca del Salar del 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). Incluye el respaldo técnico para algunas afirmaciones realizadas en el informe Conama 2003, entre los que se incluye perfiles e interpretaciones de geofísica
- CPH Consultores (2011) Informe: Hidrología e hidrogeología Salar de Atacama. Adenda 2: Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Planta de producción de sales de Potasio SLM NX UNO de Peine, Chile. Informe CPH para Sociedad Legal Minera NX UNO de Peine. Incluye una actualización de la línea base de las componentes de hidrología e hidrogeología, incorporando antecedentes para la modelación numérica del acuífero. Se utilizó el modelo para determinar el efecto del bombeo en la Zona Marginal del Núcleo donde se ubican los sistemas lacustres.
- Dalannais, L. (1979). Hidrogeología del borde oriental del Salar de Atacama. Tesis de Grado, Universidad del Norte, Departamento de Geología, Antofagasta, Chile

	<p>ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL          PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL          SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL          SALAR DE ATACAMA</p>	
	<p>ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO          NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA</p>	

Define las características hidrogeológicas del borde oriental del Salar y analiza las características, evolución y calidad de las aguas subterráneas. Aporta también una descripción de la geología del área y muestra resultados de trabajo en terreno.

- DGA (2005) “Hidrogeología de la II Región y Asesoría para la Revisión de Informes de Estudios de Evaluación de Recursos Hídricos. Informe Final Salar de Atacama”. DICTUC (División Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Área Aguas Subterráneas) para Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras

A partir de los antecedentes hidrológicos e hidrogeológicos analizados en estudio, se desarrolla un modelo conceptual de los acuíferos principales de la Cuenca del Salar, Borde Este, Núcleo y Monturaqui-Negrillar-Tilopozo.
- DGA-AC Ingenieros (2007) SIT N°122, Estimaciones de Demanda de Agua y Proyecciones Futuras. Zona I Norte. Regiones de I a IV.

Realizado con la finalidad de disponer de información actualizada para la situación actual y futura de la demanda de recursos hídricos en el país. Se adoptaron los coeficientes de cultivo recomendados para la actividad agrícola típica del sector.
- DGA (2010a) Actualización de la Evaluación de la disponibilidad de Recursos Hídricos para Constituir Derechos de Aprovechamiento en las subcuencas Afluentes al Salar de Atacama II Región, Chile. Informe Final S.I.T. N° 210. GCF Ingenieros Consultores para DGA, Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile.

Contiene un análisis de antecedentes disponibles para el estudio, una identificación y caracterización de las zonas ambientales sensibles de la cuenca del Salar y una descripción y análisis de los componentes que intervienen en el sistema hídrico (precipitación, escorrentía, evaporación, calidad de agua, niveles de agua subterránea y lagunas). Realiza un balance hídrico del sistema. Hace una estimación de la demanda hídrica por sectores sensibles en el Salar.
- DGA (2012b). Evaluación de los recursos Hídricos Subterráneos del Acuífero del Salar de Atacama. Informe Técnico S.D.T. N° 324. Departamento de Administración de Recursos Hídricos, Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile.

Incluye un inventario de las zonas protegidas de la cuenca del Salar incluyendo lagunas, vegas y bofedales. También incluye un estudio climático, con estimaciones sectorizadas de precipitación y evaporación y evapotranspiración. Por último desarrolla un balance hídrico de la cuenca. En los anexos se pueden encontrar superficies totales sectorizadas por altitud geográfica y por demanda de agua, además de un listado con las concesiones de explotación de agua de la cuenca.
- DGA (2013). Análisis de la oferta hídrica del Salar de Atacama. Informe Técnico. S.D.T N° 339. División de Estudios y Planificación, Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

Corrige la determinación del balance hídrico del Salar de Atacama obtenido en el estudio del 2010, realizado por DGA – GCF, adoptando las nuevas metodologías sugeridas en la minuta, como son las consideraciones para determinar la precipitación efectiva y las pérdidas por evaporación y evapotranspiración en el área de estudio.

- DGA (2014). Derechos de aprovechamiento de aguas registrados en DGA. [En Línea]. Dirección General de Aguas. Recuperado en: <[http://www.dga.cl/productosyservicios/derechos\\_historicos/Paginas/default.aspx](http://www.dga.cl/productosyservicios/derechos_historicos/Paginas/default.aspx)> [Extraído el: 30 de diciembre de 2014].
- Dictuc (2004a) Funcionamiento Hidráulico de las Lagunas marginales del núcleo del Salar de Atacama. Informe Ambiental DICTUC para SQM, Sociedad Química y Minera de Chile. Presenta un análisis de antecedentes hidrogeológicos y químicos en el entorno a los sistemas lacustres del Salar, específicamente referente a los sistemas de Peine, Aguas de Quelana y Soncor. Se realiza un balance hídrico localizado a los sistemas lacustres.
- DICTUC (2004b). Modelo Hidrogeológico del Acuífero de Salmuera del núcleo del Salar de Atacama. Descripción del Modelo y Simulaciones. II Región. Informe Técnico DICTUC para SQM, Sociedad Química y Minera de Chile. Con los antecedentes hidrológicos e hidrogeológicos analizados en este estudio, se desarrolla un modelo conceptual y numérico del funcionamiento hidráulico del acuífero del Salar. El modelo numérico se desarrolla con el programa MODFLOW considerando un estrato. El balance hídrico indicó una recarga desde los bordes del Salar de 4.770 l/s.
- FAO (2006) Estudio FAO Riego y Drenaje 56: Evapotranspiración del cultivo, Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Italia. Entrega las directrices para la determinación de la evapotranspiración para distintos tipos de cultivos y cubiertas vegetacionales, con el fin de obtener sus requerimientos de agua. Se utilizó para determinar los coeficientes de cultivo para las forestaciones de tamarugos encontradas en el área aportante al Salar de Atacama.
- GCF Ingenieros consultores (1999) GCF Ingenieros Consultores (1999). Actualización del modelo de simulación hidrogeológico del Salar de Atacama. Informe GCF para SCL, Sociedad Chilena del Litio. En este documento se revisa el modelo numérico y aporta antecedentes de parámetros hidráulicos y niveles freáticos.
- GCF Ingenieros Consultores (2001a). Modelo hidrogeológico Salar de Atacama. Informe GCF para SCL, Sociedad Chilena del Litio.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

Contiene la revisión del modelo numérico, la recarga y descarga del sistema y aporta antecedentes de parámetros hidráulicos.

- GCF Ingenieros Consultores (2009). Modelo de Simulación Flujo Sistema Salar de Atacama. Anexo 5.2 Estudio Impacto Ambiental. Informe GCF para SCL, Sociedad Chilena de Litio

Analiza y cuantifica la escorrentía afluente al Salar. Se desarrolla un modelo numérico en programa MODFLOW considerando 2 estratos, una costra salina de 40 m de espesor y bajo esta un estrato de 500 m de profundidad.
- Geobiota (2011a) Plan de Seguimiento Ambiental Salar de Atacama: Medición de Superficies en cuerpos Lacustres: Campaña abril 2011 del Estudio de Impacto Ambiental Cambios y Mejoras de la Operación Minera en el Salar de Atacama. Informe Geobiota para SQM, Sociedad Química y Minera de Chile.

Describe la metodología empleada para realizar el seguimiento y medición y los resultados de la campaña de abril de 2011 respecto de la medición de las superficies de las lagunas en los sistemas de Peine y Soncor.
- Geohidrología (2010) Primera actualización del modelo de flujo de agua subterránea en el Salar de Atacama según RCA 226/2006: Proyecto Cambios y Mejoras de la Operación minera en el Salar de Atacama. Informe Geohidrología Consultores para SQM, Sociedad Química y Minera de Chile.

Determina que el modelo continúa siendo válido para su función principal de predecir la evolución de niveles en las lagunas. Se detecta divergencia en los pozos del Núcleo.
- Geohidrología (2013a). Segunda actualización del modelo de flujo de agua subterránea en el Salar de Atacama según RCA 226/2006: Proyecto Cambios y Mejoras de la Operación minera en el Salar de Atacama. Informe Final Geohidrología Consultores para SQM, Sociedad Química y Minera de Chile.

Actualización y recalibración del modelo de flujo de agua subterránea. Incluye información sobre parámetros hidráulicos, y caudales bombeados entre otros.
- Geohidrología (2014b). Plan de Seguimiento Ambiental Hidrogeológico: Proyecto Cambios y mejoras de la operación minera en el Salar de Atacama. Informe N° 15 de Monitoreo Semestral actualizado a Junio de 2014, Geohidrología Consultores para SQM, Sociedad Química y Minera de Chile.

Contiene la actualización de los parámetros medidos en el plan de seguimiento ambiental de SQM incluyendo niveles piezométricos y datos de calidad química de las aguas. Actualizado hasta Junio de 2014
- Kunasz, and Bell. (1979), Salar de Atacama, Lithium reserves High calcium brine exploration Report. Reporta la campaña de exploración realizada para caracterizar las reservas de litio del Salar. Aporta descripción geológica, pruebas hidráulicas y análisis químicos.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

- Mardones (1986). Características geológicas e hidrogeológicas del Salar de Atacama. En: El litio, un nuevo recurso para Chile. Editado por Lagos G., Santiago. Editorial Universidad de Chile. 181-216 pp. Corresponde a un estudio geológico del Salar de Atacama, el cual incluye la descripción de los distintos tipos de costra salina del Núcleo y el borde del Salar y se calcula la tasa de evapotranspiración para las distintas áreas en las que divide el Salar.
- Mardones, L. (1997). Flux et évolution des solutions salines dans les systèmes hydrologiques des Salar D`Ascotan et D`Atacama. Thèse de Dotorat en science de la terre. Universidad de Paris. Tesis doctoral sobre el Cálculo de la evaporación desde el terreno en los Salares de Ascotan y Atacama, mediante el uso de lísímetros
- McCartney (2001) Hydraulic and Hydrochemical interactions in the Tilopozo groundwater zone Salar de Atacama Region II, Chile. Thesis for Master of Science in hydrogeology and groundwater management, National Centre for Groundwater Management, University of Technology. Sidney, Australia.  
Estudio hidrogeológico e hidroquímico del Sector de Tilopozo al sur del Salar de Atacama.
- Moraga, (1974) 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. Presenta los datos obtenidos durante el estudio y los antecedentes que permitan continuar los trabajos en el Salar de Atacama dentro de un programa que incluya la prospección de otros Salares.
- MEL (1996). Estudio de Impacto Ambiental del proyecto de lixiviación de óxidos de cobre y aumento de la capacidad de tratamiento de mineral sulfurado. Informe RESCAN para Minera Escondida Este estudio incluye información sobre la geología e hidrogeología del Borde Sur del Salar de Atacama.
- MEL (2015). Plan de Alerta Temprana para el acuífero Monturaqui- Negrillar- Tilopozo: Revisión de los datos de monitoreo Informe N° 14: Revisión hasta fines de 2014. Informe SWS, Schlumberger Water Services Chile para Minera Escondida  
Contiene antecedentes de la zona del borde Sur del Salar de Atacama, incluyendo datos hidroquímicos, catastro de pozos de monitoreo y niveles piezométricos, explotación de la cuenca e información sobre las lagunas de la Punta-La brava e información sobre el modelo numérico del acuífero de Monturaqui-Negrillar- Tilopozo
- Ramírez y Gardeweg (1982) Hoja de Toconao Región de Antofagasta: Carta Geológica de Chile, Escala 1:250.000, N° 54, Servicio Nacional de Geología y Minería, Chile.  
Resume la geología de la Hoja Toconao aportando datos de estudios de gabinete, reconocimiento y modificaciones de trabajos existentes y levantamientos geológicos.

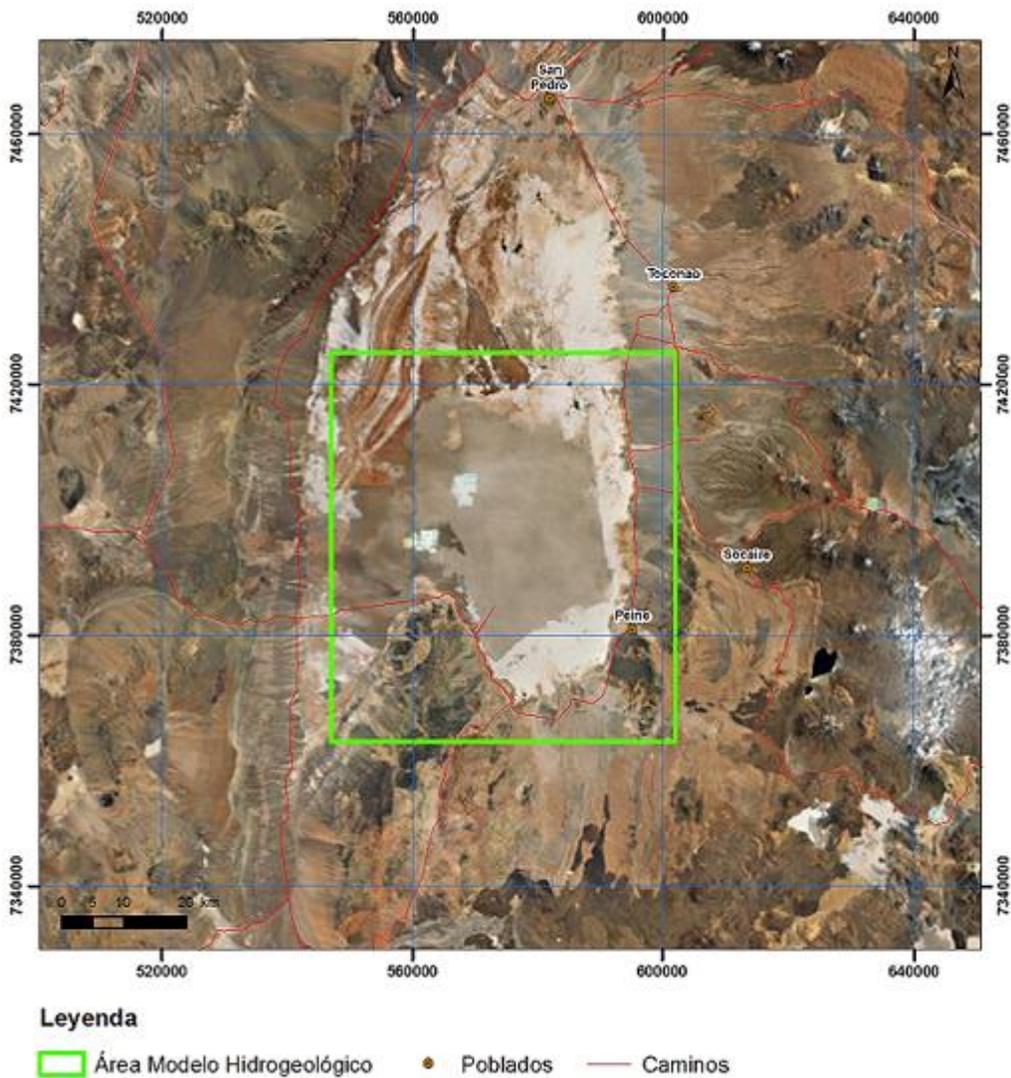
	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

- Salazar, et al., revista Vertiente (1999) Análisis de Requerimientos Hídricos de Vegas y Bofedales en el Norte de Chile.  
 Se estimaron los requerimientos hídricos de los sistemas típicos de humedales en las zonas altiplánicas del Norte. Se extrajeron de este estudio los coeficientes de cultivo adoptados para vegas, bofedales y zonas de cultivo.
- SEA (2012) Guía para el uso de Modelos de aguas subterráneas en el SEIA. Servicio de Evaluación Ambiental, Ministerio del Medio Ambiente, Gobierno de Chile. ISBN: 978-956-9076-12-1  
 Contiene las recomendaciones para la construcción de modelos numéricos de flujo en agua subterránea y para la presentación de los resultados del mismo. De esta forma tanto se facilita la comprensión y fiscalización del modelo por parte de la autoridad.

### 3 GEOLOGÍA

En este capítulo se recopila y analiza la información geológica de la cuenca del Salar del Atacama en general, y del área de modelación numérica en particular, la cual se encuentra representada en la Figura 3-1.

**Figura 3-1 Localización área modelo numérico**



Fuente: Elaboración propia

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

El objetivo de esta recopilación de antecedentes y su análisis integrado con la información generada por Rockwood, es conocer las distintas formaciones geológicas que se encuentran en la Cuenca, su distribución espacial y en profundidad, que por sus características litológicas y por lo tanto también de porosidad/permeabilidad, permiten la existencia de distintos acuíferos y de flujos subterráneos que dan sentido al modelo hidrogeológico conceptual que se representado en el modelo numérico.

La historia geológica del área, se encuentra íntimamente ligada a la evolución de la Cordillera de los Andes, lo que permite entender los diferentes eventos geológicos que dieron origen a la cuenca del Salar del Atacama, cuya interpretación puede hacerse a partir la descripción de los materiales litológicos que constituyen la zona, así como de las principales estructuras que aparecen en el área, todo lo cual es consecuencia de las diferentes etapas evolutivas de la Cuenca.

### 3.1 Revisión de antecedentes

#### 3.1.1 Breve historia geológica de la cuenca del Salar del Atacama

El Salar de Atacama se encuentra en una Cuenca endorreica, con una historia geológica definida por la gran actividad tectónica del sector.

Las rocas más antiguas que afloran en el área del Salar de Atacama tienen edad Paleozóica, y corresponden a la Formación Lila y Formación Cas. Debido a la escasez de afloramientos pertenecientes a este periodo, no se puede reconstruir los eventos acaecidos en esta época, ni tampoco se puede definir una relación exacta entre los contactos de los materiales Paleozoicos y los suprayacentes Triásicos.

Sin embargo, desde época Paleozoica, se pueden reconocer cinco fases de deformación (Ramírez y Gardeweg, 1982) que dan origen a la Cuenca como es ahora. Desde un punto de vista geológico, puede considerarse que los materiales Paleozoicos (Mc. Cartney, 2001) representan el basamento de la cuenca.

Estas cinco fases y su localización cronológica conforme a la bibliografía mencionada son las siguientes.

- **Primera fase:** es reconocida por una discordancia angular triásica (Triásico: 252.17-201.3 millones de años (Ma)) que separa los materiales de los Estratos El Bordo y los suprayacentes de la Formación Agua Dulce. Tras la deposición de los Estratos El Bordo en el Triásico Inferior en un ambiente de lago continental restringido, se depositó discordantemente la Formación Agua Dulce en un ambiente continental con desarrollo de volcanismo activo. Posteriormente, durante el evento marino acaecido en el Jurásico, se deposita, concordantemente sobre la Formación Agua Dulce, el Grupo Caracoles compuesto por las siguientes Formaciones: Torcazas, Caracoles, Doralisa, Millonaria y Honda.
- **Segunda Fase:** A principios del Cretácico (Cretácico Inferior: 145-100 Ma) se deposita la Formación Purilactis, con algunas intercalaciones de evaporitas en un ambiente puramente continental, y se

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

produce la segunda fase de deformación documentada principalmente por la presencia de abundantes cantos rodados calizos, con fósiles pertenecientes al Grupo Caracoles en la base de los conglomerados de la Formación Purilactis. El plegamiento de las capas Jurásicas afecta también a la Formación Purilactis, formándose una cuenca continental. Tras el plegamiento y un periodo de erosión de los materiales, se deposita en el Eoceno la Formación Cinchado, que sobreyace en discordancia angular de erosión la Formación Purilactis.

- Tercera fase:** El límite Eoceno-Oligoceno (33.9 Ma) determina una tercera fase tectónica, que configuró los rasgos geomorfológicos principales de la región tales como La Cordillera Domeyko, cuenca Cordillera de la Sal, el Cordón de Lila, la Precordillera y el Altiplano. Estas unidades estructurales se hayan limitadas por fallas regionales. Entre el Oligoceno y el Mioceno Medio, se depositó la Formación Tambores en un medio continental aluvial gradado a piedemonte, y concordante con la Formación San Pedro, depositada esta última en cuencas intracratónicas de aguas salobres.
- Cuarta Fase:** se asigna al Mioceno Superior (13.8-5.33 Ma), en el que se produce una reactivación de las estructuras a nivel regional que afecta las Formaciones Tambores y San Pedro. Se cree que el plegamiento de la Formación San Pedro que dio origen a la Cordillera de la Sal se produjo en este periodo con la reactivación de la falla inversa del flanco oriental de la Cordillera de Domeyko. En el Mioceno Superior comienzan a depositarse la Formación Vilama y los depósitos aterrazados. La presencia de fósiles en Formación Vilama indica que se depositó en una cuenca de agua dulce o algo salobre en un área de actividad volcánica indicada por la presencia de cenizas. Esta Formación sobreyace en discordancia angular sobre la Ignimbrita Pílon. A finales del neógeno se deposita la Formación El Tambo también en un ambiente lagunar.
- Quinta Fase:** El último evento tectónico estaría relacionado con un evento de fallamiento normal, que podría haber ocurrido cerca del límite Plioceno–Pleistoceno (2.58 Ma), originando los bordes actuales del Salar de Atacama. A comienzos del Cuaternario continúa la deposición de sedimentos propios del ambiente lagunar (Formación Vilama). Las terrazas que se incluyen en esta formación, son posteriores al depósito de las rocas sedimentarias. Este cambio de nivel va asociado a un movimiento de la corteza regional y/o cambios climáticos, los cuales determinaron la eliminación del ambiente lagunar por una disminución de la tributación fluvial. Este cambio de régimen hizo evolucionar la actividad y ambiente de la cuenca, transformándose gradualmente en un Salar y depositándose gruesas capas de evaporitas y otros sedimentos. Las estructuras más modernas corresponden a las fallas del “graben” de Tilocalar, que afectan a la Ignimbrita Tucúcaro (Plioceno) y que podría haber sido originadas por un evento de fallamiento normal ocurrido cerca del límite Plioceno–Pleistoceno.

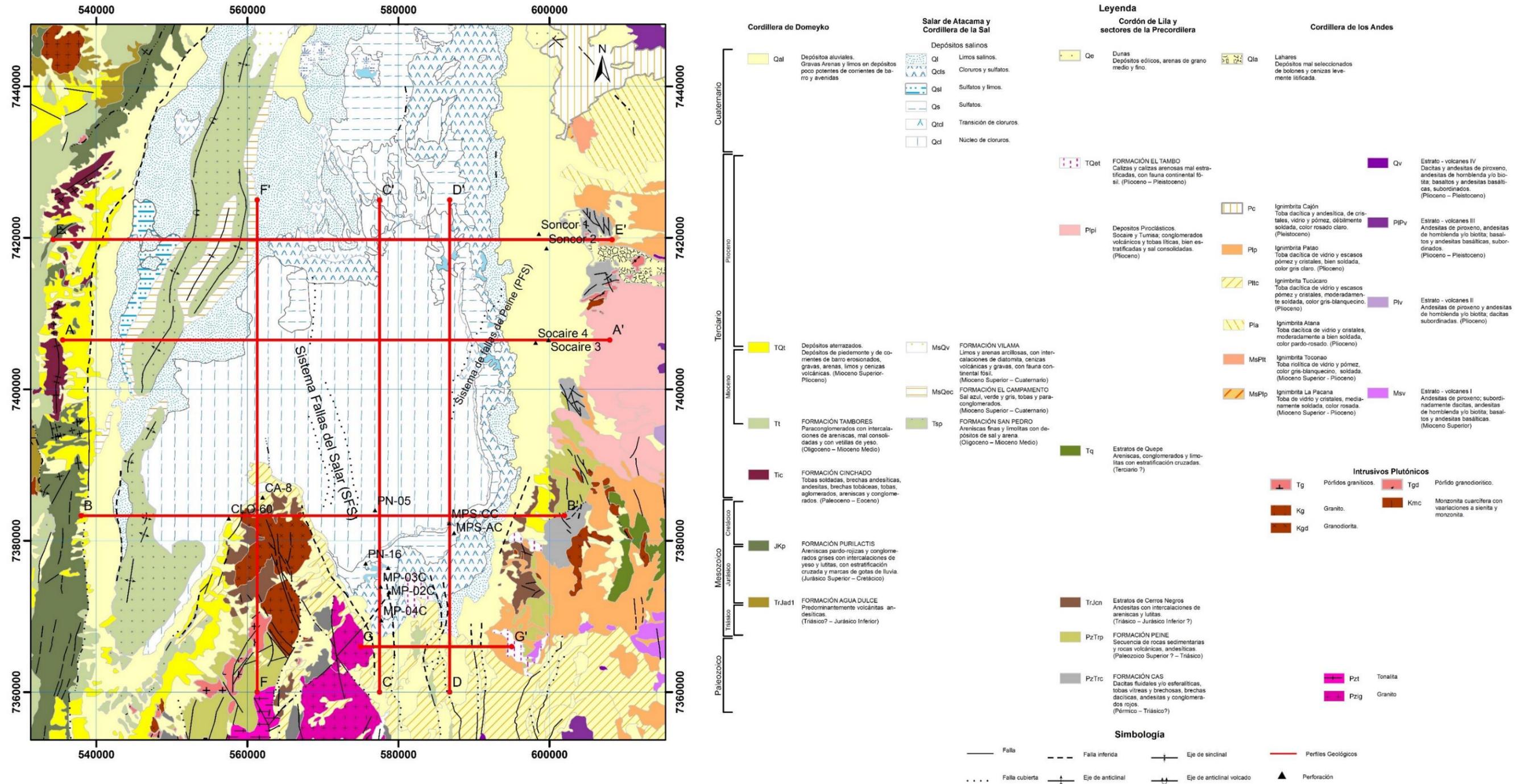
La cuenca del Salar del Atacama constituye un área tectónica activa en el momento actual. Además, desde el Paleozoico a tiempos presentes, ha estado sometida a una actividad volcánica elevada, lo cual queda evidenciado por la gran cantidad de depósitos de origen volcánicos que se encuentran desde el Paleozóico hasta el Cenozóico. En esta cuenca se han ido depositando discordantemente a las formaciones volcánicas

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

mencionadas anteriormente. También ha sufrido intrusión de rocas plutónicas que se localizan casi exclusivamente en la Cordillera Domeyko y en el Cordón de Lila.

La Figura 3-2, muestra el mapa geológico del Salar de Atacama, modificado de la Carta Geológica de Chile Escala 1:250.000, Hoja Toconao. En él se pueden apreciar las unidades geológicas que caracterizan la zona del Salar de Atacama, así como las principales estructuras que confieren tanto las características geomorfológicas, como los elementos históricos de la cuenca. Esta geología se basa en los estudios existentes más completos realizados que abarcan todo el Salar, y que corresponden a los citados Ramírez y Gardeweg (1982) y Moraga et al. (1974). Estos antecedentes son coherentes en sus definiciones de unidades y sus litologías.

Figura 3-2 Mapa geológico del Salar de Atacama



Fuente: Carta geológica de Chile N°54. Hoja de Toconao (Modificado)

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

### 3.1.2 Marco estratigráfico

A modo de resumen cronoestratigráfico, se presenta la Tabla 3-1 con la descripción de las formaciones geológicas que afloran en la cuenca del Salar del Atacama y sus alrededores.

**Tabla 3-1 Formaciones Geológicas de la Región de Antofagasta.**

Cuaternario	Depósitos aluviales	Gravas, arenas y limos en depósitos poco potentes de corriente de barro y avenidas (cordillera Domeyko).
	Depósitos salinos	Limos salinos, cloruros y sulfatos (Salar de Atacama)
	Dunas	Depósitos eólicos de arena de grano medio a fino (cordón de Lila y pre-cordillera)
	Coluviones	Depósitos monomícticos de bloques angulosos en las laderas de los volcanes
	Piroclastos	Escoria volcánica, pómez y ceniza.
	Morrenas	Depósitos glaciares caóticos
	Lahares	Depósitos mal seleccionados de bolones y cenizas levemente litificadas
	Depósitos lacustres	Alternancias de carbonatos, materia orgánica, limos, y arenas con componentes piroclásticos, diatomitas y calcarenitas con fauna continental fósil
Plioceno-Pleistoceno	Formación El Tambo	Calizas y calizas arenosas mal estratificadas con fauna continental fósil
Plioceno	Depósitos piroclásticos: Socaire	Aglomerados volcánicos y tobas líticas bien estratificadas y mal consolidadas
	Depósitos piroclásticos: El Abra	Ceniza volcánica deleznable y sin estratificación
Mioceno Superior-Cuaternario	Formación Vilama	Limos y arenas con intercalación de diatomita, ceniza volcánica y gravas con fauna continental fósil y toba consolidada
	Formación El campamento	Sal azul, verde y gris. Tobas y paraconglomerados
Mioceno Superior-Holoceno	Ignimbritas y estrato volcanes	Depósitos lávicos, de naturaleza andesítica y dacítica y acumulaciones de cenizas (ej. Ignimbrita de Tucúcaro)

Mioceno superior- Plioceno	Depósitos aterrazados	Depósitos de piedemonte y de corrientes de barro erosionados, gravas, arenas, limos y cenizas volcánicas
	Intrusivo Subvolcánicos	Pórfidos dacíticos, riolíticos, andesíticos de biotita y horblenda y andesíticos de piroxeno y horblenda
Oligoceno- Mioceno medio	Formación Tambores	Paraconglomerados con intercalación de areniscas mal consolidadas y vetillas de yeso
	Formación San Pedro	Areniscas finas y limonitas con depósitos de sal y yeso
Paleógeno Inferior-Medio	Estrato de Quepe	Areniscas, conglomerados y limonitas
	Formación Chinchado	Tobas salada, brechas andesíticas, andesitas, brechas tobáceas, tobas, aglomerados, areniscas y conglomerados (Paleoceno-Eoceno)
	Intrusivo Plutónico	Pórfido granítico, pórfidos granodioríticos y dioritas
Jurásico-Cretácico	Formación Purilactis	Areniscas pardo-rojizas y conglomerados grises con intercalaciones de yeso y lutitas, con estratificación cruzada y marcas de gotas de lluvia
	Intrusivos Plutónicos	Granitos, granodioritas, monzonita cuarcífera. Monzodiorita y tonalita
Jurásico	Grupo Caracoles	Formación Honda: Calcarenitas peletíferas y extraclásticas con lentes de sílice y escasa fauna marina fósil
		Formación Millonaria: Yeso compacto
		Formación Doralisa: Lutitas y siltitas con intercalaciones de calcáreas y fauna marina fósil
		Formación Caracoles: alternancia de calcarenitas y calcilititas
		Formación Torcazas: tobas síliceas, conglomerados finos, calcarenitas, areniscas
Triásico Superior- Jurásico Inferior	Formación Agua Dulce	Andesitas, brechas andesíticas y conglomerados con intercalaciones de areniscas y riolitas fluidales predominantemente vulcanitas andesíticas

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

Paleozoico-Triásico	Estratos El Bordo	Andesitas y brechas andesíticas, tobas y conglomerados con intercalaciones de calizas, lutitas, areniscas y tufitas calcáreas, riolitas y arenisca cuarcíferas, con fauna y flora continental fósil
	Formación Peine	Miembro inferior: andesitas con intercalaciones de brechas y areniscas
		Miembro medio: Alternancia de areniscas y lutitas con ondulitas, marcas de fondo y fauna continental fósil
		Miembro superior: Tobas, conglomerados y areniscas
Paleozoico	Formación Cas	Dacitas, Tobas vítreas y brechosas, brechas dacíticas, andesitas y conglomerados rojos
	Formación Lila	Areniscas y conglomerados de cuarzo, lutitas verdes, andesitas en la base, areniscas micáceas verdes con trazas y fauna marina fósil.
	Intrusivos Plutónicos	Granito granodiorítico y tonalita

Fuente: Modificado de Carta geológica Hoja Toconao, (Ramírez y Gardeweg, 1982)

En base a la tabla anterior, elaborada a partir de los trabajos realizados por Ramírez y Gardeweg, 1982 en la Carta Geológica de Toconao, se describen a continuación las formaciones geológicas que afloran en el área de modelación numérica definida en el capítulo 10, las cuales se han diferenciado en tres tipos principales: depósitos no consolidados, materiales consolidados y depósitos salinos:

### Depósitos no consolidados

Depósitos aluviales (Qal): Consisten en una mezcla heterogénea de gravas, arenas y limos, de composición polimíctica y edad Cuaternaria. Se trata de depósitos con espesores muy variables, que van desde algunos centímetros a decenas de metros, originados por corrientes de barro, avenidas y por acción de la nieve y el viento. Se encuentran rodeando a toda la cuenca. En muchos casos estos depósitos tienen la expresión superficial de abanicos aluviales.

Depósitos piroclásticos (Plpi): entre los que se pueden diferenciar:

- Depósitos de Socaire: Compuestos por dos capas de aglomerado volcánico. La capa superior contiene bloques angulosos de hasta 1,20 m de diámetro, en una matriz de arena volcánica gris. La inferior es de color pardo-rosado y contiene bloques angulosos de hasta 80 cm de diámetro en una matriz de ceniza volcánica.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

- Depósitos de Tumisa: (Quebrada de Cámara): secuencia de tobas líticas y aglomerados de color pardo y pardo-grisáceo, con fragmentos de roca de hasta un 1 m de diámetro, fragmentos de pómez y matriz de ceniza volcánica.
- Depósitos El Abra: Ceniza deleznable con cristales de biotita, feldespatos y fragmentos de roca menores a 3 mm, de color gris. Presenta clastos subredondeados a angulares de andesitas, de 0,3 a 5 cm y fragmentos de pómez menores que 3mm. Estos depósitos se sitúan por encima de los depósitos piroclásticos de Socaire.

Depósitos aterrazados (TQt): Están constituidos mayoritariamente por gravas, arenas y limos. Las gravas son polimícticas de clastos angulosos a subangulosos y presentan intercalaciones de cenizas volcánicas. Se corresponden con depósitos de piedemonte y corrientes de barro de una potencia media de 3-4 m. Se encuentran localizados al Norte de Peine.

### **Materiales consolidados**

Granitos del Paleozoico Inferior (Pzig): Corresponde con un cuerpo intrusivo que ocupa una superficie de 28 km<sup>2</sup>. Mineralógicamente se trata de un granito de feldespato alcalino de textura holocristalina, hipidiomórfica, granular, con cristales de cuarzo entre el 35–40% muy deformados, microclina (30–35%) de gran tamaño y parcialmente sericitizada, pertita (20-25%) levemente sericitizada, plagioclasa (3-5%) maclada y parcialmente sericitizada y menos del 5% de moscovita y biotita cloritizada, según Czollak *et al.* (1981), citado por Ramírez y Gardeweg, (1982). Aflora al Sureste del Salar de Atacama.

Formación Lila (Pzl): Secuencia de rocas sedimentarias cuarcíferas del Devónico inferior con un espesor de 400 m. La zona de estudio está constituida por conglomerados de grano fino seguido por una alternancia de areniscas verdes, lutitas verdes y conglomerados de cuarzo de grano fino hacia el techo. La secuencia aflora al Sur del Salar de Atacama al Este de cerro Lila y al Este de Peine.

Formación Peine (PzTrp): Se trata de una secuencia de rocas sedimentarias, volcánicas y andesíticas. Esta formación aflora al Sureste y Noreste de Peine y se divide en tres miembros:

- Miembro inferior: Consiste en andesitas porfíricas y afaníticas con intercalaciones escasas de brechas y areniscas con derivados volcánicos.
- Miembro medio: Formado por una alternancia de lutitas y areniscas de colores mayoritariamente verdes y pardos, bien estratificadas. Las areniscas son de grano grueso, conglomeráticas y afloran en el techo y en la base de la secuencia. Presentan cemento calcáreo y potencias entre 0,1 y 1,5 m.
- Miembro superior: Constituido por areniscas y conglomerados basales de color gris verdoso y cemento calcáreo y rocas tobáceas recristalizadas. Alcanza una potencia de 260 m.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

Estratos de Cerro Negros (TrJcn): Consiste en una secuencia de lavas andesíticas de 4 a 7 m de espesor, de edad Triásico – Jurásico Inferior, bien estratificadas, generalmente porfídicas con niveles amigdaloides y afaníticas de color gris-verdoso y gris-rojizo. Presentan escasas intercalaciones de areniscas y lutitas con estratificación cruzada y compuestas por fragmentos de feldespatos, cuarzo y rocas volcánicas. Las andesitas presentan metamorfismo de contacto con metasomatismo (sericita, clorita, calcita, epidota y actinolita). Se encuentran tanto en la parte oriental como occidental de la cuenca del Salar del Atacama.

Granodiorita del Cretácico Superior (Kgd): Corresponden rocas ígneas leucocráticas de color gris a gris-verdosos, de grano medio a grueso. Aflora al Este de Peine y al Oeste de la zona de estudio.

Granitos del Cretácico Superior (Kg): Roca leucocrática de color gris claro y tamaño de grano fino a medio, ocasionalmente grueso. Esta unidad aflora en el área del Cordón de Lila.

Pórfidos graníticos Cretácicos–Paleógenos (Tg): Corresponden a rocas pardo-rojizas, gris-verdosas, grises claras o rosadas de textura porfídica que presentan entre 25-45% de fenocristales de cuarzo redondeados, en una masa granular o aplítica. Están compuestos por cristales anhedrales y suhedrales de feldespato alcalino (33–51%), cristales idiomorfos de cuarzo (26–38%), plagioclasa parcialmente sericitizada (13–33%) y escasa biotita y anfibolita parcialmente o totalmente reemplazada por óxidos de hierro. Aflora en el flanco oriental del Cordón de Lila.

Formación Tambores (Tt): Formada por paraconglomerados subangulosos a redondeados, mal seleccionados con intercalaciones de areniscas mal consolidadas y de mala o ausente estratificación. Presenta intercalaciones de areniscas de grano grueso y vetillas de yeso. Aflora al Sur de la zona de estudio y alcanza un espesor de 450 m en el Cerro Loma Ancha.

Formación San Pedro (Tsp): Compuesta por areniscas finas y limolitas, de color pardo-rojizo y pardo-amarillento, cementadas por sal o por yeso en algunas zonas. Dispuestas en capas bien estratificadas de 1 o 2 m, hasta un espesor 1.600 m. En la parte superior, se diferencian unos 600 m de capas de sal con impurezas de limos, limolitas y arcillolitas de color pardo-rojizo a pardo oscuro, cementadas por sal, en capas de unos centímetros a 1 m. Aflora en la parte noroeste – Oeste del Salar de Atacama. Como se expone más adelante, en el punto 8.2.2.9 correspondiente al capítulo 8 de este trabajo, esta formación geológica se considera como basamento hidrogeológico en el Núcleo y el margen Oeste del Salar y forma parte de la Unidad Hidrogeológica de Baja Permeabilidad.

Estratovolcanes I (Msv): Corresponde a lavas constituidas principalmente por andesitas de piroxeno y en forma subordinada por dacitas, basaltos y andesitas basálticas. Se trata de estrato-volcanes con un perfil intensamente erosionado donde se pierde casi totalmente su forma cónica y presenta una superficie redondeada. Aflora en el sector Sur y Norte de la Cordillera de los Andes.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

Formación El Campamento (MsQec): Consiste en una secuencia de areniscas y arcillas con sal y yeso. Con esta unidad se correlaciona otra compuesta por capas de halita transparente, tonalitas verde, azul y gris y por tobas. Afloran en la Cordillera de la Sal.

Formación Vilama (MsQv): A esta formación se le asignan depósitos de limos y arenas arcillosas, con intercalaciones de diatomitas y cenizas volcánicas, y gravas que afloran en la parte Norte de la Cordillera de la Sal. Esta formación aflora en ambos flancos de la Cordillera de la Sal.

Igñimbrita Tucúcaro (Pltc): Consiste en una toba de color pardo claro a blanquecino de edad Plioceno, moderadamente soldada con fenocristales de plagioclasa y biotita orientada, fragmentos de pómez achatados de aspecto sedoso y fenocristales de fragmentos líticos pardo-rojizos. Presenta una potencia media de 10–20 m aumentando de espesor cuando rellena depresiones y disminuyendo a 1 m de espesor en altos topográficos. Aflora al Sur y Sureste del Salar de Atacama.

Igñimbrita Patao (Plp): Corresponde a una toba de color gris claro a pardo rosácea claro fuertemente soldada de edad Plioceno. Presenta escasos fenocristales de plagioclasas, biotita cobriza y escaso cuarzo. Presenta fragmentos de piedra pómez blanca, fibrosa y vesicular, y de rocas y escoria volcánica de color pardo oscuro. Alcanza un espesor de 30 m en la localidad de Quebrada Nacimiento adelgazándose hacia el Sur, Oeste y Norte. Aflora al Este de Peine.

Formación El Tambo (TQet): Constituidas por depósitos de calizas y calizas arenosas de color pardo a blanco, de edad Plio-Pleistoceno. Se presentan mal estratificadas y compactas. En superficie los afloramientos presentan numerosas grietas que conforman estructuras poligonales y están cubiertas por depósitos aluviales y salinos. Presentan un espesor máximo de 10 m en Tilocalar y unos 6 m en Peine. Afloran al Sureste del Salar de Atacama, Tilomonte y Peine.

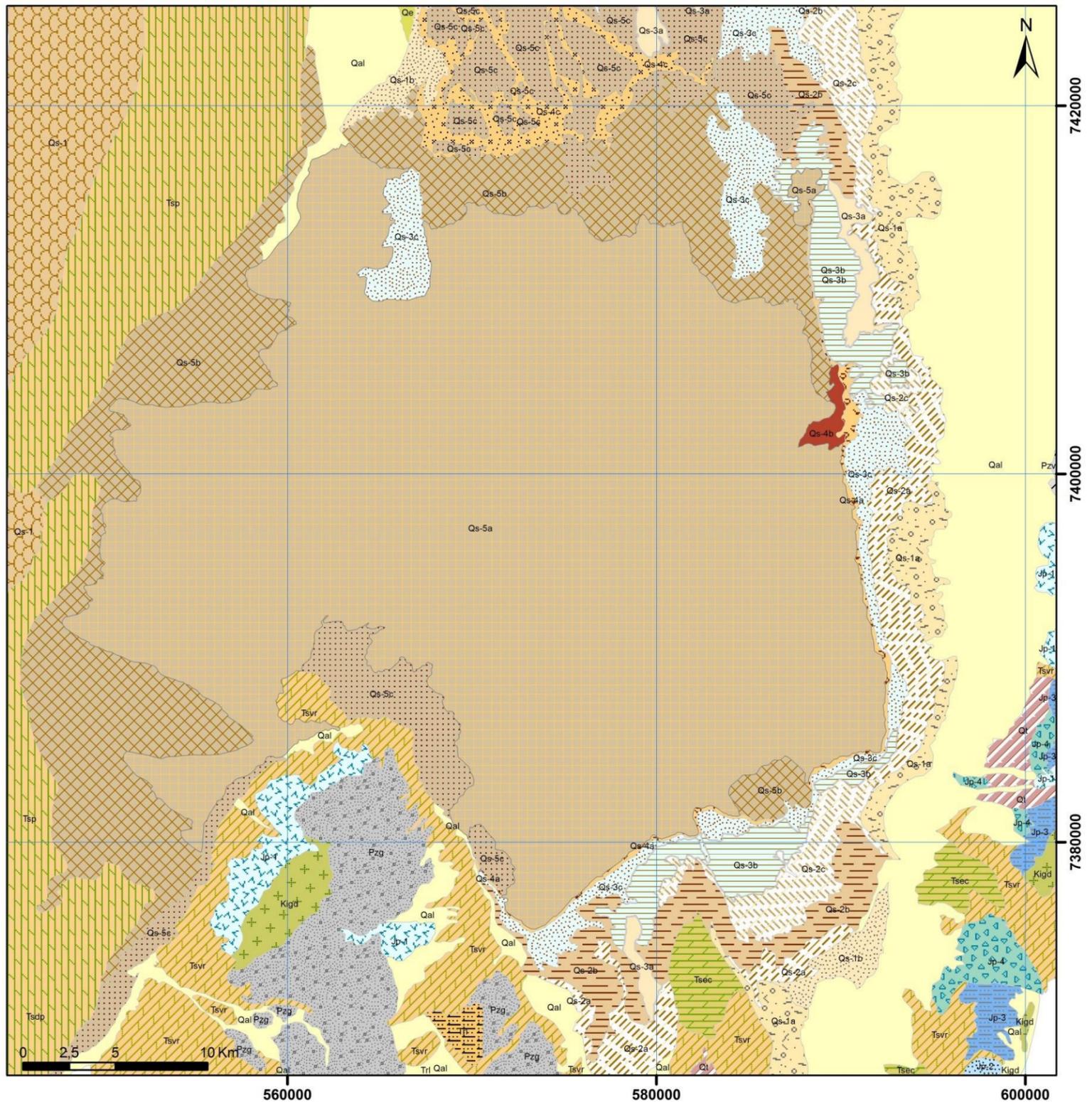
### **Depósitos salinos**

Para la descripción de los depósitos evaporíticos del Cuaternario, además del trabajo de Ramírez y Gardeweg (1982) en la Hoja Toconao, también se ha tenido en cuenta la descripción hecha por Moraga et al. (1974), quien define estos depósitos evaporíticos como una cubierta evaporítica o “costra” con niveles freáticos someros que se divide en varias unidades diferenciadas por su aspecto físico, así como por su composición química y mineralogía.

Según Moraga et al. (1974), en el Salar de Atacama es posible diferenciar una zonificación en los bordes Norte, Sur y Este correspondiente al depósito de materiales evaporíticos de forma fraccionada, provocado por una saturación paulatina hacia el centro del Salar de acuerdo a su granulometría y solubilidad.

Estos depósitos se diferencian en unidades cartografiables en superficie, tal como se muestra en la Figura 3-3, y sus contactos en algunas zonas son transicionales.

Figura 3-3 Mapa Geológico Salar de Atacama según Moraga et al., 1974



**Leyenda**

**Cuaternario**

- Qal Depósitos aluviales, arcillas, limos, arenas, gravas piroclásticas andesíticas.
- Qe Depósitos éolicos
- Qs-1 Depósitos salinos y clásticos del Salar del Llano de la Paciencia.
- Qt Depósitos de terraza

**Costra de Limos salinos**

- Qs-1a Costra de limos, cloruros y sulfatos
- Qs-1b Costra de limos y cloruros.

**Costra Cloruro-Yesífera**

- Qs-2a Costra de cloruros y limos.
- Qs-2b Costra de cloruros formando glóbulos
- Qs-2c Costra acordonada de cloruros con incrustaciones de yeso.

**Costra Yesífera**

- Qs-3a Costra de superficie plano de sulfatos
- Qs-3b Costra de sulfatos, escasos cloruros
- Qs-3c Costra de sulfatos y cloruros

**Costra de Transición de cloruros**

- Qs-4a Costra de cloruros con superficie coloriforme
- Qs-4b Costra de cloruros con superficie plana y grietas de relleno con cloruros.
- Qs-4c Costra de cloruros. Superficie plana, algo rugosa, limo a 10 cm. de la superficie.

**Costra Núcleo de cloruros**

- Qs-5a Costra de cloruros
- Qs-5b Costra de cloruros pardo claros, debido a un mayor aporte de agua.

**Terciario**

- Qs-5c Costra de cloruros pardos oscuras, originadas por aguas con una mayor cantidad de limo.
- Tsec Formación El Tambo. Depósitos químicos de carbonatos
- Tsvr Formación Riolítica. Depósitos de ignimbritas, tobas riolíticas, flujos cineríficos, sedimentos lagunares
- Trl
- Tsp Formación San Pedro. Areniscas y lutitas fisibles con intercalaciones de gruesas capas de sal.
- Tsdp Formación San Pedro. Domos de sal.

**Cretácico**

- Kigd Granodiorita y rocas asociadas.

**Jurásico**

- Jp-1 Formación Peine. Miembro Algarrobilla. Andesitas, escasas intercalaciones de areniscas rojas.
- Jp-2 Formación Peine. Miembro Chuñar. Ignimbritas riolíticas.
- Jp-3 Formación Peine. Miembro Tulán. Lutitas, limonitas, margas y areniscas finamente estratificadas.
- Jp-4 Formación Peine. Miembro Socaire. Conglomerados, areniscas rojas, lavas andesíticas, intercalaciones de limolitas y lutitas marinas.

**Paleozoico**

- Pzg Granitos, granodioritas de grano grueso y rocas asociadas
- Pzv Formación Cas. Lutitas cuarcíferas, tobas y conglomerados.

Fuente: Modificado de Moraga et al., 1974

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

De acuerdo a las características físicas y químico-mineralógicas del Salar de Atacama, Moraga et al., 1974 han realizado la diferenciación de las costras salinas presentes en la Cuenca, cuyas tipologías se pueden observar en la Tabla 3-2, donde también se presenta la equivalencia con las unidades descritas por Ramírez y Gardeweg (1982) en la Hoja de Toconao.

**Tabla 3-2 Diferenciación de las Costras Salinas (Moraga et al., 1974)**

Tipo	Subtipo	Equivalencia en Ramírez y Gardeweg (1982)
Costra de Limos Salinos	Costra de limos, cloruros y sulfatos (Qs-1a)	Ql: Limos salinos Qsl: sulfatos y limos
	Costra de Limos y Cloruros (Qs-1b)	
Costras Cloruro Yesífera	Costras de cloruros y Limos (Qs-2a).	Qcls: Cloruros y sulfatos
	Costra de cloruros formando glóbulos (Qs-2b)	
	Costra acordonada de Cloruros con incrustaciones de yeso (Qs-2c).	
Costras Yesíferas	Costras de superficie plana con sulfatos (Qs-3a)	Qs: Sulfatos
	Costra de Sulfatos con escasos cloruros (Qs-3b)	
	Costras de sulfatos y cloruros (Qs-3c)	
Costra de Transición de cloruros.	Costra de cloruros superficie coloforme (Qs-4a)	Qtcl: transición de cloruros
	Costra de cloruros superficie Plana con grietas rellenas de cloruros (Qs-4b)	
	Costra de cloruros, superficie algo rugosa, Limo a solo 10 cm de la superficie (Qs-4c)	
Costra Núcleo de cloruros	Costra de cloruros (Qs-5a)	Qcl: Núcleo de cloruros
	Costra de cloruro Pardo claras originadas por un mayor aporte de agua (Qs-5b).	
	Costra de cloruro Pardo oscuro originado por un mayor aporte de agua (Qs-5c).	

Fuente: Modificado de Moraga et al., 1974

A continuación se transcriben con detalle cada uno de los tipos de costra reconocidos:

**Costra de Limos Salinos:** Las fracciones más finas de los materiales aluviales que limitan al Salar se ubican en los márgenes de este cono de depósitos de limos y arcillas de gran contenido salino, consistente principalmente en yeso (Qs-1a) y cloruro sódico (Qs-1b). No existen contactos definidos y hay variaciones locales entre estas dos unidades, aumentando la proporción de cloruros hacia el centro de la cuenca. En zonas donde hay escurrimientos superficiales aparecen materiales más gruesos, arenas y gravilla en parte cementados con sales. Las unidades son pardo rojizas con agrietamientos poligonales y estructuras de disolución. El contenido en agua varía estacionalmente.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

Costras Cloruro Yesífera: Junto a los limos salinos y hacia el centro del Salar se reconocen tres unidades formadas principalmente por halita y yeso con carbonatos esporádicos.

- Costras de cloruros y Limos (Qs-2a): Corresponde a una zona de transición entre las unidades limosas y salinas propiamente dichas. En general mantienen el mismo aspecto que los limos salinos pero con un contenido de halita significativamente mayor manteniéndose cantidades subordinadas de yeso.
- Costra de cloruros formando glóbulos (Qs-2b): Se observan en general en zonas de lagunas someras, con fondos de limos orgánicos. En su mayoría están secas, y sobre ellas se han formado glóbulos de cloruro sódico que tienen un aspecto coliforme y un espesor no superior a 1,5 cm, bajo los que se encuentran limos oscuros. En forma irregular la sal blanca presenta manchas amarillas claras.
- Costra acordonada de Cloruros con incrustaciones de yeso (Qs-2c): Es una costra seca, de color crema claro con microrrelieve áspero de altura promedio 25 cm y agrietamiento poligonal con crecimiento de cloruro sódico entre las fracturas.

Costras Yesíferas: se diferencian tres tipos dispuestos desde fuera hacia el interior del Salar:

- Costras de superficie plana con sulfatos (Qs-3a): Superficie plana y seca formada por yeso pulverulento con una cubierta superficial de unos 2 cm, siguiendo yeso granular en algunos casos con intercalaciones detríticas.
- Costra de Sulfatos con escasos cloruros (Qs-3b): Costra de color crema claro con micro relieve áspero de altura promedio de 25 cm con una altura máxima de 50 cm, su composición es casi exclusivamente yeso y las costras poseen agrietamientos poligonales con crecimientos de sal blanca y rosada.
- Costras de sulfatos y cloruros (Qs-3c): En general presenta el mismo aspecto físico que la unidad (Qs-3b) sin embargo hay un aumento gradual en la cantidad de cloruro y el yeso forma una cubierta sobre los cloruros.

Costra de Transición de cloruros: se encuentra rodeando al Núcleo, en una franja de unos 100 m de promedio, de color blanco a crema claro y está constituida fundamentalmente por cloruro de sodio. De acuerdo a su aspecto físico se diferencia en tres tipos:

- Costra de cloruros superficie coliforme (Qs-4a): de color blanco, con costras nodulares de hasta 50 cm de alto con cuarteamientos poligonales. Presenta lagunas y la costra es, a veces, solo una delgada cubierta sobre una superficie de salmuera con materia orgánica.
- Costra de cloruros de superficie plana con grietas rellenas de cloruros (Qs-4b): Es una superficie plana de color crema claro, relativamente dura, sobre la cual se encuentra un reticulado con un relieve positivo de color blanco grisáceo de unos 10 cm formado por el crecimiento de sales en las fracturas de los polígonos.
- Costra de cloruros con superficie plana, algo rugosa, con limo a solo 10 cm de la superficie (Qs-4c): de color blanco grisáceo y lisa, con abundante agrietamiento en polígonos. Superficialmente

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

presenta cloruro de sodio, apareciendo limos con pequeñas cantidades de carbonatos a los 10 cm de profundidad, con abundantes burbujas de sal.

Costra Núcleo de cloruros: Ocupa aproximadamente dos tercios de la superficie del Salar y con un microrelieve promedio de 50 cm sobre el resto de eflorescencias y costras, por su aspecto se diferencian tres tipos:

- Costra de cloruros (Qs-5a): Superficialmente es pardo medio a oscuro y blanco, son costras duras de bordes dentados e intensamente fracturados por agrietamientos poligonales, sobrelevantamientos, rotación, y crecimiento de sales en las fracturas.
- Costra de cloruro pardo claras, originadas por un mayor aporte de agua (Qs-5b): aparece principalmente en el borde Este de la Cordillera de la Sal.
- Costra de cloruro pardo oscuro, originada por un mayor aporte de agua (Qs-5c): Aparecen en la parte Este de la península Chépica y en el delta del río San Pedro.

### 3.1.3 Marco estructural

#### 3.1.3.1 Estructuras geológicas a escala de la cuenca del Salar del Atacama.

La cuenca del Salar del Atacama se encuentra dividida de acuerdo a Ramírez y Gardeweg (1982) en siete dominios estructurales, a saber

1. Oeste de la Cordillera Domeyko
2. Este de la Cordillera Domeyko
3. Cordillera de la Sal
4. Cordón de Lila
5. Graben de Tilocalar
6. Precordillera de los Andes (cerros isla)
7. Cordillera de los Andes

En la Figura 3-4 se muestra el mapa de lineamientos mayores de la Hoja de Toconao, en el que se ha señalado la posición de cada uno de estos dominios.



	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

fallas con rumbo semiparalelo (rumbo NNW) y con una componente de desplazamiento normal que cortan a la Ignimbrita de Tucúcaro. En la zona también se identifican fallas menores con rumbo Noreste-Suroeste que una componente de desplazamiento pequeña.

- Al Sureste del Salar, el Graben de Tilocalar se encuentra limitado por un sistema de fallas normales, subverticales de rumbo general NS. Este sistema de fallas tiene una extensión de unos 20 kilómetros y limitan un graben con dirección Norte-Sur. Dicho graben está limitado al Este por fallas normales con buzamiento hacia el Oeste y salto vertical de unos 200 m. Las fallas que lo limitan por el Oeste tienen buzamiento hacia el Este y desplazamiento variable de 30 a 100 m.
- Al oriente de Peine, en la zona de cerros islas de la Precordillera de los Andes, destacan principalmente dos fallas inversas anteriores al depósito de la Ignimbrita Patao una de rumbo NE y manteo SE donde la Formación Cas se eleva ligeramente a los miembros inferior y medio de la Formación Peine y otra de rumbo NW y manteo al Este. Destacan también dos fallas inversas posteriores al depósito de la Ignimbrita, una con rumbo N-S y manteo al Oeste y otra que coincide con un lineamiento regional reconocido en el borde Oeste de la laguna Miscanti. Cerca de este dominio es también importante el Sistema de Fallas de Peine, con disposición subvertical que recorren el margen oriental del Salar (Jordan et al., 2007), que separan un bloque hundido al Oeste y un bloque elevado al Este, según se indica en la Figura 3-5.
- En la zona de la Cordillera de los Andes se reconocen numerosos fotolineamientos que probablemente influyan directamente en el volcanismo de la zona. El fotolineamiento de mayor importancia es aquel relacionado con la falla de la quebrada Nacimiento. Posee un rumbo N80°E de unos 120 km de extensión. Adyacente a este elemento se encuentran numerosos centros volcánicos y algunos lineamientos menores que se distinguen de rumbo NE. Ambos sistemas son cortados por otro sistema de similar extensión con rumbo N70°W que coincide con el eje mayor del cordón volcánico de Punta Negra al Este de Peine.

Se observan además otros lineamientos y fotolineamientos asociados a fallas jóvenes en la Precordillera y en la zona de Tilocalar.

Las estructuras geológicas más representativas, que se han descrito anteriormente, se muestran gráficamente tanto en el mapa de la Figura 3-2, como en los perfiles geológicos cuya traza superficial se representa en la Figura 3-14 y que vienen representados en el punto 3.4 Perfiles geológicos.

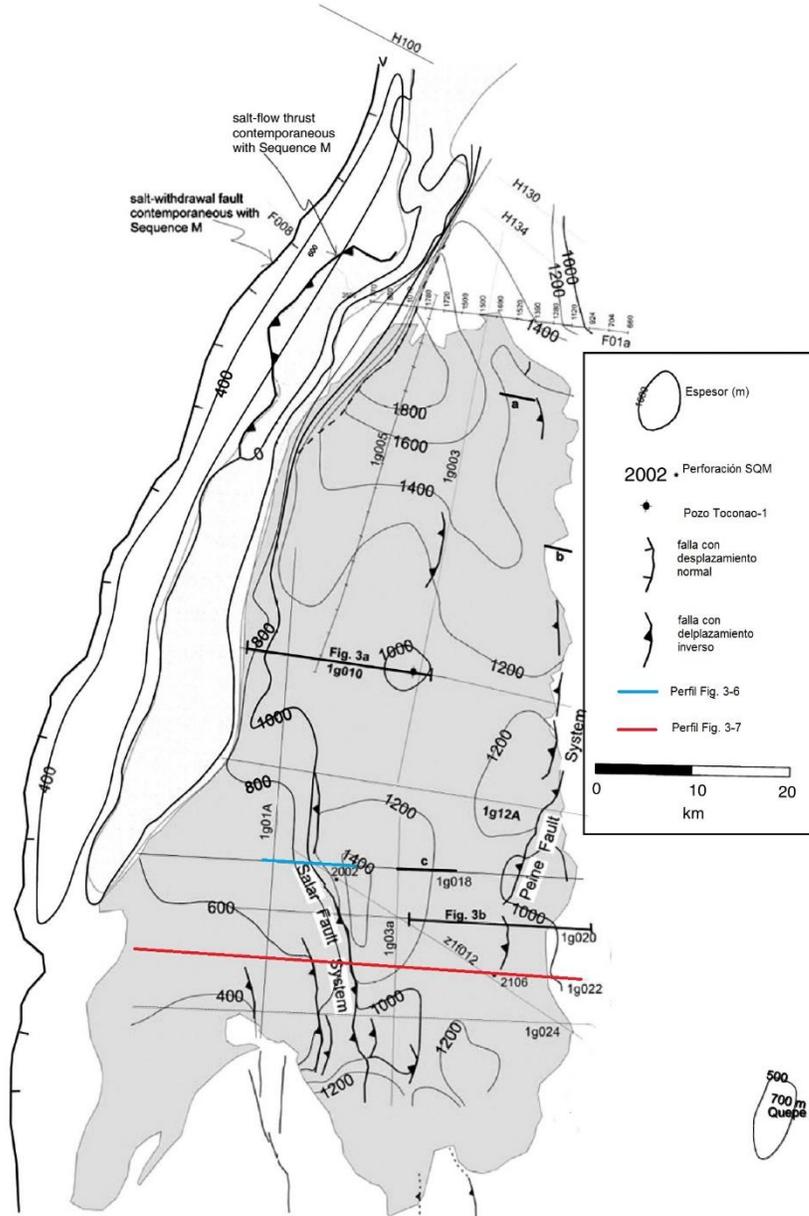
	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

### 3.1.3.2 Estructuras geológicas a escala del Salar de Atacama

Una estructura que no se menciona en la Hoja de Toconao, pero que se describe en el trabajo de Jordan et al., (2007), y que ha sido reconocida y estudiada también por otros autores (Lowestein et al., 2003, Fock 2009, Muñoz et al., 2002), es la denominada Sistema de la Falla del Salar (SFS) (ver posición en Figura 3-5). Según Jordan et al., 2007, este sistema está constituido por un conjunto de fallas inversas buzando hacia el Oeste que recorren la parte central del Salar de Norte a Sur, sin expresión sobre la superficie. Así, esta estructura separa dos sectores en el núcleo del Salar, el occidental del oriental. En este último se han medido espesores de sedimentación de halita mayores que en el occidental, por lo que se supone que podría representar el bloque hundido, tal y como se muestra en la Figura 3-6.

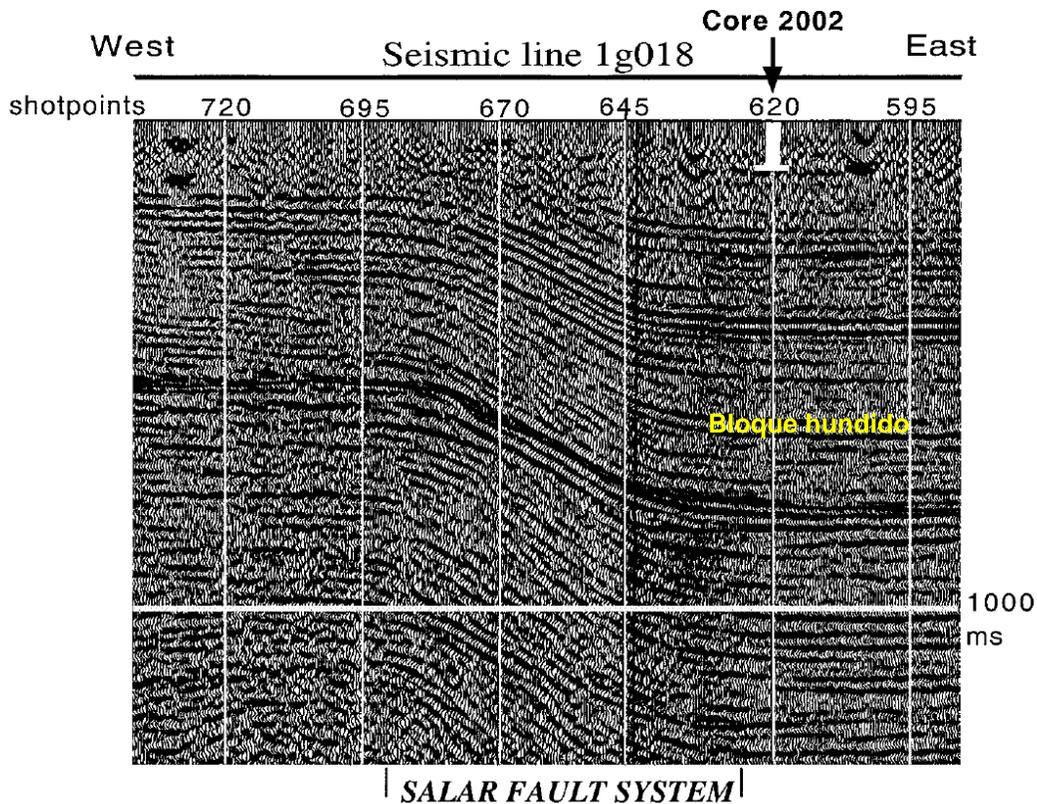
En la Figura 3-5 se muestran los espesores estimados de la Unidad M definida por Jordan et al., 2007, la cual está constituida principalmente por halita, con intercalaciones de materiales clásticos desde 480 a 620 metros de profundidad, observándose que el espesor de esta unidad puede ser de hasta 1400 m en el bloque oriental, justo en la zona central del Núcleo. Estos valores de profundidad se obtuvieron de la información derivada de estudios geofísicos realizados en el área y del estudio de perforaciones profundas realizadas en el Salar, como el Toconao-1, de 5.5 km de profundidad realizado por la ENAP.

**Figura 3-5 Ubicación del Sistema de Fallas del Salar e isopacas unidad de halita (Jordan et al., 2007)**



Fuente: Modificado Jordan et al., 2007

Figura 3-6 Perfil de sísmica de reflexión 1g018 en el centro del Salar del Atacama.

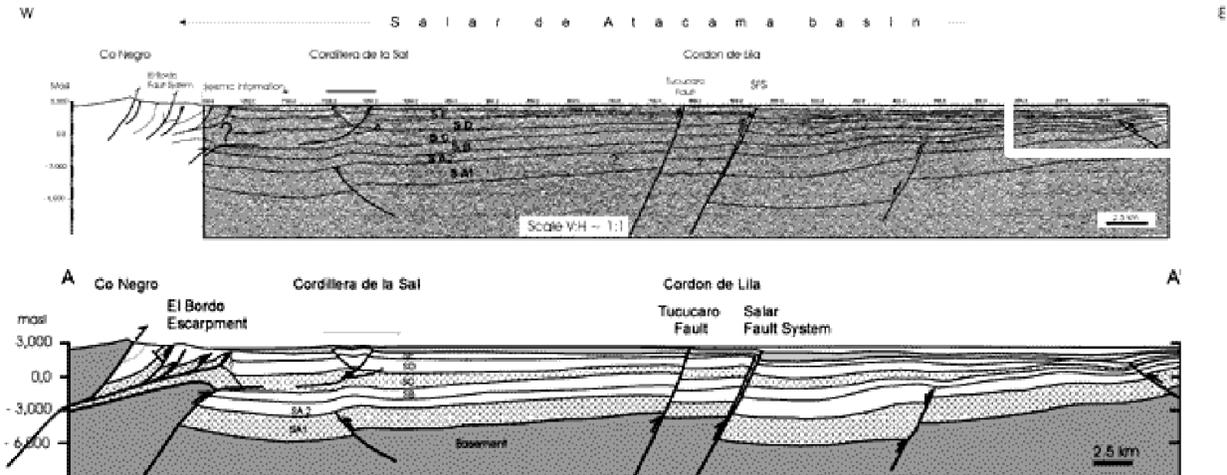


Fuente: Lowenstein et al., 2003

La Figura 3-6 muestra el perfil sísmico 1g018, cuyo trazado se ve en la Figura 3-5 que muestra como la falla separa dos bloques, uno hundido y uno elevado y cuya dimensión se puede conocer sabiendo que el pozo Core 2002 representado en la Figura 3-6 tiene una profundidad de 200 metros según Lowenstein et al., 2003.

En la Figura 3-7 se muestra el perfil sísmico de reflexión 1g022, representado en la Figura 3-5 y situado en el centro-sur del Salar con una orientación Este-Oeste. Esta figura contiene la interpretación realizada por Muñoz et al., 2002, y en la misma se pueden observar dos fallas situadas en el centro del Salar, denominadas en dicho trabajo Falla Tucúcaro, situada al oeste de la Península Chépica y el Sistema de Fallas del Salar, situado al Este de dicho relieve.

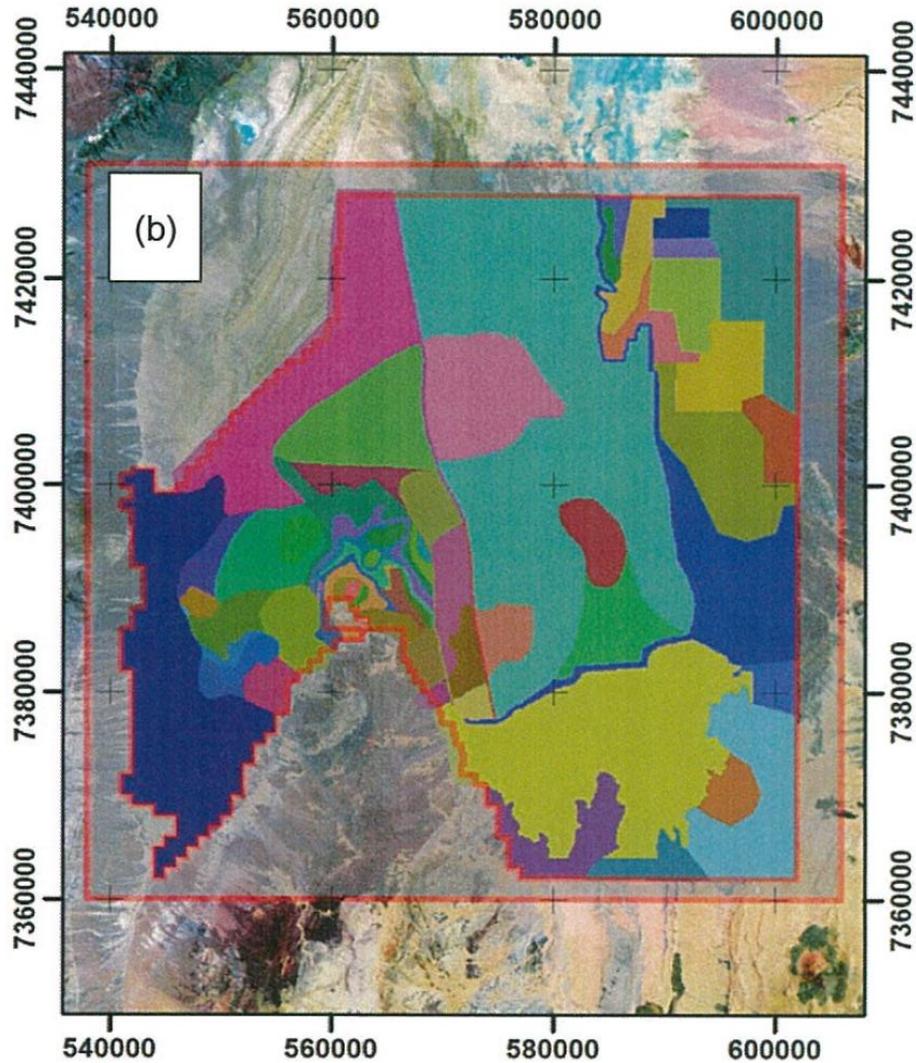
**Figura 3-7 Interpretación del perfil geofísico 1g022, mostrando la posición de las fallas del SFS**



Fuente: Muñoz et al., 2002

La expresión topográfica del Sistema de Fallas del Salar, compuesto por la Falla de Caballo (Oeste) y la Falla de Salar (Este) está ausente en la superficie del Salar de Atacama (Muñoz, 2002), según se observa en la Figura 3-7. Sin embargo, ambas fallas han sido tenidas en cuenta por SQM en la “Segunda actualización del modelo de flujo de agua subterránea en el Salar de Atacama” (Geohidrología, 2013a), (Figura 3-8), donde se puede observar que en la definición de zonas de permeabilidad propuesta la Falla de Salar está representada como una zona de distinta permeabilidad, adquiriendo de esta manera importancia en cuanto a su posible influencia en el comportamiento hidrodinámico de los niveles más superficiales del Núcleo. Por otra parte, la Falla de Caballo debido a su menor entidad, parece estar representada únicamente como un límite entre zonas de diferente permeabilidad, por lo que su importancia relativa es menor. Al respecto, sin embargo, cabe señalar que la información técnica que sustenta la interpretación del funcionamiento de estas fallas no ha sido publicada por SQM.

**Figura 3-8 Distribución de permeabilidades propuesta por SQM**



Fuente: Geohidrología, 2013

Teniendo en consideración lo anterior, en el modelo hidrogeológico que se desarrolla en el capítulo 10, se representa únicamente la Falla de Salar como un límite de zonas de permeabilidad, tal como se muestra en la Figura 10.7.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

## 3.2 Geofísica

### 3.2.1 Introducción

Las técnicas geofísicas permiten un conocimiento del terreno mediante la medición de las propiedades físicas de los materiales geológicos del subsuelo. Una de sus principales ventajas es que permiten reconocer grandes extensiones de terreno con relativa rapidez y precisión.

Los estudios geofísicos entregan información de las características eléctricas de los materiales que constituyen el subsuelo. Mediante la comparación de esta información eléctrica con la información geológica disponible en la zona, podemos asignar distintas características geológicas a cada intervalo de valores eléctricos. La comparación se realiza en puntos en los cuales se conoce la geología del subsuelo (Puntos de control) o se dispone de datos de piezometría y en los cuales se pueda realizar una buena interpretación, ya que no es posible realizar una buena interpretación en todos los puntos, ya que la extremadamente baja resistividad de la salmuera enmascara las características de los materiales que la contienen. Después de esto se realiza una correlación entre los puntos de control seleccionados y los perfiles geológicos, obteniendo una disposición de los materiales que se encuentran bajo la superficie.

En el Salar de Atacama, debido a su extensión, estas técnicas han sido tradicionalmente útiles para reconocer estructuras geológicas (fallas), contactos y espesor de unidades geológicas, profundidad del nivel freático, salinidad de las aguas, posición de la interfase salina, porosidad, etc.

En el marco de este EIA, Rockwood ha realizado diversas campañas de geofísica en la zona Sur del Salar de Atacama. La técnica utilizada en estos trabajos han sido los métodos electromagnéticos, TEM y NanoTEM, que permiten conocer la variación de la resistividad eléctrica del terreno; parámetro relacionado con la salinidad de las aguas, la porosidad y la composición mineralógica del terreno. También se han consultado otros estudios geofísicos realizados por terceros.

En la siguiente tabla se enumeran los trabajos realizados en el marco de este EIA y los realizados por terceros que fueron consultados y tenidos en cuenta.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

**Tabla 3-3 Trabajos geofísicos revisados del Salar de Atacama**

Empresa	Fecha	Técnica estudio	Area de estudio
<b>NX-1</b>	jul-04	TEM	Margen oriental des Salar de Atacama (entre Peine y Toconao)
	dic-04	TEM	
	abr-06	TEM	Borde oeste del Salar de Atacama
	jun-07	TEM	
<b>Rockwood Lithium</b>	mar-12	TEM y NanoTEM	Parte sur del Salar de Atacama (Norte de La Punta-La Brava)
	mar-13	TEM y NanoTEM	Parte sur del Salar de Atacama (Norte de La Punta-La Brava hasta Tilopozo)
	abr-13	TEM y NanoTEM	Parte sur del Salar de Atacama (Area de Salada-Saladita)
	ago-14	TEM	Borde sur del Salar de Atacama
<b>SQM</b>	ene-00	TEM	Borde Este del Salar de Atacama
<b>ENAP</b>	Años 80		Utilizada por Jordan en su estudio de 2006

Fuente: Elaboración propia

### 3.2.2 Geofísica TEM y NanoTEM

Mediante estas técnicas geofísicas es posible reconocer las unidades geoelectricas del subsuelo, que permiten definir, junto a otra información complementaria, tanto su naturaleza y origen como su geometría. Las propiedades geoelectricas del terreno dependen de la mineralogía (litología) y microestructura (porosidad, granulometría, fracturamiento) de las rocas, así como de la salinidad y grado de saturación del fluido contenido en las mismas, permitiendo determinar la posición de la interfase entre la salmuera y el agua dulce-salobre que existe debajo las zonas marginales del Salar, en sus bordes Sur y Este.

En general, los métodos transiente electromagnético (TEM) y su NanoTEM permiten alcanzar una profundidad de medición del orden de los 300 m y 100 m, respectivamente, pero con un mayor detalle de las unidades geoelectricas en el caso del NanoTEM. De acuerdo con las resistividades del lugar de estudio, la información válida se estima de 150 m para el TEM y 80 m para el NanoTEM en la zona del núcleo del Salar y la Zona Marginal, mientras que en el sector Sur pueden alcanzar profundidades de medición de hasta 400 m.

#### 3.2.2.1 Metodología

Estos métodos consisten en la aplicación de una corriente eléctrica variable a una espira de cable aislado desplegado con una forma usualmente cuadrada sobre el terreno (Fotografía 3-1). Esta corriente genera un campo magnético que induce corrientes de conducción en el subsuelo. Luego se interrumpe la corriente y se mide el campo magnético generado por las corrientes de conducción, el cual posee una respuesta transiente, es decir, dependiente del tiempo. Este transiente magnético se mide como voltaje inducido en

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

un *loop* receptor o bobina receptora. En este caso, la modalidad NanoTEM tiene la particularidad de medir los tiempos muy cercanos, lo que permite tener información de detalle de la resistividad en niveles someros.

**Fotografía 3-1 Equipo de prospección geofísica**



Fuente: Elaboración Propia

Las corrientes inducidas en el subsuelo se distribuyen en profundidad de acuerdo al mecanismo físico de difusión, y su comportamiento depende de las resistividades, tamaños y formas de las estructuras geoelectricas subsuperficiales. El análisis numérico de la curva transiente, o de decaimiento en el tiempo del voltaje registrado, permite inferir información cuantitativa acerca de los parámetros geoelectricos del subsuelo.

Del procesamiento de los datos obtenidos en terreno, se identifican secciones unidimensionales del terreno en las que se distinguen unidades con diferentes valores de resistividad. Estos diferentes valores de resistividad se combinan con la información geológica disponible de la zona y que fue obtenida directamente de las muestras de perforación, así como de las observaciones realizadas directamente en terreno, de manera que a cada una de esas “unidades geoelectricas” se le pueda correlacionar con un tipo de materiales con características homogéneas. Con este cruce de informaciones se pueden establecer rasgos geológicos concretos. Para la interpretación de la información obtenida se recurrió, como fuente de información física directa, fundamentalmente a las perforaciones realizadas en el marco de este EIA, así como a la información geológica disponible, como perforaciones de terceros o información bibliográfica.

La precisión de estos métodos de prospección geofísicos está influenciada por diversos factores, tales como la configuración del método y la resistividad de los materiales a prospectar, entre otros. La precisión entregada se considera suficiente para completar los objetivos de este estudio, como son obtener

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

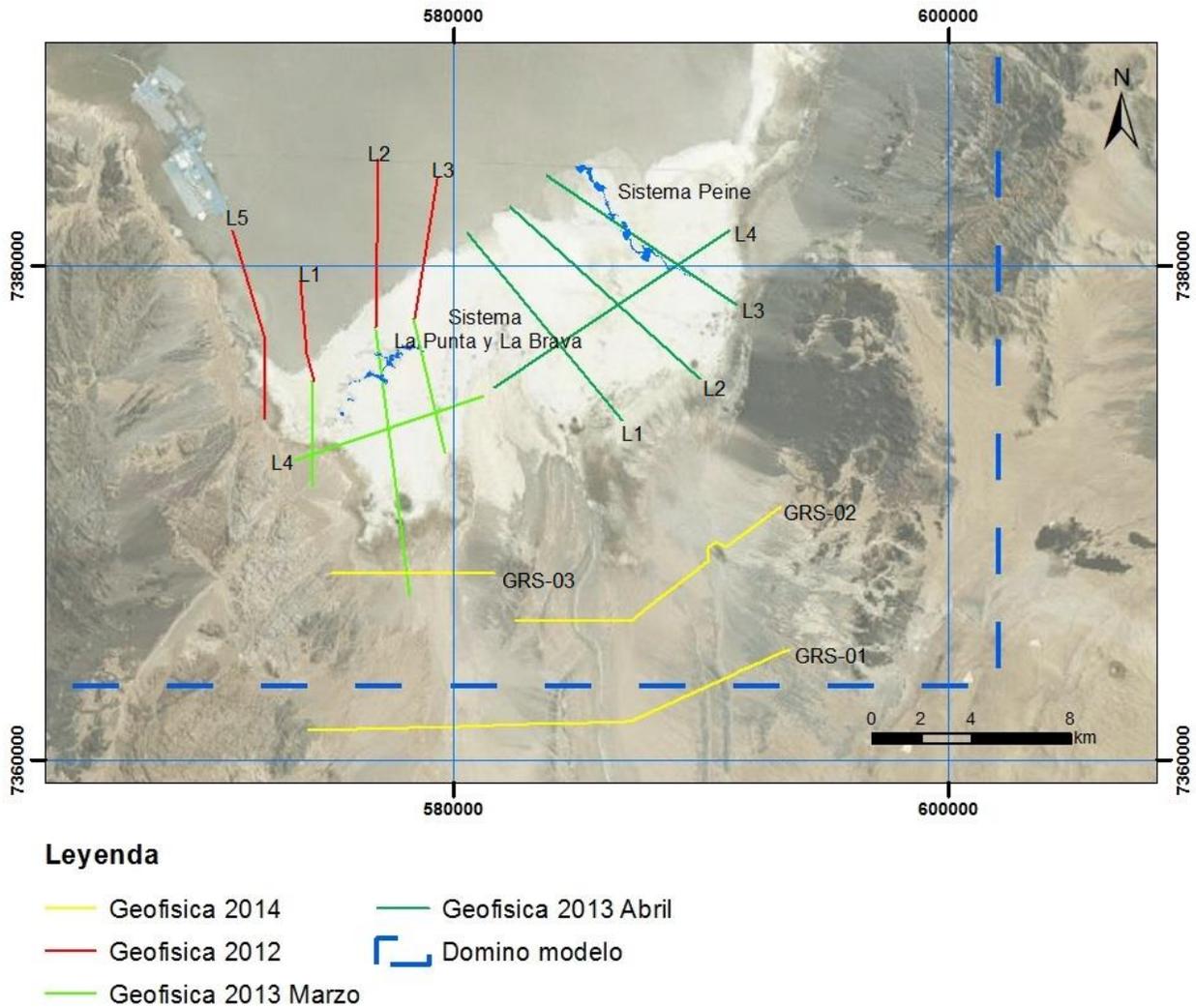
información que complementa espacialmente a la generada con los métodos directos (perforaciones), por ejemplo la posición de la interfase salina en el sector, la presencia de estratos de diferente porosidad, la presencia de fallas, etc.

### 3.2.2.2 Campañas realizadas por Rockwood en el marco del EIA

Desde el año 2012, Rockwood ha realizado cuatro campañas de terreno de medición de perfiles geofísicos. Estos trabajos se centran mayoritariamente al Sur del Salar de Atacama en tres sectores distintos, según se indica en la Figura 3-9; el primero corresponde al lugar donde se ubican las lagunas La Punta y La Brava, el segundo, donde se ubican las lagunas Salada, Saladita e Interna, el tercero en el sector de Tilopozo y Tilomonte y el cuarto atravesando de Este a Oeste los corredores de Tilopozo y Tilomonte.

Con los trabajos de prospección geofísicas realizados en estas campañas ha sido posible la identificación de los rasgos geológicos e hidrogeológicos principales (litología, interfase salina, fallas, etc.) en las cercanías de los sistemas lagunares más cercanos a la explotación de Rockwood, que son el sistema Peine y el sistema La Punta-La Brava.

**Figura 3-9 Ubicación perfiles geofísicos realizados en el marco de este EIA (años 2012, 2013 y 2014)**



Fuente: Elaboración Propia

• **Campaña 2012.**

Los trabajos realizados en Marzo de 2012 consistieron en la realización de cuatro perfiles geofísicos, utilizando conjuntamente la técnica TEM y la NanoTEM (22,2 km de TEM y 24,6 km de NanoTem), con puntos de medición dispuestos cada 200 m en modalidad NanoTEM y cada 500 m en modalidad TEM. Estos perfiles tienen una disposición aproximadamente Norte-Sur y se encuentran atravesando la zona de interfase en el sector de las lagunas La Punta y La Brava.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

- **Campañas de 2013.**

En el año 2013 se realizaron dos campañas de prospección geofísica. La primera de ellas realizada durante el mes de febrero, consistió en 3 perfiles de dirección aproximada Norte-Sur y realizados como continuación de los perfiles hechos en el año 2012, y un perfil con dirección Este-Oeste. Los puntos de medición fueron dispuestos cada 100 m en la modalidad NanoTEM y cada 300 para la modalidad TEM. Los trabajos realizados cubrieron el área entre Tilopozo y las lagunas La Punta y La Brava, con 28,5 km de TEM y 29,2 km de NanoTEM.

La segunda campaña del año 2013 se realizó durante el mes de abril, y consistió en la ejecución de 3 perfiles aproximadamente Noroeste-Sureste y un cuarto perfil con dirección Suroeste-Noreste. Estos trabajos cubrieron principalmente el área de las lagunas Salada, Saladita e Interna, con un total de 40,4 km de TEM y 40,6 km de NanoTEM. Los puntos de medición en la modalidad NanoTEM se disponen cada 100 y 200 m, y en la modalidad TEM cada 300 y 500 m.

- **Campaña de 2014.**

Se realizaron 3 perfiles geofísicos, en el sector de los callejones de Tilopozo y Tilomonte. La finalidad fue caracterizar la geometría de los acuíferos, y su basamento, y reconocer la existencia de interfase salina en ese sector. La dirección aproximada de los perfiles fue Suroeste-Noreste, y se utilizó la metodología TEM con una separación aproximada de 300 m entre los puntos de medición, abarcando total de 39,5 km.

Para evitar confusión entre los nombres de los perfiles de las diferentes campañas, al hacer la interpretación de los mismos se habla del perfil seguido de la zona objeto de estudio en la campaña.

La ubicación y resultados de los perfiles geofísicos TEM obtenidos en cada campaña, junto con la definición de unidades geoelectricas establecidas por la empresa especialista que realizó los trabajos (Geodatos) se muestran en el Apéndice B (Geofísica), de este Anexo.

### 3.2.2.3 Interpretación de resultados geofísicos TEM

Para la interpretación de los perfiles geofísicos obtenidos se ha considerado que, efectivamente, la respuesta al campo electromagnético de cada uno de los materiales está definida principalmente por tres parámetros físicos: la porosidad saturada de la roca (porosidad, fracturas, etc.), la conductividad eléctrica del fluido y la naturaleza de la roca (composición química y mineralógica). De esta manera, conociendo o estimando dos de estos parámetros, ha sido posible determinar las variaciones en el parámetro desconocido.

Dado que la geofísica es una herramienta para la caracterización del subsuelo, la cual siempre está sujeta a diferentes interpretaciones, han debido considerarse los resultados de otras fuentes de información geológica, tales como la obtenida de los sondeos, la geología local, los datos de calidad del agua, los perfiles de conductividad eléctrica, etc., para correlacionar y poder llegar a hacer una interpretación lo más

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

exacta y real posible. Todo este proceso de cruce entre información geofísica y geológica constituye el proceso de interpretación. Para la interpretación de la información geológica obtenida en los estudios realizados en el marco de este EIA se recurrió a la información obtenida de las perforaciones realizadas en el marco del mismo y de su monitoreo, así como de otras realizadas por terceros que estuvieran disponibles. Los elementos utilizados en dicha interpretación se muestran en el Apéndice B de Geofísica y estos elementos son también utilizados para la elaboración de los perfiles geológicos que se muestran en el punto 3.4 Perfiles Geológicos, de este capítulo.

De esta manera, en términos generales los perfiles geofísicos TEM se han utilizado para interpretar los principales rasgos geológicos e hidrogeológicos de la zona y a continuación se muestra un análisis de los mismos sectorizado según la división hecha de las diferentes unidades hidrogeológicas descritas en el punto 8.2. Unidades hidrogeológicas y parámetros hidráulicos.

**En el sector del núcleo del Salar (perfiles L1, L2, L3, L5 de La Punta-La Brava en su sector Norte):**

En este sector, donde existe una litología homogénea y conocida, la halita que la constituye puede dividirse en dos zonas identificables, la primera y más somera está formada por halita seca o no saturada, y la segunda compuesta por halita saturada con salmuera.

La zona de halita seca se puede diferenciar claramente en la parte de los perfiles L1, L2 y L3 TEM realizados en el sector La Punta-La Brava que discurre sobre el núcleo del Salar, los cuales vienen representados en las Fig. 2-2 a 2-7 del Apéndice B. Geofísica, donde se muestra la correspondencia entre los materiales descritos en las perforaciones y los valores de resistividad registrados con la investigación geofísica.

En las condiciones actuales la zona no saturada de halita se encuentra entre 1,0 y 1,5 m. de profundidad en esta zona del Núcleo. Este espesor tan pequeño hace que no sea fácilmente identificable por medios geofísicos sobre toda la superficie del Núcleo. Conforme a ello, sus límites no se representan de manera continua sobre los perfiles geofísicos, si no que se señalan como referencia los lugares donde claramente se observan resistividades propias de esta zona. Para verificar el espesor de la zona no saturada, en el Apéndice G se presentan los registros del nivel freático de la red de monitoreo existente en la zona.

En la segunda zona, las variaciones en la resistividad responden a cambios en la porosidad total y en menor medida en el contenido en limos y arcillas, en atención a que la conductividad de la salmuera no presenta variaciones significativas. Esto permite diferenciar, dos subunidades con distinta porosidad en la zona del núcleo del Salar: una superior de espesor variable (entre 15 y 45 m aproximadamente), de mayor porosidad, la que queda representada en el perfil geofísico como un nivel de menor resistividad y otra inferior de mayor resistividad y que corresponde a material de menor porosidad. Esto puede confirmarse con las descripciones de las muestras de perforación del, PN-05, y P-02, que se incluyen en el Apéndice C. Perforaciones.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

En los perfiles L1, L2, L3 y L5 del sector de La Punta-La Brava y en el L2 del Sistema Peine, en las proximidades de la zona donde la interfase salina aflora en superficie, al Norte de la misma, se ve que disminuye la resistividad en los materiales que forman el acuífero de salmuera, esta variación en la resistividad se puede atribuir al mayor contenido en limos y arcillas y a un incremento de la porosidad, que se confirma con las muestras obtenidas de la perforación de los puntos MPS-C y MPS-A (Figura 3-13), cuya descripción detallada se encuentra en el Apéndice C. antes mencionado. En el Apéndice B. Geofísica, se encuentran las imágenes donde aparece la ubicación de los puntos mencionados (puntos de control) y su relación con la disposición de los perfiles geofísicos.

En el perfil geofísico L2 del sector La Punta-La Brava, se observa un cambio lateral de resistividad, entre las estaciones 16 y 85 del perfil TEM, que puede ser interpretado como una falla, que pone en contacto materiales con diferente porosidad a un lado y a otro de la estructura. Esta falla se representa también en el perfil geológico D-D', en la Figura 3-18.

#### **En la Zona Marginal (perfiles L1, L2 y L3 de Sistema Peine y L1, L2 de La Punta-La Brava):**

Los datos obtenidos de las prospecciones geofísicas permiten situar con bastante precisión la ubicación de la interfase entre la salmuera y el agua salobre-dulce. En zonas sin variación litológica, la masa de salmuera queda identificada como un nivel de muy baja resistividad por debajo de otro de resistividad media-alta, que correspondería al agua dulce. Este contraste de resistividad nos da la posición de la interfase, que puede verse en los perfiles de conductividad realizados en las perforaciones representadas (MP-03, MP-02 y MP-04).

Los perfiles L1, L2, L4 y L5 del sector La Punta-La Brava, terminan en uno de sus extremos en los depósitos de abanico aluvial ubicados al pie del Cordón de Lila, estos depósitos aluviales se ven en los perfiles TEM como niveles de muy alta resistividad en los márgenes Sur (L1 y L5) y Oeste (L4). En el Apéndice B, se puede ver la ubicación superficial de los perfiles realizados.

#### **En el margen Sur del Salar en Tilopozo y Tilomonte (perfiles GRS-01, GRS-02 y GRS-03):**

En el margen Sur del Salar, la geofísica fue una herramienta de gran utilidad para la identificación de elementos estructurales, como las fallas normales que forman el graben de Tilocalar.

En la parte más profunda de los perfiles también ha sido posible identificar un nivel de resistividad muy baja, que es atribuido a salmuera, que debido a su mayor densidad se sitúa bajo los niveles de agua dulce superiores y cuya geometría parece delimitada por la existencias de fallas.

A partir de las secciones realizadas, ha sido posible elaborar planos de isoprofundidad que muestran la posición de la interfase salina en los sistemas lagunares de La Punta y La Brava, y de Peine. Estos planos

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

se muestran también el capítulo 8.4 Interfase Salina, en el cual se realiza un estudio detallado de la posición de la interfase y de su evolución.

En el perfil GRS-03, cuya ubicación se representa en la Figura 3-9, es posible realizar una buena correlación entre la profundidad a la que se observa la interfase obtenida mediante datos geofísicos y la profundidad de la misma observada directamente en el pozo TP-1, En los otros perfiles, en cambio, se obtiene una superficie de interfase menos precisa en razón que en el área no es posible contar con datos físicos directos que permitan confirmar con total certeza cuál es la superficie real de la interfase.

### 3.2.3 Otros perfiles TEM revisados

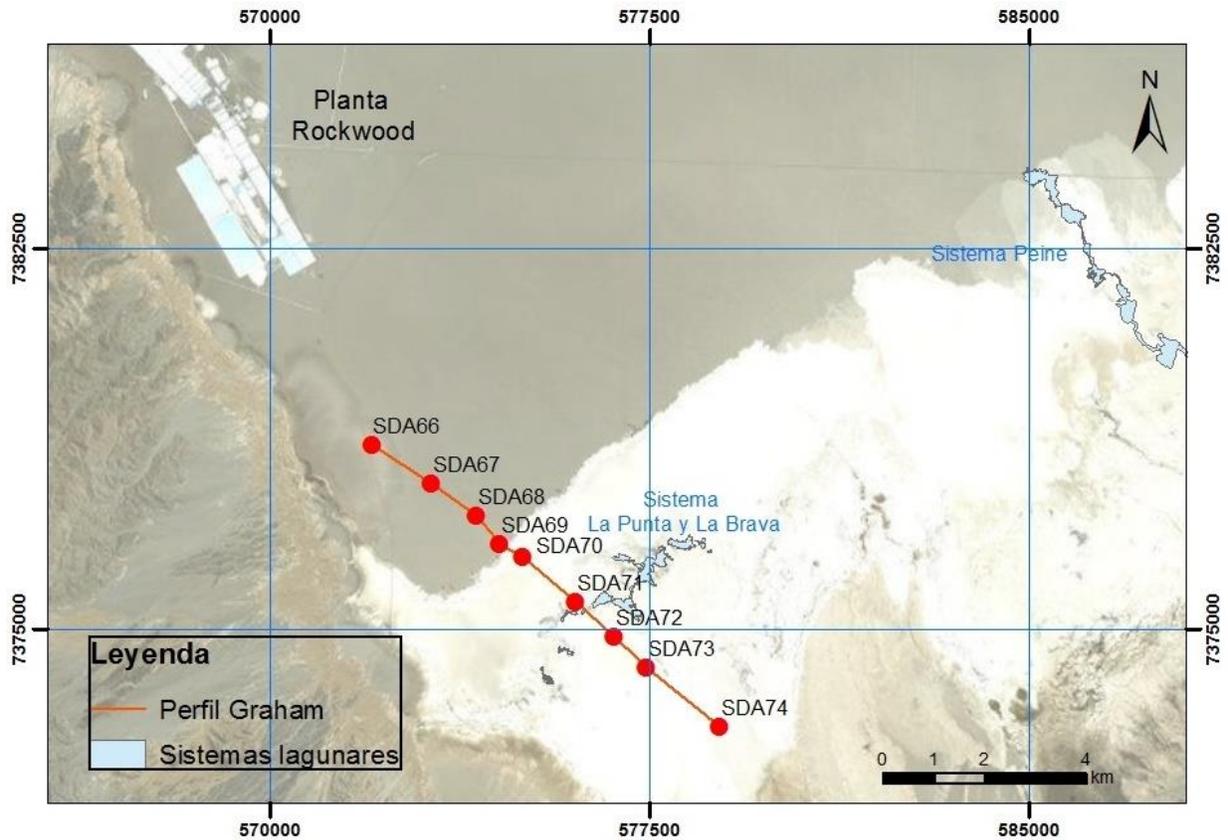
Además de las campañas realizadas por el titular en el marco de este EIA, también se dispone de información de un estudio interno de Rockwood realizado en el año 2012 (Graham et al. 2012), que permite caracterizar hidrogeológicamente el sector de la Laguna La Punta-La Brava.

El objetivo primario de este estudio fue investigar la distribución de los acuíferos subsuperficiales de salmuera del Núcleo y determinar la estructura de la interfase de agua dulce en Sur-Este.

Las herramientas seleccionadas para realizar este trabajo corresponden a técnicas de Tomografía Electromagnética, llamadas Magnetotelúricas (MT), Audiomagnetotelúricas (AMT) y el Transiente Electromagnético (TEM). Las medidas MT y AMT son técnicas electromagnéticas pasivas, que se basan en la medida a diferentes frecuencias de la variación natural en el tiempo de los campos eléctrico y magnético.

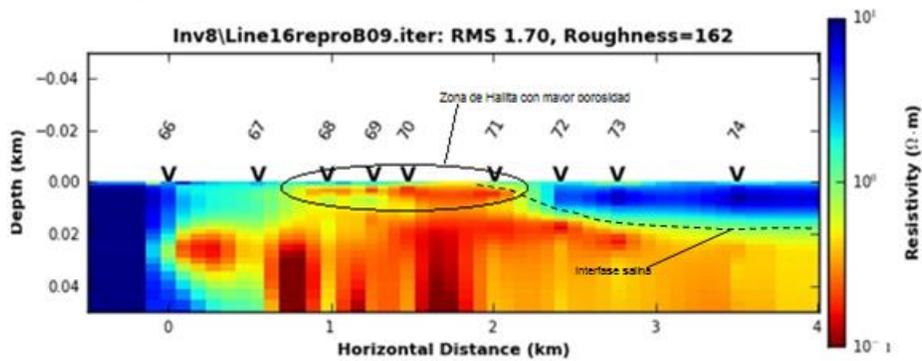
En la Figura 3-10 y Figura 3-11, se puede observar uno de los perfiles geofísicos (Line 16) realizados en el marco de este estudio. Este perfil atraviesa la zona de las lagunas de La Punta y La Brava en dirección Sureste-Noroeste y se ha llevado a cabo con una combinación de método MT y AMT.

**Figura 3-10 Traza superficial del perfil geofísico (Line 16), de Graham et al (2012)**



Fuente: Elaboración Propia

**Figura 3-11 Perfil MT/AMT Línea 16 (Graham et. al, 2012)**



Fuente: Graham et. al, 2012

En esta zona, la interfase salina delimita un acuífero salobre en la parte superior, con un espesor máximo del orden de 20 m, que se puede observar al Sur-Este, a la derecha de la imagen en la Figura 3-11. La posición de la interfase en superficie se sitúa entre los puntos SDA71 y SDA72. Este dato es consistente

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

con las medidas realizadas por Rockwood en el marco de las campañas específicas realizadas para este EIA.

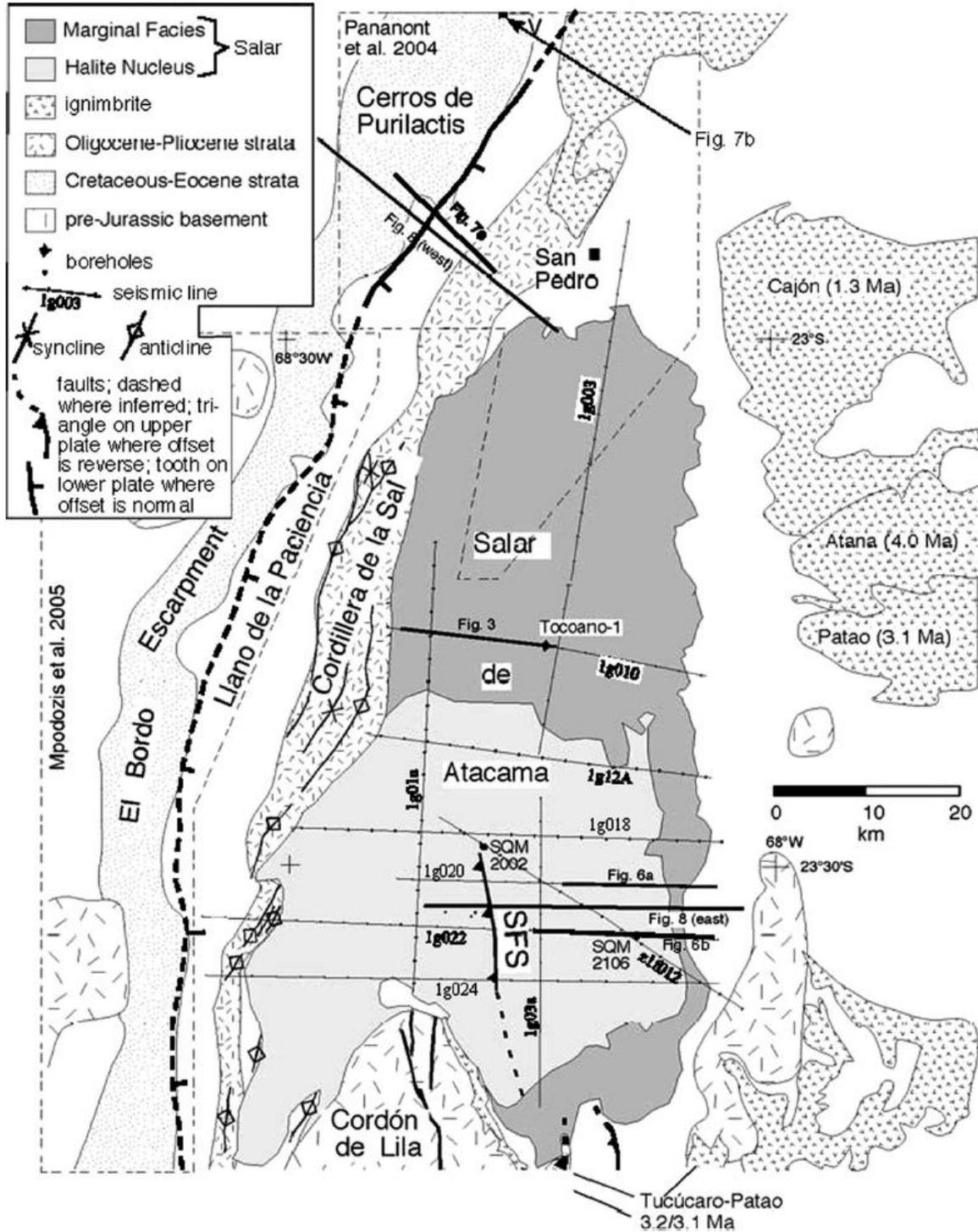
Según el trabajo de Graham et al. (2012), (el agua dulce entra en el Salar desde el área de las lagunas, y flota sobre la salmuera más densa, formando una fina lente de agua salobre. Este flujo de agua salobre disuelve la halita del Salar próxima a las lagunas, aumentando la porosidad y produciendo un importante volumen de salmuera en esa zona (Figura 3-11). Estas conclusiones son coherentes con el funcionamiento hidrogeológico descrito para el sistema La Punta-La Brava en el Apéndice I. Funcionamiento hidrogeológico de los sistemas lagunares: Peine, La Punta-La Brava, Soncor y Aguas Quelana.

### 3.2.4 Sísmica de Reflexión de ENAP

Junto con los trabajos realizados en el marco de este EIA, se han revisado además los antecedentes de los trabajos de geofísica realizados por ENAP en los años 80, mediante la técnica de sísmica de reflexión. Sobre estos trabajos, diversos autores han realizado interpretaciones de los resultados (Lowestein et al., 2003, Jordan et al., 2007, Fock 2009), infiriendo por ejemplo la posición de fallas, del basamento geológico y otros rasgos estructurales. La posición de estos perfiles se muestra en la Figura 3-12.

Entre los resultados más interesantes puede señalarse la identificación de la denominada Falla del Salar, o Salar Fault System (SFS), que los perfiles de sísmica de reflexión revelan como un conjunto de fallas mayores, con dirección N-S a través del Salar de Atacama y cuya interpretación estructural fue desarrollada en el punto 3.1.3. Marco estructural.

**Figura 3-12 Mapa del Salar De Atacama mostrando la ubicación de los perfiles geofísicos de sísmica de reflexión realizados por la ENAP**



Fuente: Jordan et al., 2007

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

### 3.3 Perforaciones

Con el fin de obtener una información detallada de la estratigrafía y calidad del agua subterránea del área de estudio, así como medir parámetros hidráulicos de los acuíferos de agua dulce/salobre, Rockwood realizó, en el marco de este EIA, un total de 59 perforaciones (34 piezómetros someros, 13 piezómetros, 4 pozos, 8 multipiezómetros), que permitieron obtener información directa de la geometría y composición del subsuelo en la zona Sur del Salar y cuya descripción detallada se recoge en:

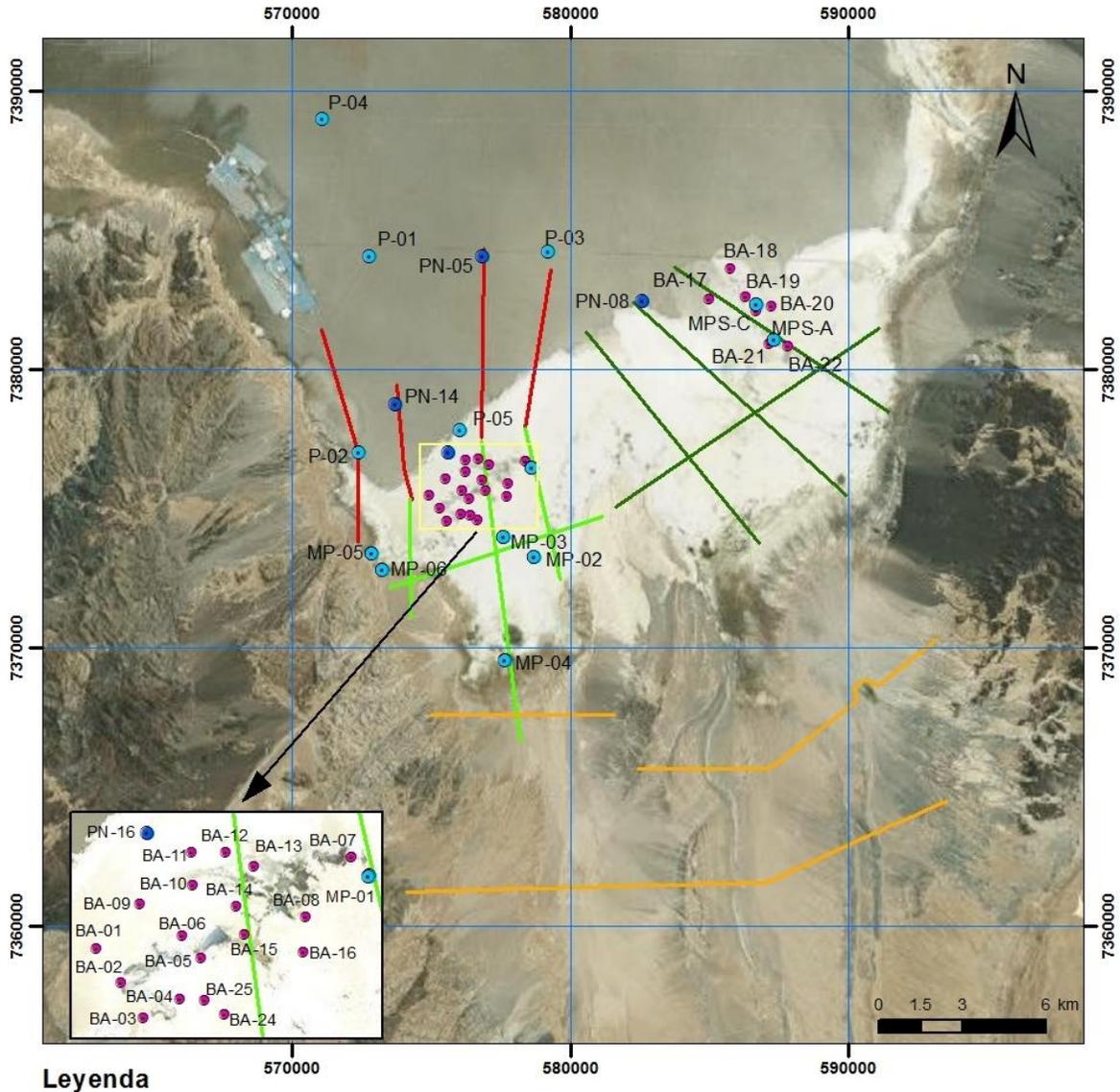
- Apéndice C. Perforaciones: Se encuentra la información estratigráfica
- Capítulo 8. Hidrogeología: Se encuentra la información sobre parámetros hidráulicos
- Capítulo 7. Hidroquímica: Se encuentra información sobre calidad de aguas.

#### 3.3.1 Campañas de perforación realizadas en el marco del EIA.

En el marco de este EIA, se realizaron dos campañas de perforación en el marco del EIA, la primera durante el año 2013 y la segunda durante el año 2014. Con ocasión de estas campañas se realizaron diferentes tipos de perforaciones (piezómetros someros, piezómetros, pozos y multipiezómetros), las cuales se describen detalladamente en el Apéndice C: Perforaciones.

La ubicación de las perforaciones realizadas, así como el tipo de perforación, se representa en la Figura 3-13, donde también se muestran los perfiles de prospección geofísica realizados en el marco de este EIA.

**Figura 3-13 Ubicación de las perforaciones realizadas durante 2013 y 2014**



**Leyenda**

- |                      |                                  |
|----------------------|----------------------------------|
| <b>PERFORACIONES</b> | — Perfiles Geofísicos 2014       |
| ● Piezómetro somero  | — Perfiles Geofísicos Abril 2013 |
| ● Piezómetro         | — Perfiles Geofísicos Marzo 2013 |
| ● Pozo               | — Perfiles Geofísicos 2012       |

Fuente: Elaboración propia.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

### 3.3.2 Resultados obtenidos

El análisis de esta información permite ver que realmente se confirma la variabilidad estratigráfica del terreno, en función de cada zona del Salar. A continuación se muestra un resumen de la información obtenida de las perforaciones, el detalle de las mismas viene explicado en el Apéndice C. Perforaciones, mientras que los datos de calidad del agua se desarrollan en el capítulo 7. Hidroquímica.

En el punto MP-04, que es el situado más al Sur, y en la zona de Tilopozo, se encuentran casi 115 m de ignimbrita (Ignimbrita de Tucúcaro), bajo la cual se alcanzan a cortar niveles arenosos, probablemente pertenecientes a la Formación Tambores.

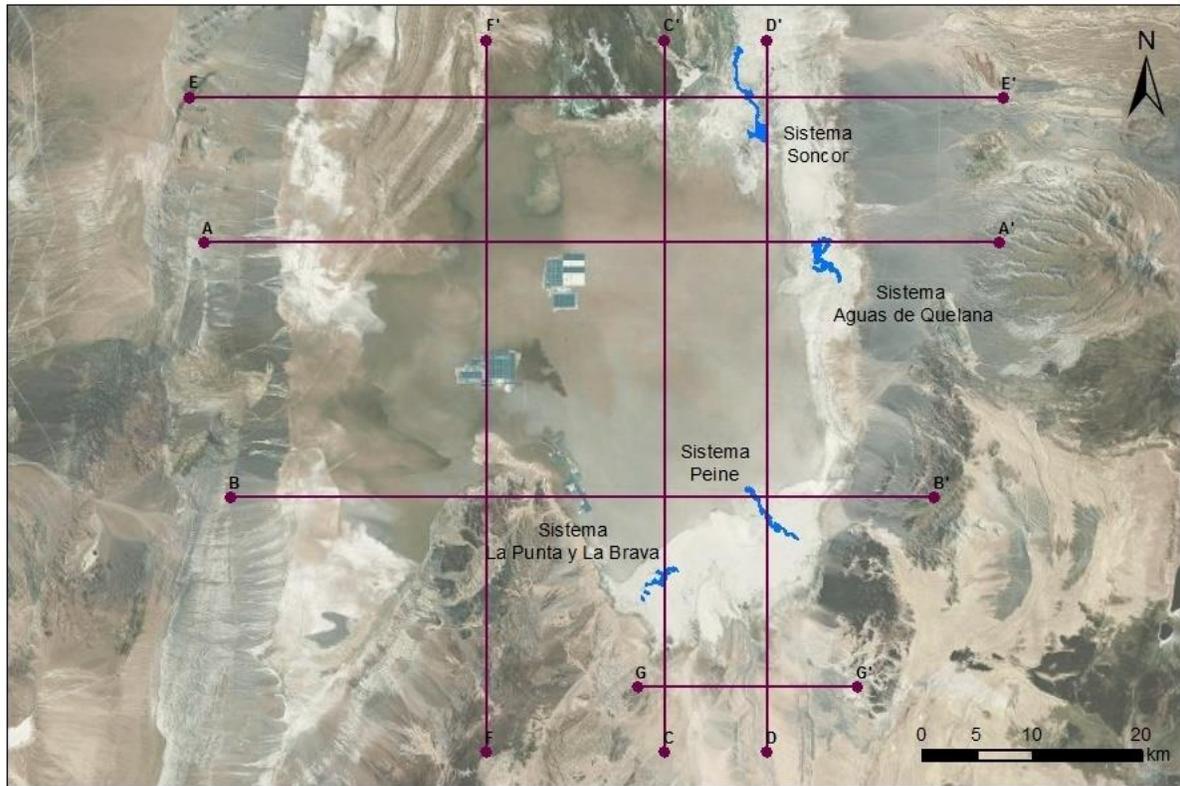
Los siguientes puntos perforados hacia el Norte, se encuentran cerca del límite entre la zona de costra de cloruros, que ocupa todo el núcleo del Salar, y las costras de transición periféricas a éste son: MP-01, MP-02, MP-03, MPS-A, MPS-C y P-05. Los materiales perforados son sobre todo intercalaciones de limos grises con materiales carbonatados y en ocasiones niveles de ignimbrita de escasa potencia. Mientras más cerca se encuentra la perforación de la costra de cloruros, más aumenta el contenido en halita cristalina, lo cual se evidencia en los puntos ubicados más al Norte MPS-C, MPS-A y P-05.

Hacia el Norte se encuentra la costra de cloruros, donde se realizaron las perforaciones P-02, P-03, P-04, PN-14, PN-08 y PN-05. En los materiales perforados se identificó halita cristalina, con algunas intercalaciones de yesos y algunos niveles carbonatados. En el PN-04 también se registran arcillas marrones casi a 60 m de profundidad, que pueden ser evidencia de alguna avenida de material detrítico a la cuenca.

### 3.4 Perfiles geológicos

Con la finalidad de obtener una mejor comprensión y visión tridimensional de la geometría de las diferentes unidades geológicas y estructuras que se encuentran en el área de estudio, se realizaron siete perfiles geológicos abarcando la totalidad del área, los que se pueden observar en la Figura 3-15, Figura 3-16, Figura 3-17, Figura 3-18, Figura 3-19, Figura 3-20 y Figura 3-21. Cuatro de ellos presentan dirección Este-Oeste y tres dirección Norte-Sur, y su ubicación geográfica se representa en la Figura 3-14.

**Figura 3-14 Mapa situación de los perfiles geológicas**



**Leyenda**

- Perfiles Geológicos
- Lagunas

Fuente: Elaboración propia

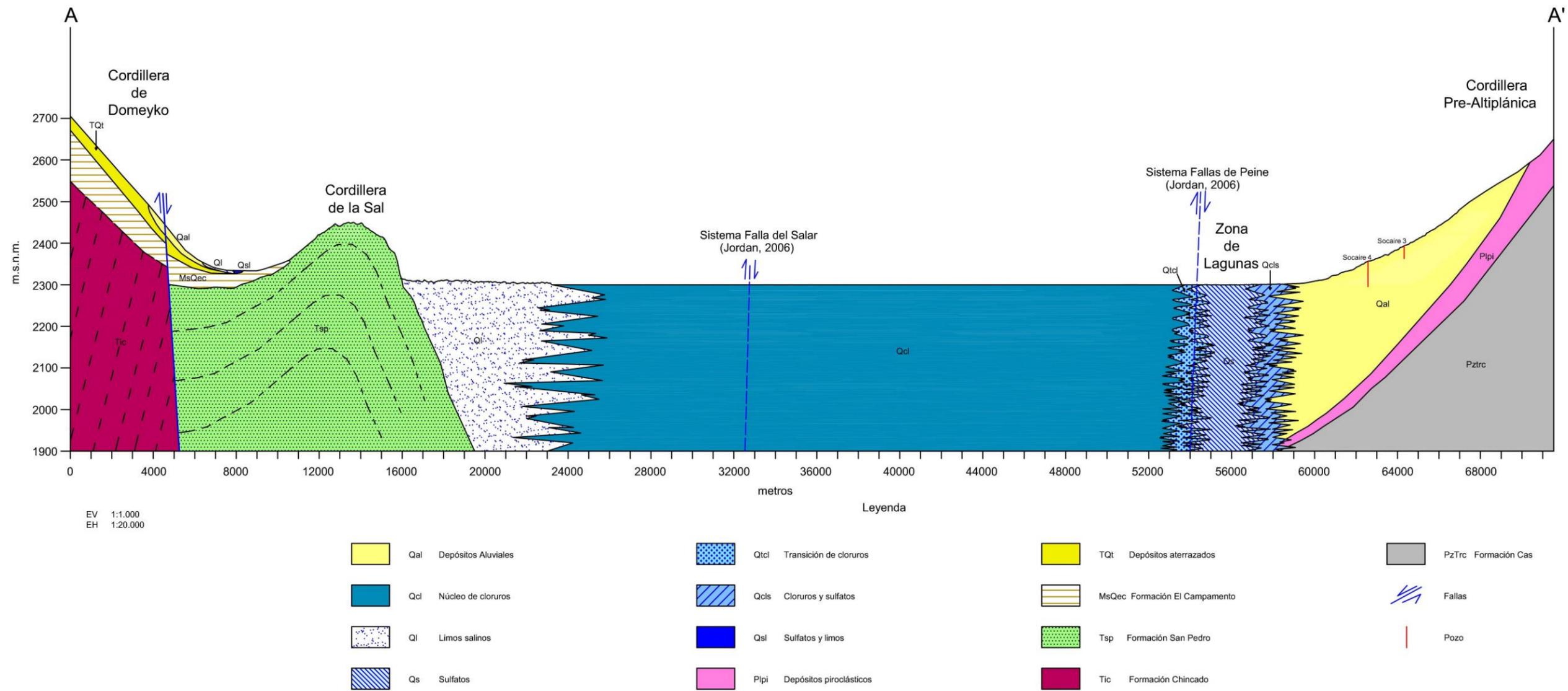
Para la elaboración de los perfiles geológicos, se tuvo en cuenta la siguiente información:

- Cartografía geológica anteriormente presentada (Figura 3-2 y Figura 3-3), basada en los trabajos de Ramírez y Gardeweg. (1982) y Moraga et al. (1974).
- Perfiles geofísicos realizados en el marco de este EIA, presentados en el Apéndice B. Geofísica, y descritos en el punto 3.2 Geofísica.
- Perfiles estratigráficos de las perforaciones realizadas en el marco de este EIA y que se presentan en el Apéndice C. Perforaciones.
- Reconocimiento de los profesionales en terreno e interpretación de imágenes aéreas (Google Earth).
- Revisión de publicaciones científicas con descripciones geológicas de la cuenca, como Jordan et al. (2007), Dalannays (1979a), Mc Cartney (2001), Moraga et al. 1974), Fock, A. (2009).

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

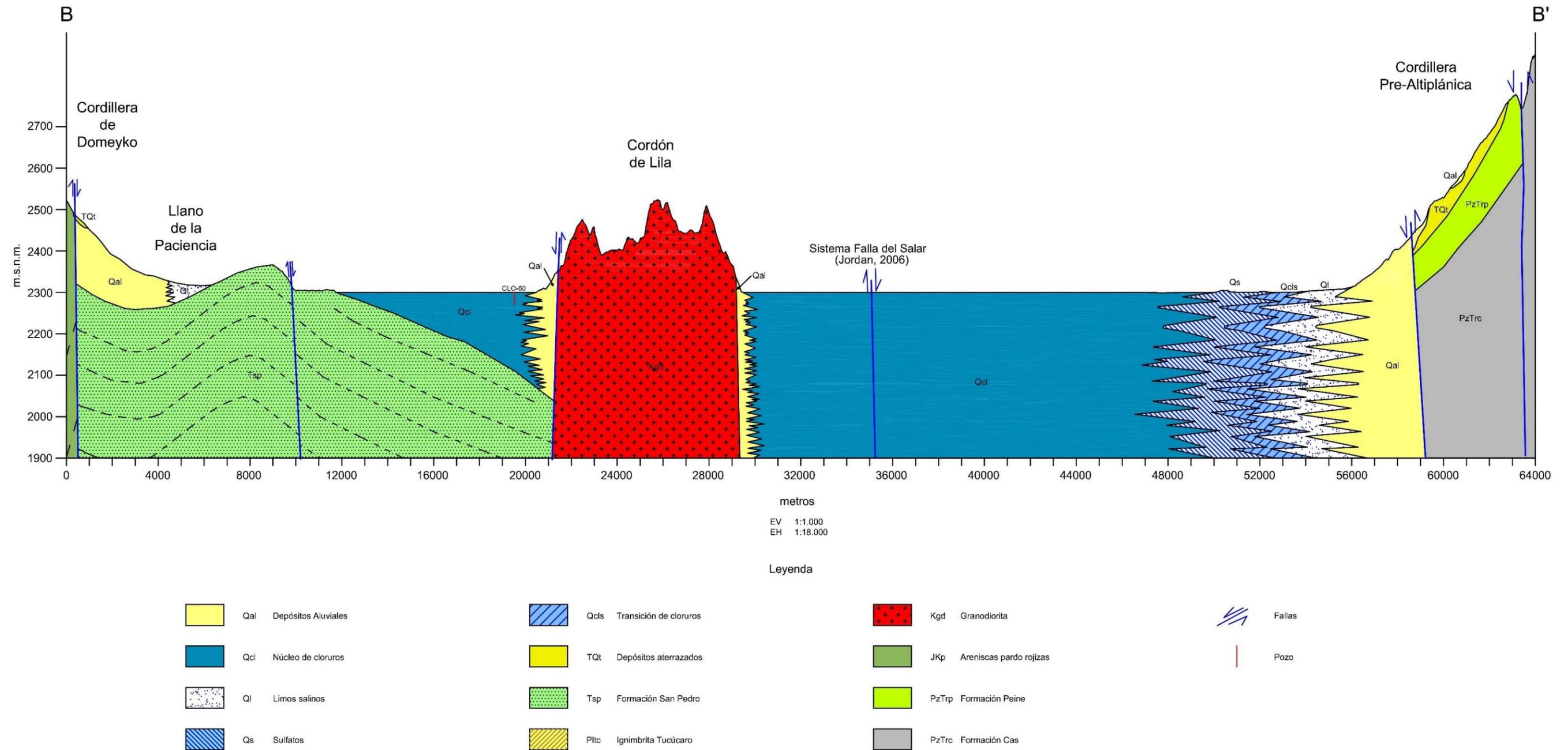
En los sectores respecto de los cuales existe información directa, como es el caso de las muestras de testigos de perforación obtenidas de los pozos y piezómetros construidos dentro del marco de este EIA, ésta se utilizó para correlacionar las diferentes unidades geológicas y darles valores de potencia reales.

Figura 3-15 Corte geológico A-A'



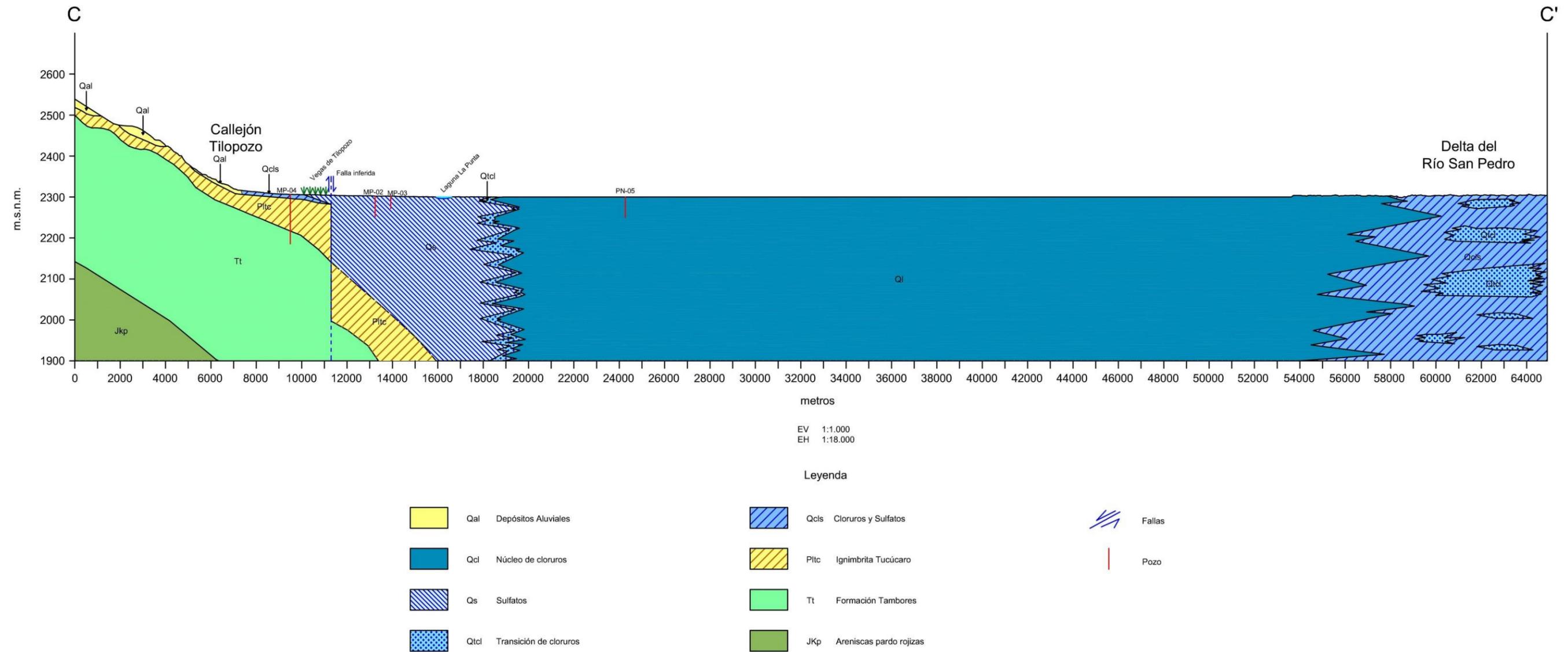
Fuente: Elaboración Propia

Figura 3-16 Corte geológica B-B'



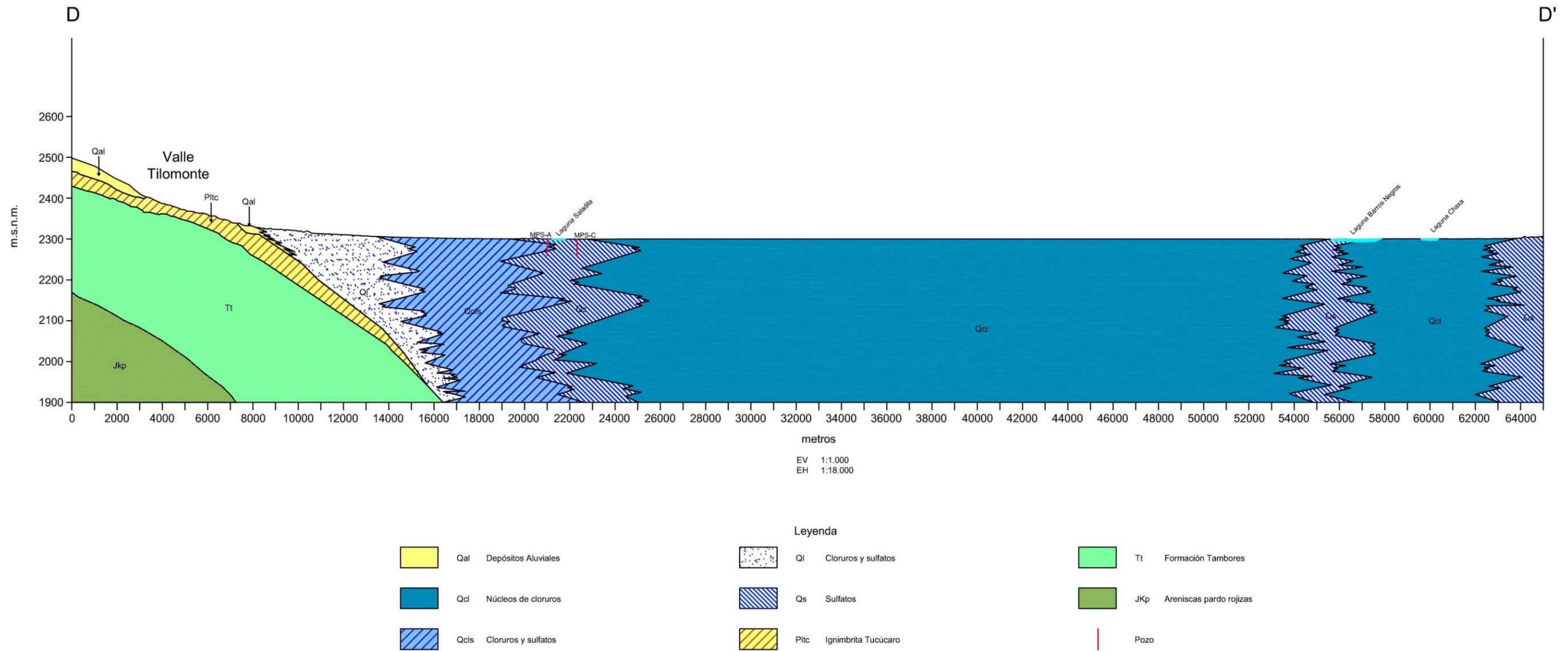
Fuente: Elaboración Propia

**Figura 3-17 Corte geológico C-C'**



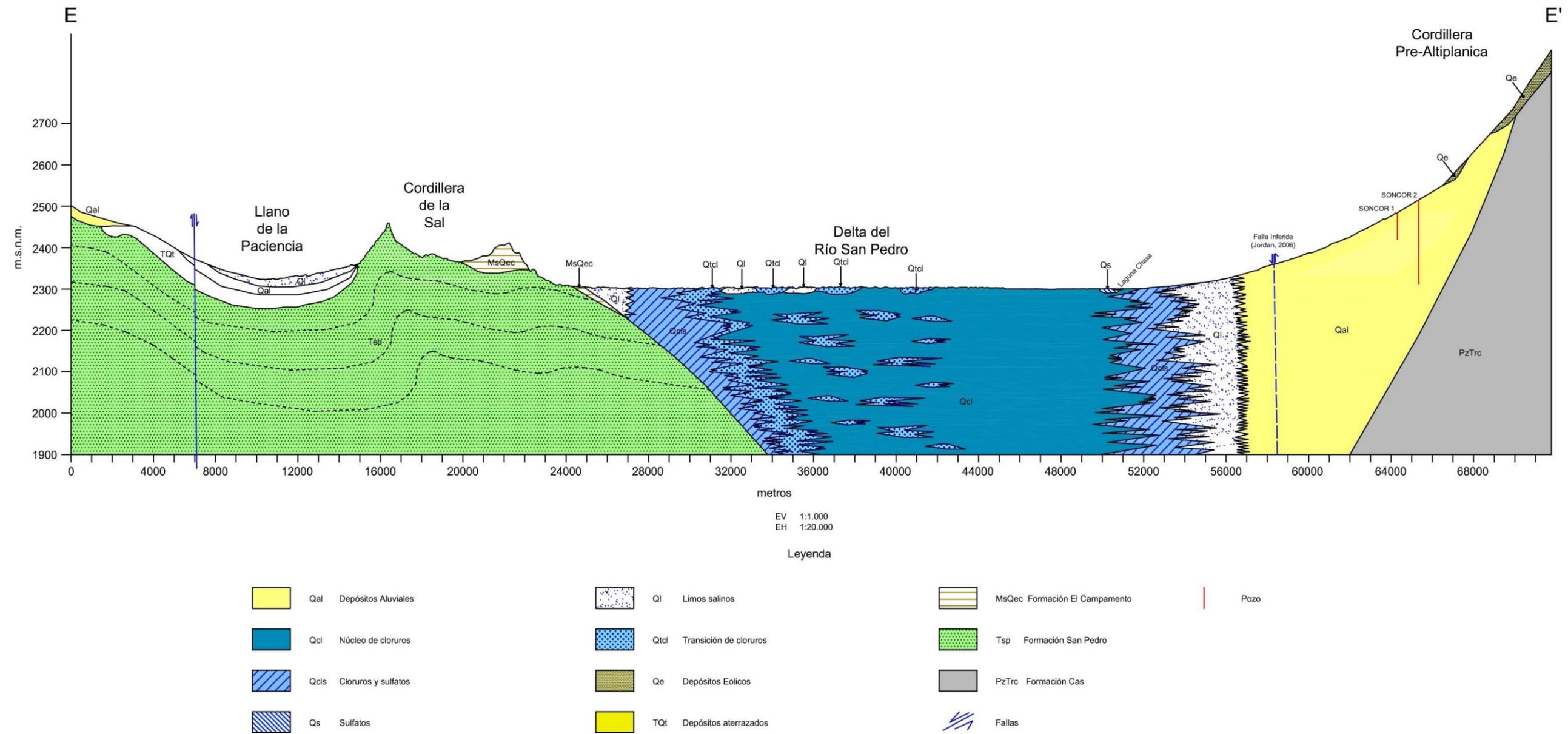
Fuente: elaboración propia

Figura 3-18 Corte geológico D-D'



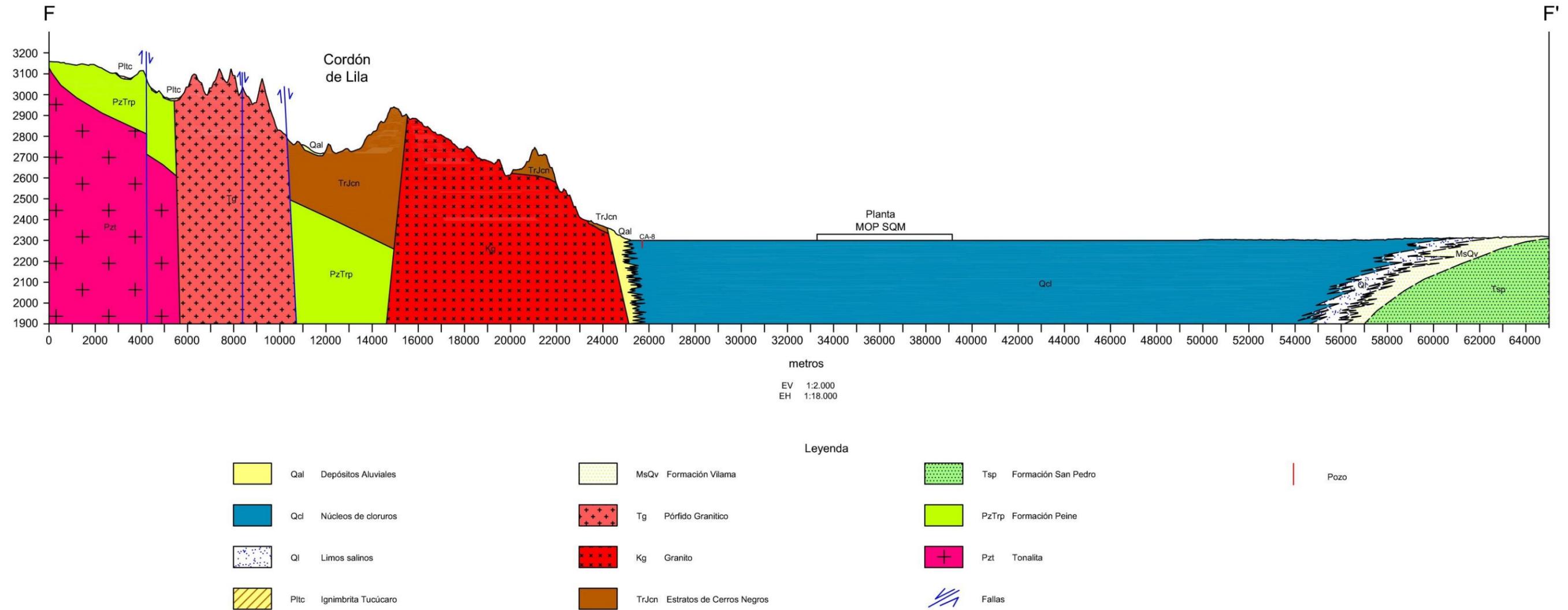
Fuente: Elaboración propia

Figura 3-19 Corte geológico E-E'



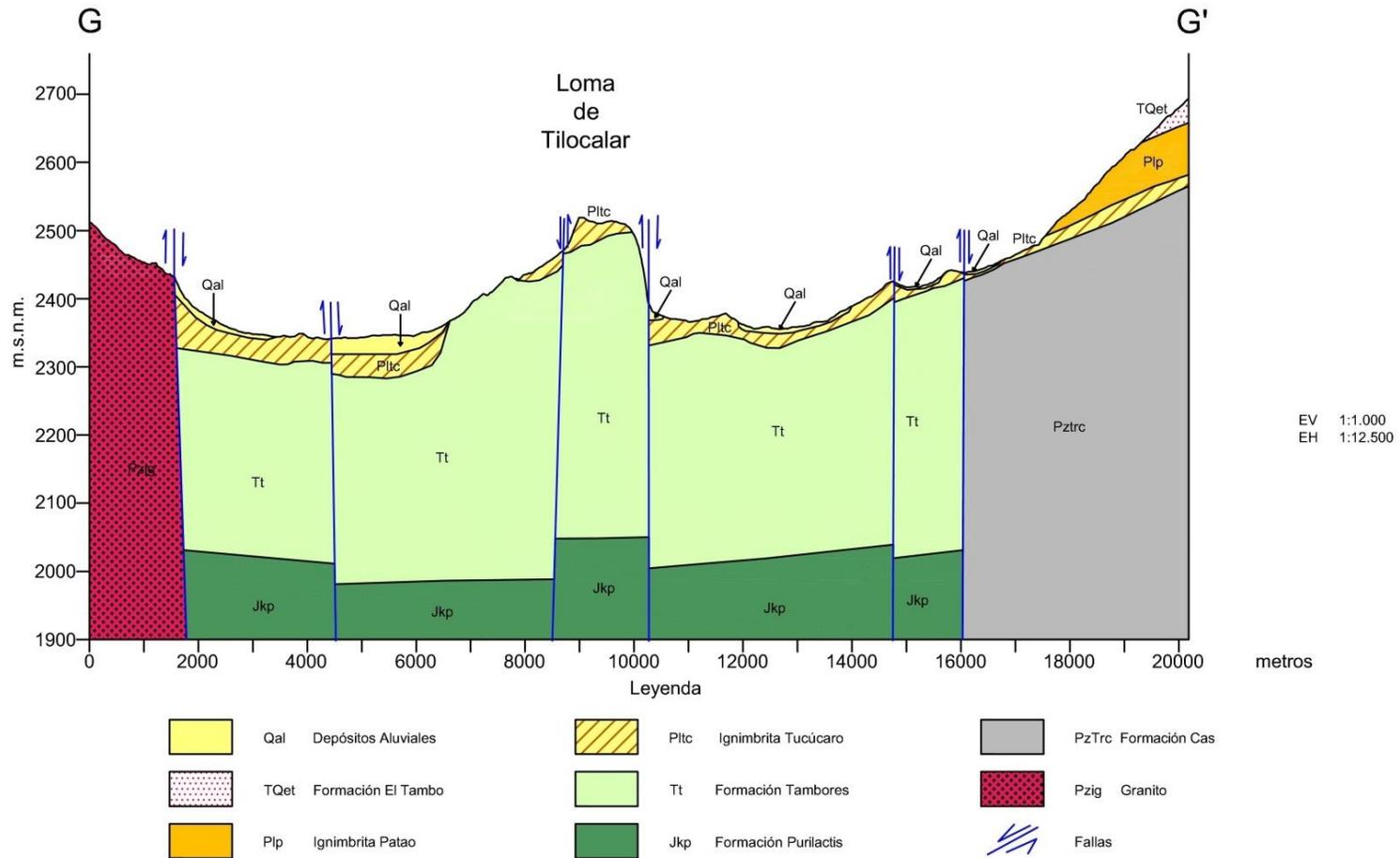
Fuente: Elaboración propia

Figura 3-20 Corte geológico F-F'



Fuente: Elaboración Propia

**Figura 3-21 Corte geológico G-G'**



Fuente: Elaboración propia

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

## 4 GEOMORFOLOGÍA, TOPOGRAFÍA Y SISTEMA DE COORDENADAS

### 4.1 Introducción

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 y los elementos dinámicos dentro de éstos.

Se describen de manera general, además, los trabajos realizados en terreno y gabinete en relación a la información topográfica para obtener una precisión acorde a las particularidades del relieve del Salar de Atacama y a los requerimientos técnicos de las herramientas de modelación hidrogeológica utilizadas para este trabajo. El detalle de estos trabajos se presenta en el “Apéndice A: Topografía” de este Anexo.

Se entrega, al final, el detalle del sistema de coordenadas utilizado en el desarrollo del presente estudio, y antecedentes de las transformaciones de sistemas realizadas, con la finalidad de homologar toda la información en el sistema elegido el que corresponde al WGS84 (World Geodetic System 1984).

### 4.2 Geomorfología

#### 4.2.1 Geomorfología regional

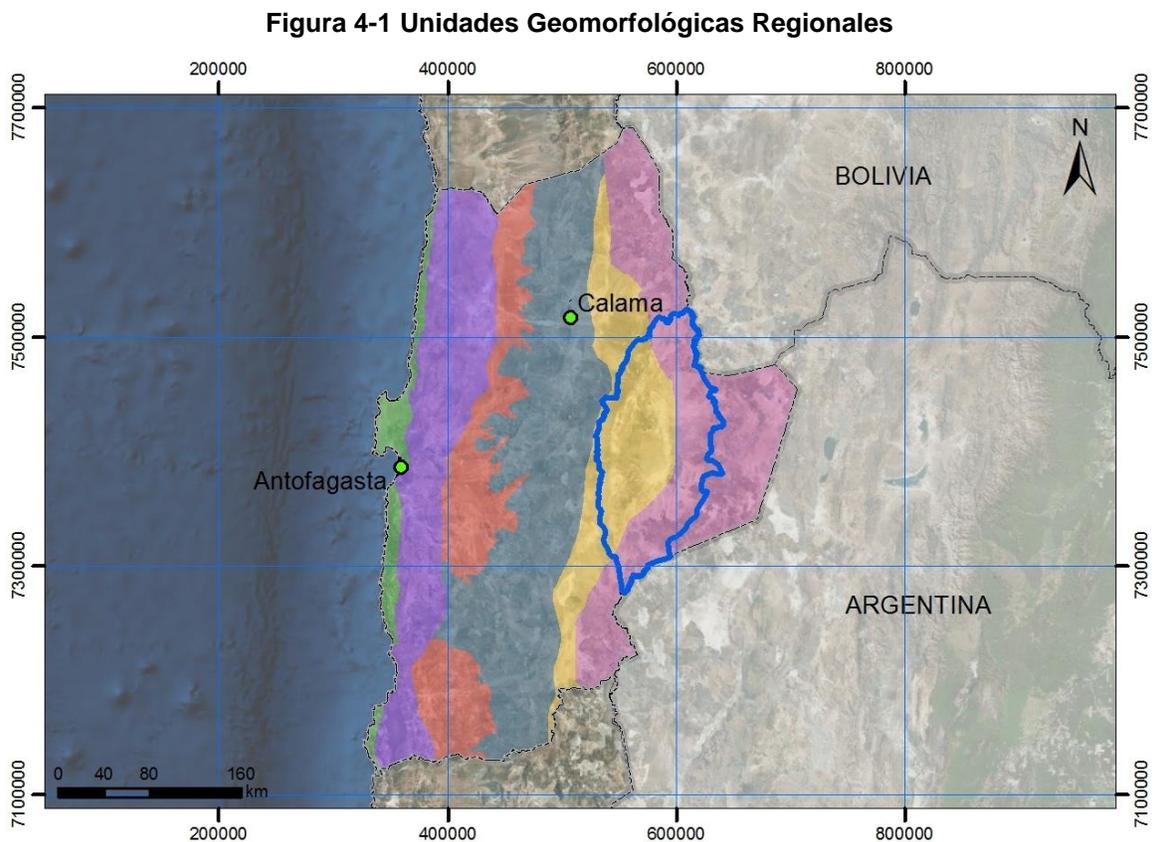
Geomorfológicamente los Andes centrales del Norte de Chile se pueden dividir en cinco elementos morfotectónicos diferentes (Flint et al., 1993 citado en Mc. Cartney 2001). Estas unidades se describen a continuación:

- Cordillera de la Costa (Jurásico): constituida por un arco volcánico compuesto por lavas andesíticas intercaladas con depósitos sedimentarios marinos.
- Depresión Central (Terciario Superior-Cuaternario): se trata de una cuenca continua, alargada de Norte a Sur, que se extiende a lo largo de gran parte de Chile.
- Cordillera de Domeyko (Paleozóico-Mesozóico): constituida por depósitos clásticos y rocas carbonatadas sedimentarias y rocas intrusivas.
- Depresión Preandina (Mesozóico–Holoceno): Consiste principalmente en la cuenca del Salar del Atacama, que es una cuenca con un relleno de materiales detríticos, ígneos y salinos. Estos depósitos salinos se concentran en la parte central de la depresión.

- Cordillera de los Andes: constituida por arcos volcánicos del Terciario Medio-Holoceno y estratovolcanes del Cuaternario. Se trata de planicies con una altura media de 4200 msnm. y volcanes que llegan a sobrepasar los 6000 msnm.

La cuenca del Salar del Atacama se localiza dentro de la Depresión Pre-Andina, limitado al Este por la Cordillera de los Andes y al Oeste por la Cordillera de Domeyko. (Mc Cartney, 2001).

La Figura 4-1 muestra las unidades geomorfológicas de carácter regional que circundan la cuenca del Salar del Atacama.



**Leyenda**

**Geomorfología Regional**

- |  |  |   |
|--|--|---|
|  Costa                  |  Cordillera de Domeyko        |  Cuenca del Salar de Atacama |
|  Cordillera de la Costa |  Río Loa; Depresión Preandina |   |
|  Depresión Central      |  Cordillera de los Andes      |   |

Fuente: Modificado de Mc Cartney, 2001

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

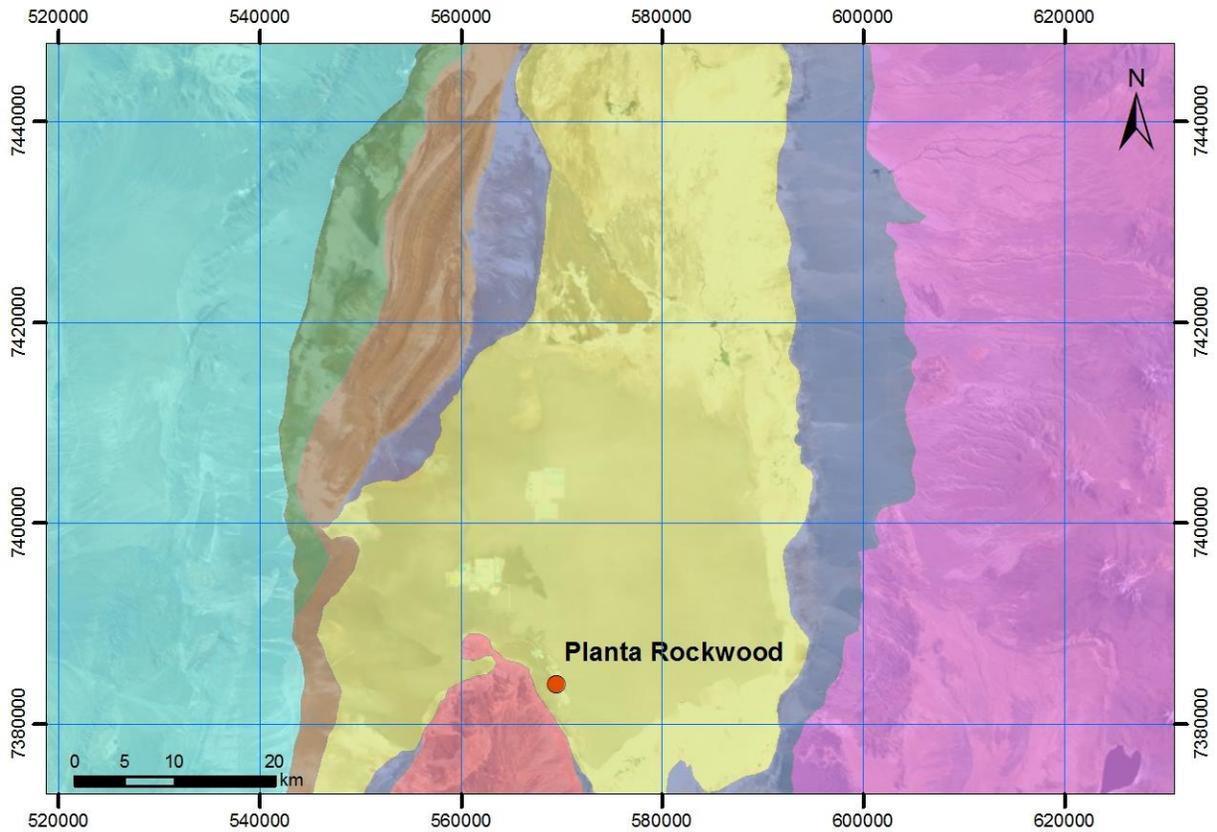
#### 4.2.2 Geomorfología local

Localmente, el área de estudio queda comprendida en las unidades de la Cordillera de Domeyko, la Depresión Preandina y la Cordillera de los Andes (Mc Cartney, 2001). Entre estas unidades se pueden diferenciar una serie de subunidades geomorfológicas que se describen a continuación, de Oeste a Este dentro de la zona de interés:

- Llano de la Paciencia: situado entre la Cordillera Domeyko y la Cordillera de la Sal. Presenta una altura promedio de 2.300 msnm. Es una depresión alargada con orientación Norte-Sur que presenta 80 km de largo y 8 km de ancho.
- Cordillera de la Sal: cordón montañoso con una altura promedio de 2.500 msnm y 4 km de ancho.
- Glacis detrítico del borde del Salar: En los bordes de la Depresión del Salar de Atacama, sobretudo en su margen oriental, existe una acumulación de materiales detríticos, sobretudo arenas de tamaño de grano medio-grueso y que proceden de la erosión de los materiales que forman la precordillera.
- Depresión de Atacama: Corresponde a una cuenca tectónica de evaporación que ocupa una superficie de 3.500 km<sup>2</sup>, cuya altura media es 2.300 msnm. Presenta una superficie en forma elíptica con orientación de Norte a Sur y una ligera pendiente hacia el Sur. Está constituida en un 75% de depósitos salinos que le confieren una superficie rugosa.
- Cordón de Lila: Ubicado al Sur del Salar de Atacama. Presenta una altura promedio de 3.200 msnm. Su relieve es abrupto y está escarpado por numerosas quebradas con orientación Noreste hacia oriente y Noroeste hacia occidente.
- Cordillera prealtiplánica: Al oriente de la Depresión de atacama, se levantan cordones montañosos con una alineación Norte-Sur, que se caracterizan por su gran altura y su carácter meramente volcánico. Es característica la presencia de hielo y nieve en sus cumbres durante todo el año.

A continuación se presenta la Figura 4-2, que representa espacialmente las subunidades identificadas.

**Figura 4-2 Subunidades Geomorfológicas**



**Leyenda**

- |   |  |
|---|--|
|  Cordonera de Domeyko  |  Depresión de Atacama                             |
|  Llano de la Paciencia |  Glacis detríticos del borde del Salar de Atacama |
|  Cordonera de la Sal   |  Cordonera Prealtiplánica                         |
|  Cordon de Lila        |  |

Fuente: Elaboración propia

En cuanto al borde Sur del Salar de Atacama, la subunidad geomorfológica depresión de Atacama presenta una fuerte componente tectónica, motivada por el desplazamiento de fallas con dirección predominante N-S, lo que da lugar a lineamientos montañosos con la misma orientación.

El Salar de Atacama, de edad pliocena, es la cuenca salina más representativa de la unidad geomorfológica de la depresión preandina. Esta cuenca aparece rellena por depósitos volcánicos, salinos y detríticos (Ver Capítulo 3. Geología). Se observa una zonación entre unidades salinas y detríticas en que los depósitos salinos ocupan principalmente la parte central de la cuenca (Núcleo), mientras que los depósitos detríticos se sitúan principalmente en los bordes de la cuenca (Zona Marginal).

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

La disposición de estos depósitos se debe a la acción de factores tales como las variaciones climáticas e hidrológicas, que determinan los diferentes tipos de erosión, transporte y sedimentación que originan las diferentes unidades geomorfológicas.

En el caso de inundaciones laminares por agua superficial nos encontramos con costras de sal con superficie suavizada, cúspides de sal y márgenes almenados.

Uno de los aspectos más característicos del Salar es la variedad de costras salinas presentes. En los márgenes del núcleo del Salar pueden desarrollarse playas secas afectadas por inundaciones, en las que se depositan principalmente limos y arcillas, aunque a veces en épocas de mayor energía se sedimentan canalillos de arena fina. En estas zonas perimetrales también se pueden localizar abanicos aluviales.

En la Zona Marginal pueden observarse costras de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) y yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) cuya distribución sigue el aumento general de la salinidad del agua subterránea hacia el centro de la Cuenca, con carbonatos en los márgenes y yeso hacia el centro de la misma.

En los sectores en los que se encuentran las costras sulfatadas (yesos) se presentan pequeños montículos, denominados bóvedas o túmulos. La desecación da lugar a ampollas salinas y polígonos salinos de hasta 10 metros de diámetro. Las grietas que limitan los polígonos se generan por cambios de volumen debidos a humedecimiento y desecación (Mabbut, 1977 citado en Gutiérrez, 2001).

En algunas zonas se han producido eventos poco frecuentes de inundaciones superficiales que han producido una zona llana de sedimentos salinos a lo largo de los márgenes Este y Sur del Salar. En estas zonas se ha desarrollado en superficie una costra de halita lisa.

Respecto al núcleo del Salar, la costra de halita lisa está en contacto abrupto con las eflorescencias de halita subaérea (Loweinstein et al., 2003), de color más oscuro y rugosa situadas hacia el Núcleo. Esta costra de halita eflorescente cubre la mitad Sur del Salar de Atacama, donde en condiciones naturales, vale decir, sin la situación actual de explotación de la salmuera, el agua subterránea (salmuera) se encuentra a una profundidad alrededor de 1 metro por debajo de la superficie (Mardones, 1986).

La costra de halita subaérea está compuesta de agregados masivos de cristales de halita, con tamaños milimétricos hasta submilimétricos, Esta halita presenta cavidades de varios centímetros de diámetro unos 10 cm de longitud que se disponen como una red orientada al azar, cuya formación se interpreta por disolución producida por la lluvia. Estas cavidades actúan como trampas de sedimentos para las partículas arrastradas por el viento, dando como resultado la formación de lentes de limo que recubren el fondo de las cavidades. La estratificación está en gran medida ausente en las costras de halita subaérea, pero el material detrítico atrapado en la superficie por películas delgadas de salmuera higroscópica genera lentes irregulares y discontinuas de limos arcillosos.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

En la costra de halita subaérea se han encontrado también superficies con aspecto ceniciento que muestran una red rugosa de polígonos de escala métrica similar a los reportados por Stoertz y Ericksen (1974). Dentro de estos polígonos existen pináculos de menor escala y estructuras de crestas y depresiones, producidos por disolución por la lluvia, con deposición de materiales insolubles en el fondo de las depresiones.

Se asume que la costra de halita eflorescente del Salar de Atacama se formó por evaporación de las salmueras del subsuelo, y posterior precipitación de cristales de halita submilimétrico sobre el nivel freático. Esta precipitación ha producido un crecimiento en altura de los depósitos de halita en un entorno totalmente subaéreo.

La evaporación prolongada provoca un crecimiento continuo de cristales de halita eflorescente en la superficie, produciendo la expansión y posterior rotura de la costra superficial, formando estructuras poligonales de escala métrica. La evaporación preferencial a lo largo de los bordes de los polígonos produce crestas elevadas. Este fenómeno forma una superficie con estructura irregular compuesta por pináculos y depresiones con diferencias de altura de hasta 1 m. Esta costra de halita con alto relieve es indicativa de períodos prolongados de exposición subaérea en el Salar de Atacama, con un nivel freático próximo a superficie y relativamente estable. Bajo las costras superficiales eflorescentes y por debajo del nivel freático se encuentran agregados de grandes cristales de halita, entrelazados, transparentes y con forma cúbica, con tamaños de escala centimétrica. Estos agregados de cristales relativamente grandes se han formaron por debajo del nivel freático debido a la precipitación relativamente lenta desde las soluciones salinas presentes en las aguas subterráneas.

### 4.3 Topografía

Para el desarrollo del presente Estudio de Impacto Ambiental y en particular del “Estudio Hidrogeológico y Modelo Numérico del sector Sur del Salar de Atacama”, la disponibilidad de información topográfica detallada y confiable es fundamental para el análisis de resultados de niveles piezométricos, propios y de terceros, confección de piezometrías, estudio de evaporación desde el terreno, así como para la elaboración de los modelos numéricos MODFLOW y SEAWAT.

Se ha tenido en cuenta que la precisión topográfica necesaria para los modelos numéricos, es definida en la “Guía para el uso de modelos de aguas subterráneas en el SEIA”, (SEA, 2012) en sus puntos 3.2.3 de Recopilación de Información, y en particular del punto 3.3.3 de Definición de la discretización vertical, donde se indica que *“En cuanto a la discretización en el límite superior es importante destacar que, para la mayoría de los casos (en particular aquellos con los niveles freáticos o piezométricos profundos), precisiones de la topografía en torno a 1 metro resultan aceptables. Un caso particular corresponde a acuíferos someros donde la evaporación desde la napa y/o la evapotranspiración vegetal forman parte importante del balance hídrico (por ejemplo, acuíferos someros en zonas áridas o en Salares) y en donde la topografía debería ser representada con una precisión del orden de centímetros”*.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

Con el fin de cumplir con estos requisitos, durante el año 2014, Rockwood realizó distintos trabajos de terreno y gabinete, para obtener una base topográfica de mejor precisión, en este caso un ráster o DEM (modelo digital de elevaciones, en sus siglas en inglés), considerando la magnitud de la superficie estudiada y sus particularidades topográficas.

De esta manera una parte importante de los trabajos fueron desarrollados en terreno, mediante levantamiento topográfico con receptores satelitales de posicionamiento global (GPS Geodésico y Estación total) y otra fue desarrollada en gabinete, generando un DEM partir de la integración de la distinta información topográficas generada por Rockwood en el área de estudio, y teniendo en cuenta los trabajos topográficos realizados por terceros.

El detalle de la nueva información topográfica generada se presenta en el Apéndice A. Topografía, de este estudio. En resumen, los trabajos realizados fueron los siguientes:

1. Recopilación de información topográfica de terceros: Se revisó la información disponible de empresas, principalmente mineras, con mediciones de niveles piezométricos en el Salar, principalmente publicados en los informes y estudios presentados al Servicio de Evaluación Ambiental o solicitados a instituciones y servicios públicos a través de Ley de Transparencia, además de publicaciones científicas que cuentan con información topográfica de pozos ubicados en la cuenca.
2. Campaña levantamiento topográfico, Octubre 2013: Se levantaron coordenadas y cotas de 37 pozos localizados en el Sureste del Salar, todos ellos pertenecientes a Rockwood. Además se midieron 15 puntos de apoyo para establecer poligonales cerradas y nivelación trigonométrica.
3. Campaña levantamiento topográfico, Julio 2014: Comprendió el levantamiento por nivelación geométrica de coordenadas y cotas de 26 barrenos, 57 piezómetros, 1 pozo, 1 zanja y de 19 puntos de control para la generación del DEM de alta resolución de la Zona Marginal. Del total de puntos levantados 7 piezómetros son de propiedad de Minera Escondida y el restos de puntos pertenecen a Rockwood.
4. Campaña levantamiento topográfico, diciembre 2014: Se levantaron 130 coordenadas y cotas de pozos y limnímetros, la mayoría de ellos pozos propios, no obstante en esta campaña se levantaron topográficamente pozos y limnímetros de terceros, principalmente correspondientes a Minera Escondida y a SQM utilizando la nivelación realizada en la campaña de Julio de 2014. Además se obtuvieron 4.479 coordenadas y cotas de terreno en caminos al interior del Salar de Atacama con el objetivo de conocer particularmente las características topográficas del núcleo del Salar y apoyar la construcción del modelo hidrogeológico.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

5. Generación Modelo de Elevación Digital de precisión en la Zona Marginal (DEM 7 m)<sup>1</sup>: Para la generación de este modelo se trabajó con imágenes del satélite Pléyades en la Zona Marginal del Salar (área DEM 7 m, Figura 4-3), las que correspondieron a 4 escenas (2 pares estereoscópicos). Las fechas de las imágenes son del 09-08-2013 y 15-08-2013. Mediante el uso del software ERDAS, estas imágenes se corrigieron geoméricamente utilizando 19 puntos de control (denominados GCP), levantados en la campaña de julio de 2014 los que se describen en detalle en el Apéndice A “Topografía”. Luego, con las imágenes ortorectificadas, se obtuvo una nube de puntos fruto del análisis de los pares estereoscópicos con solape mayor del 80%. Con estos datos se generó el TIN (Triangular Irregular Network) a partir del cual se generó el Modelo Digital de Elevación para el área procesada, con una resolución de píxel de 7 metros, ajustándose algunas cotas en aquellas zonas donde existían mediciones de los levantamientos de topografía en terreno. La precisión topográfica para esta área se ha calculado de +/- 50 cm en promedio.
  
6. Uso del DEM SRTM, para el resto de la cuenca del Salar no cubierta por el DEM de precisión. El DEM SRTM tiene una resolución de píxel de 90 m y una precisión de entre 11 y 15 m aproximadamente en las coordenadas Este y Norte. Su precisión en el valor de cota depende de factores tales como la latitud, sin embargo se estima que para la zona del Salar de Atacama es cercana a los +/- 4 m. El DEM SRTM es un modelo digital de elevaciones proveniente de la Misión Topográfica Shuttle Radar, ampliamente conocido por su sigla en inglés SRTM. Esta misión es un proyecto llevado por la NASA y su objetivo fue generar mapas topográficos digitales de alta resolución de la Tierra. Estos DEM se encuentran disponibles para ser descargados desde el sitio web de la NASA “EROS” (Earth Resources Observation and Sciences).
  
7. Generación de zonas de cota homogénea dentro del núcleo del Salar, tomando como apoyo el DEM SRTM considerando las escasas variaciones de cota al interior de éste. Pudo advertirse, sin embargo, la existencia de una pendiente poco pronunciada, pero presente, en sentido Norte – Sur. De esta manera se determinaron cuatro zonas homogéneas cuyas cotas descienden de Norte a Sur y de Oeste a Este hasta estabilizarse en un área de 2.300 msnm. La asignación de cotas a cada una de estas cuatro zonas se basó en las 2.550 coordenadas y cotas de terreno medidas en caminos al interior del núcleo del Salar.

Uno de los aspectos más importantes en la construcción de la geometría (límite superior) del modelo numérico fue el tratamiento de la topografía del núcleo del Salar y de la Zona Marginal, que son las zonas críticas donde la influencia de la evaporación está relacionada directamente con la profundidad del nivel freático.

---

<sup>1</sup> Para la generación de este modelo se trabajó con la empresa española Argongra S.L.U., quienes son especialistas en geomática orientada a estudios medioambientales y mineros. En base a los requerimientos transmitidos por SGA, Argongra adquirió imágenes del satélite Pléyades

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

Dado que los levantamientos topográficos disponibles en el mercado (SRTM y ASTER) no ofrecen la precisión suficiente en estas zonas para cumplir con los requisitos de modelación, el Titular integró la información disponible de la siguiente manera:

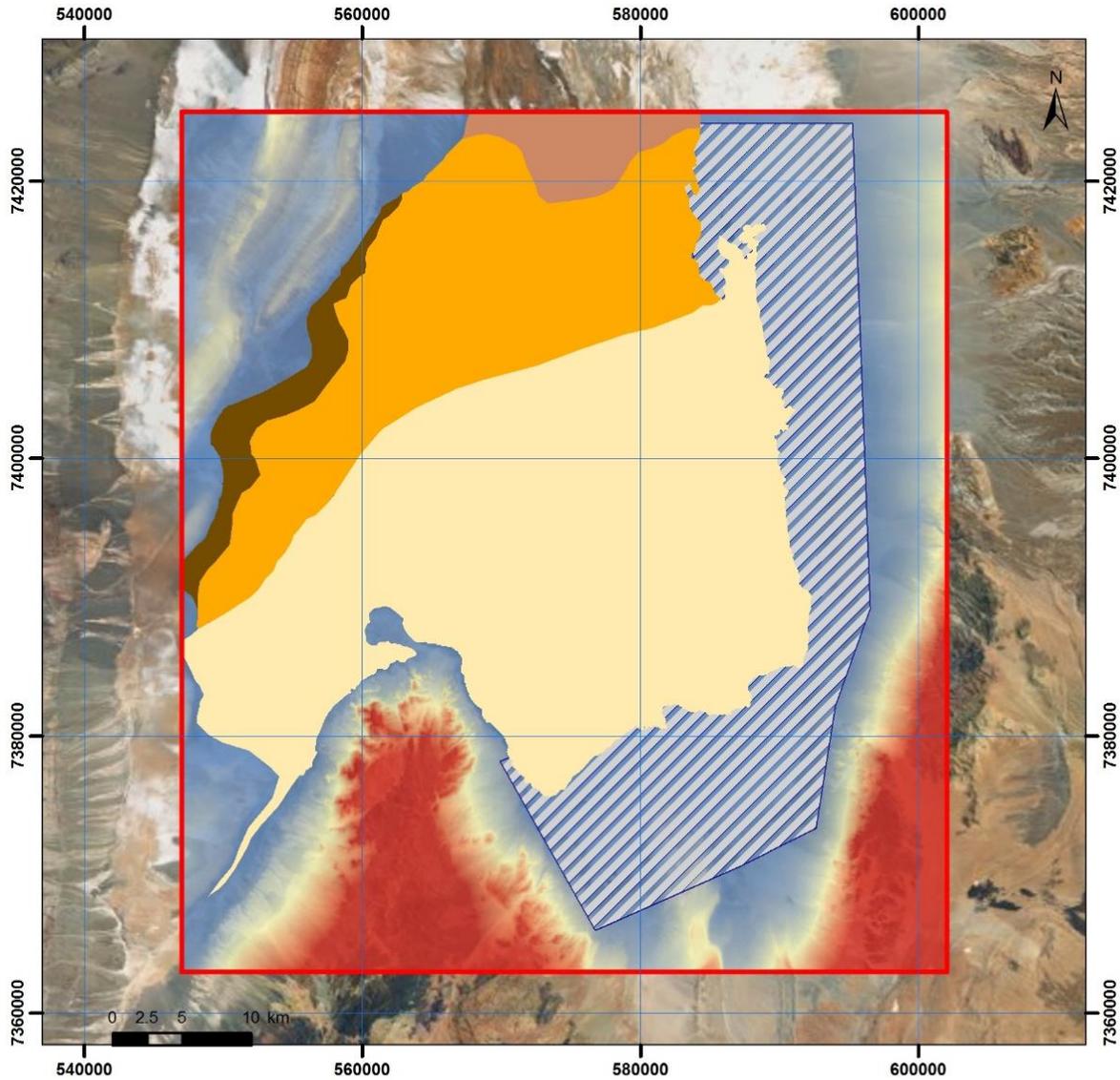
1. Utilización del DEM SRTM (resolución espacial: 90 m /pixel, precisión: +/- 4 m) en las zonas fuera del Núcleo y de la Zona Marginal.
2. Utilización del DEM 7 m de alta precisión (resolución espacial: 7 m/pixel, precisión +/- 0,5 m) sobre todo en la Zona Marginal.
3. Establecimiento de cuatro zonas de cota homogénea dentro de la subcuenca Núcleo, situada en el interior del área de modelación, cuya finalidad fue representar con la mayor precisión posible tanto la condición plana del Núcleo, como la ligera pendiente que tiene el Salar, que va disminuyendo de Norte a Sur y de Oeste a Este para finalizar en un área prácticamente plana de mayor superficie, en la cual se ha establecido la cota promedio en 2.300 msnm.

La fusión de estas tres bases (DEM 7 m, DEM SRTM y área cota 2.300 msnm) permitió la obtención de un ráster de topografía (DEM) para su utilización en la modelación, con una precisión centimétrica en toda la Zona Marginal del Salar y los sectores en los cuales se realizaron levantamientos topográficos de pozos y otros puntos de interés. La Figura 4-3 muestra esquemáticamente la composición realizada.

Con la obtención de la información proveniente del levantamiento topográfico *in situ*, junto a la información de niveles informada por terceros, ha sido posible realizar una comparación y estimación de diferencias respecto a las cotas y niveles informados por terceros, cuyo detalle se presenta en el Apéndice de Topografía del presente Estudio. De acuerdo al análisis estadístico que allí se presenta, se encontraron diferencias en torno a centímetros para la mayoría de los casos en que existen cotas presentadas por terceros y que también fueron medidas por Rockwood en el desarrollo de las actividades de levantamientos topográficos realizados en terreno.

De esta manera, estos trabajos han permitido mejorar la integración y homogeneización de los registros topográficos provenientes de distintas fuentes, generando un ráster de topografía (DEM), y mejorando específicamente la precisión en la cota de los niveles de aguas subterráneas para los diferentes intereses del presente Estudio.

**Figura 4-3 Composición realizada para obtener topografía**



**Legenda**

- Dominio Modelo 2015
- Área DEM 7 m resolución

**Área DEM SRTM**

- High : 3272.76
- Low : 2291.27

**Zonas Definidas Núcleo del Salar**

- |   |   |
|---|---|
| <span style="display: inline-block; width: 20px; height: 10px; background-color: #fff9c4; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> 2300 msnm    | <span style="display: inline-block; width: 20px; height: 10px; background-color: #c07040; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> 2301 msnm    |
| <span style="display: inline-block; width: 20px; height: 10px; background-color: #ffcc00; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> 2300,46 msnm | <span style="display: inline-block; width: 20px; height: 10px; background-color: #6b8e23; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> 2301,35 msnm |

Fuente: Elaboración Propia

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

#### 4.4 Sistema de coordenadas

En el presente estudio la información topográfica y cartográfica está referida siempre al sistema geodésico WGS-84 Huso 19 Sur. Esto significa que toda información que puede ser representada cartográficamente o como tabla de coordenadas y que se obtuvo desde otras fuentes en otro sistema de referencia o Datum ha sido transformado a WGS-84. Actualmente en el Salar de Atacama es posible encontrar información procedente de diversos organismos y empresas que trabajan en otros sistemas de proyección y de referencia geodésica, principalmente el PSAD56.

La conversión de coordenadas referidas a estos sistemas ha sido ajustada a WGS-84 en base a parámetros de transformación que se obtienen de una serie de puntos de control comunes en ambos sistemas de referencia.

Independientemente de la existencia de diversos modelos de conversión, en este caso se han utilizado los parámetros de transformación elaborados por el Instituto Geográfico Militar (IGM) que tienen una precisión aproximada de +/- 5 m en las coordenadas Este y Norte.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

## 5 EXPLOTACIÓN DE LA CUENCA

En la cuenca del Salar del Atacama se encuentran dos fluidos de composición notoriamente distinta, y cuya extracción está afecta a distintos procesos administrativos:

- (i) La salmuera, con una alta concentración de elementos químicos, siendo los más relevantes el Litio y el Potasio, lo que la hace un yacimiento de relevancia nacional que, siendo considerada un recurso minero, su extracción se realiza mediante contratos con el Estado de Chile a través de proyectos que han debido ser evaluados a través del Sistema de Evaluación Ambiental (SEA);
- (ii) Las aguas de los acuíferos ubicados alrededor del Núcleo, siendo los de mayor importancia los que se encuentran en los bordes oriental y Sur del Salar, y que son la principal fuente de recarga de los sistemas de lagunas y zonas de vegas presentes en los bordes antes mencionados. La explotación de este recurso se realiza a partir de la obtención de derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas, los que son otorgados por la Dirección General de Aguas (DGA). Cuando la explotación está vinculada a un proyecto sometido al SEA, los efectos de la extracción de los caudales otorgados es evaluada ambientalmente y en ocasiones, como resultado del proceso y por razones ambientales, es restringida a un caudal menor. También esta extracción puede estar afecta a un Plan de Seguimiento e incluso a un Plan de Alerta Temprana, dependiendo de la existencia de sistemas sensibles.
- (iii) Las aguas superficiales que escurren por las quebradas y drenan hacia el depocentro de la cuenca. Sin embargo, sus flujos suelen infiltrar posteriormente en los acuíferos antes de que alcancen directamente el núcleo del Salar. Su explotación también está sujeta al otorgamiento de derechos de aguas superficiales, por parte de la DGA.

En los siguientes puntos se describen los derechos de aprovechamiento de aguas otorgados y en trámite (tanto subterráneo como superficial) en la cuenca, y a su vez se analizan los usos reales de este recurso.

Teniendo en cuenta que, si bien los derechos de aprovechamiento de aguas son en su mayoría para un ejercicio permanente y continuo, en realidad, muchos de ellos no son explotados en su caudal máximo las 24 horas del día y todos los días del año. Esta circunstancia, tiene implicancias al momento de realizar una modelación numérica del comportamiento hidrogeológico de una cuenca, porque los datos históricos de niveles, recargas y extracciones, entre otros, son utilizados durante la calibración del modelo en régimen permanente y/o transiente. En relación a las extracciones resulta relevante considerar una explotación que sea lo más real posible. Asimismo, para los diferentes escenarios de modelación, es importante considerar escenarios desfavorables (explotación máxima), así como los escenarios más realistas, acorde a la explotación actual y futura conocida.

Consecuentemente, en este capítulo se analizan, además, los caudales informados de extracción de aguas de los acuíferos subterráneos y de la explotación de salmuera, realizada por las principales compañías mineras que realizan sus actividades en el Salar de Atacama.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

## 5.1 Análisis de derechos de aprovechamiento de aguas en la Cuenca

### 5.1.1 Derechos de aprovechamiento de agua otorgados en la cuenca del Salar del Atacama

El análisis de los derechos de aprovechamiento de aguas otorgados y que se encuentran ubicados dentro de la cuenca del Salar del Atacama se realizó con la información procedente del sitio web de la DGA actualizada al mes de diciembre 2014.

Conforme a dicha información, se obtuvo el total de derechos concedidos en la II Región de Antofagasta que corresponde a 962 resoluciones de otorgamiento. Posteriormente se procedió a ubicar aquellos derechos de aprovechamiento de aguas concedidos al interior de la cuenca del Salar del Atacama. , Además, se contrastó la información descargada del sitio web de la DGA con los derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas presentados en el Anexo 2 del Informe Técnico “Evaluación de los Recursos Hídricos Subterráneos del Acuífero del Salar de Atacama” del Departamento de Administración de Recursos Hídricos de la DGA, de fecha febrero 2012. Finalmente se incorporó el análisis de 5 solicitudes de otorgamiento de derechos de aprovechamiento de aguas realizada por SQM entre los años 1999 y 2002 y que fueron aprobadas en noviembre de 2014 e inscritos los pozos en el Registro de Propiedad de Aguas del Conservador de Bienes Raíces de Calama, en enero de 2015.

Conforme a este análisis se obtuvo un total 300 de derechos de aprovechamiento de aguas constituidos dentro de la cuenca del Salar del Atacama entre derechos subterráneos y superficiales, los cuales totalizan un caudal de 5.107 L/s.

La Figura 5-1 muestra la distribución de estos derechos de aprovechamiento de aguas otorgados en la cuenca del Salar del Atacama, los que se encuentran fundamentalmente en el Norte, Borde Este y Sur de la Cuenca. El detalle de la subcuenca en la que se encuentra cada registro de los derechos conferidos, además de la suma del caudal otorgado en cada una de ella, se presenta la Tabla 9-17. Cabe señalar que las subcuencas a las que se hacen referencia son las que se definieron en el desarrollo del presente estudio y su detalle puede revisarse en el Capítulo 6. Hidrología

Respecto a la modalidad del ejercicio de los derechos der aprovechamiento de aguas se comprobó que 153 expedientes corresponden a solicitudes de ejercicio permanente y continuo y 2 expedientes a solicitudes de ejercicio permanente y discontinuo. En cuanto al tipo de derecho, la totalidad corresponde a derechos del tipo consuntivo.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

**Tabla 5-1 Derechos de aprovechamiento de aguas otorgados por subcuenca (Superficiales y Subterráneos)**

Subcuenca	Cantidad Registros en la Subcuenca	Caudal L/s
1	28	1.212,0
10	49	1.686,4
11	1	40,0
16	29	525,8
2	5	224,8
3	3	125,0
4	7	254,0
5	4	247,7
6	10	144,6
7	13	490,1
8	5	114,3
9	1	43,0
<b>Total general</b>	<b>155</b>	<b>5.107,7</b>

Fuente: Elaboración propia sobre la base de información de derechos de aprovechamiento de aguas concedidos, DGA 2014.

Al analizar la naturaleza de las aguas se comprobó que principalmente los derechos concedidos en la cuenca corresponden a aguas subterráneas, luego a superficial y corriente y finalmente a superficial y detenida. Según la fuente del recurso hídrico 96 registros corresponden a acuífero, 11 a quebrada, 30 a río/estero y 18 a vertiente.

En la Tabla 5-2 se presentan los caudales promedio concedidos según la naturaleza del recurso hídrico donde la explotación principal proviene del recurso subterráneo (60%), dejando cerca de un 39% a los derechos de aprovechamiento de aguas de naturaleza superficial y corriente.

**Tabla 5-2 Caudales otorgados según naturaleza del agua**

Naturaleza del Agua	Total (L/s)	Porcentaje (%)
Subterránea	3.075,7	60,2%
Superficial y Corriente	1.972,0	38,6%
Superficial y Detenida	60,0	1,2%
<b>Total general</b>	<b>5.107,7</b>	<b>100%</b>

Fuente: Elaboración propia sobre la base de información de derechos de aprovechamiento de aguas concedidos, DGA 2014.

La Tabla 5-3 presenta los datos de caudales según su fuente de abastecimiento y la Figura 5-2 muestra la distribución espacial de éstos. Se observa que la principal fuente que sustentan los derechos de aprovechamiento de aguas concedidos corresponde al sistema acuífero, de los alrededores del poblado

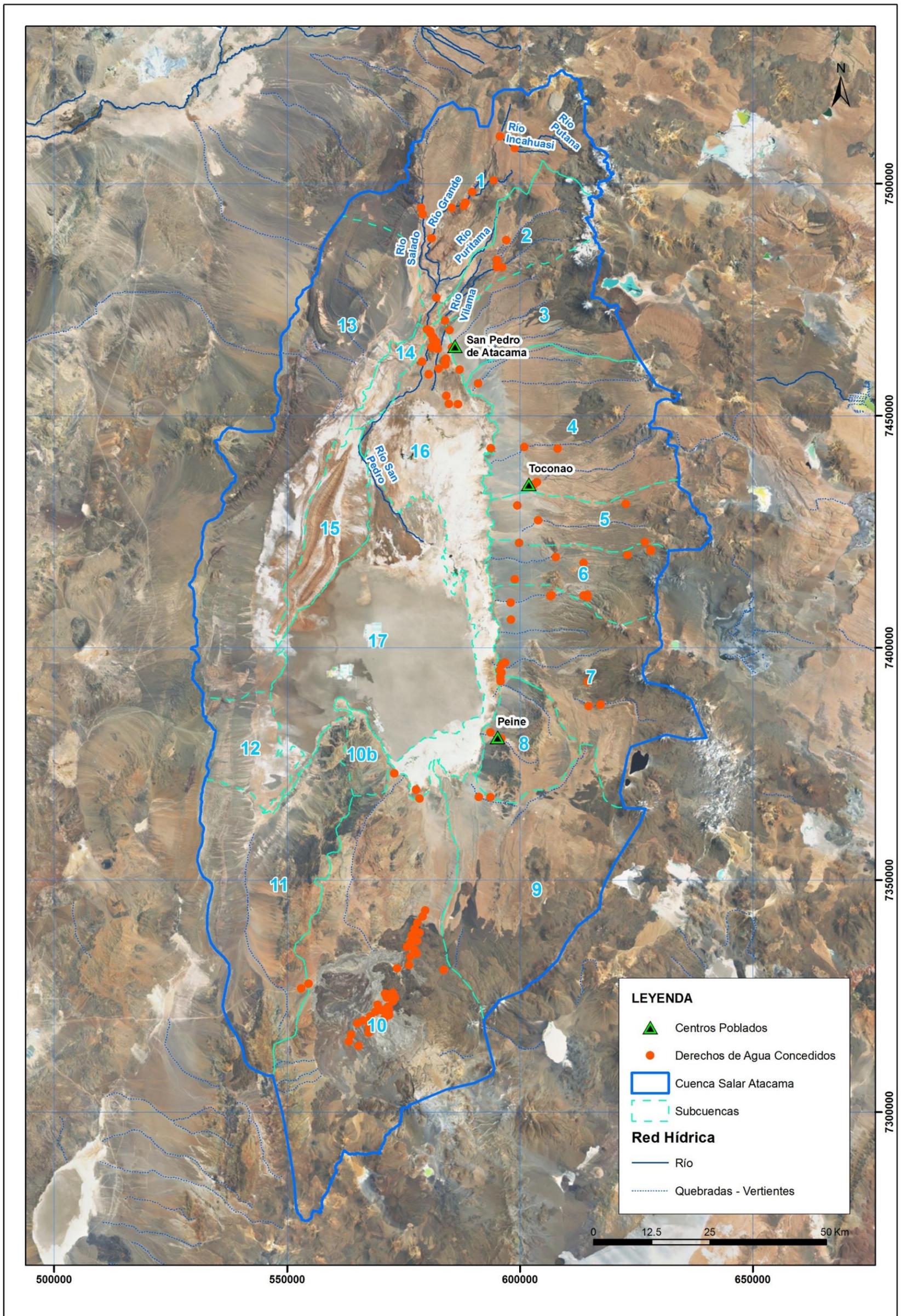
	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

de San Pedro de Atacama, así como del Borde Este del núcleo del Salar y del extremo Sur de la Cuenca. Respecto a las fuentes superficiales, los principales derechos se encuentran en los ríos tributarios del San Pedro y el Vilama en el sector Norte de la Cuenca. Otras fuentes superficiales, como son quebradas y vertientes se concentran mayoritariamente en toda la franja Este de la Cuenca.

**Tabla 5-3 Caudales otorgados según Fuente de Abastecimiento**

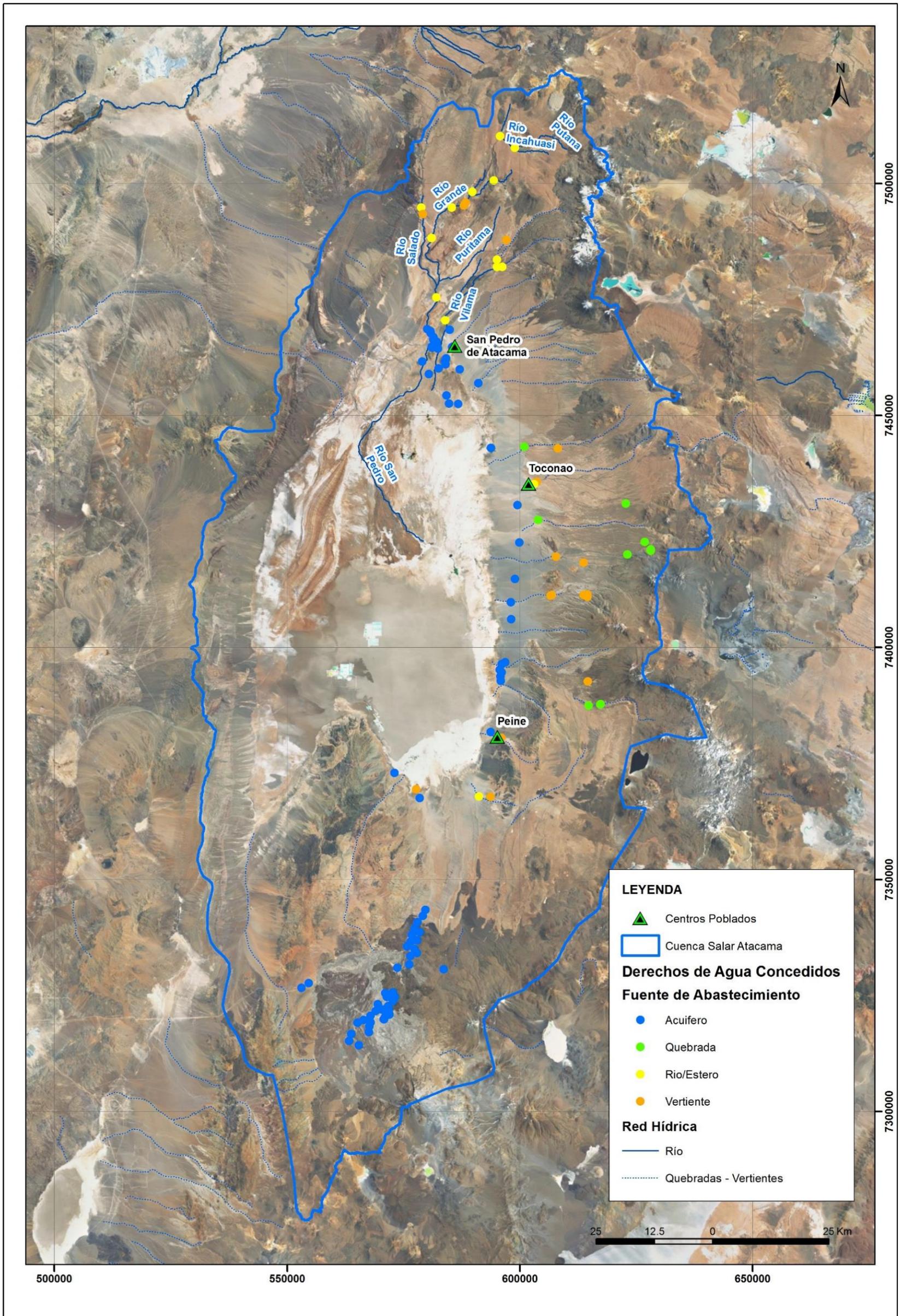
Fuente de Abastecimiento	Total	Porcentaje
Vertiente	112,2	2,2%
Quebrada	399,8	7,8%
Rio/Estero	1.520,0	29,8%
Acuífero	3.075,7	60,2%
<b>Total general</b>	<b>5.107,7</b>	<b>100%</b>

**Figura 5-1 Distribución Derechos de Agua otorgados en la cuenca del Salar del Atacama**



Fuente: Elaboración propia sobre la base de información de derechos de agua concedidos, DGA 2014.

Figura 5-2 Distribución Derechos de Agua de acuerdo a su fuente de abastecimiento



Fuente: Elaboración propia sobre la base de información de derechos de aprovechamiento de aguas concedidos, DGA 2014.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

En cuanto al uso al que están destinados los derechos de aprovechamiento de aguas otorgados, se observa que 53 expedientes corresponden a uso minero con un total de 2.315 L/s, 24 a riego con un total 1.572 L/s, 1 a uso industrial con 8,5 L/s, 28 a otros usos con 388,5 L/s, 2 a bebida/uso doméstico/saneamiento con un total de 5,5 L/s y 47 registros no presentan información respecto este ítem (en blanco).

Esta distribución de los caudales concedidos en la cuenca del Salar del Atacama de acuerdo al uso de las aguas se muestra en la Tabla 5-4.

**Tabla 5-4 Caudales concedidos según uso del agua**

Uso del Agua	Total (L/s)	Porcentaje (%)
Bebida/Uso Doméstico/Saneamiento	5,5	0,1%
Uso Industrial	8,5	0,2%
Otros Usos	388,5	7,6%
Riego	1.572,8	30,8%
Uso Minero	2.315,3	45,3%
En Blanco	817,1	16,0%
<b>Total general</b>	<b>5.107,7</b>	<b>100%</b>

Fuente: Elaboración propia sobre la base de información de derechos de agua concedidos, DGA 2014.

De acuerdo con esta información el uso que predomina en los derechos de aprovechamiento de aguas otorgados es el minero y luego el riego. Como se mencionó anteriormente respecto de una cantidad importante de los derechos de aprovechamiento de aguas no se especifica su uso, aunque se estima que mayoritariamente corresponden también a estos dos usos principales. Los usos destinados a bebida/uso doméstico/saneamiento y uso industrial son los que abarcan una menor proporción de los caudales concedidos y como se mencionó anteriormente se relacionan principalmente con la actividad minera.

La distribución espacial de los diferentes usos de las aguas declarados para los derechos de aprovechamiento concedidos se presentan en la Figura 5-3. En ella se observa una concentración importante que se usa para riego en el sector Norte de la Cuenca y que se relaciona con la formación de vegas y pequeños valles en torno a los cauces de los ríos San Pedro, Vilama y sus afluentes, hasta llegar a los alrededores del poblado de San Pedro de Atacama. Los otros sectores donde se observa el uso del recurso para riego son Toconao y Socaire.

En el sector Sur de la cuenca se concentra una cantidad importante de derechos de aprovechamiento de aguas otorgados cuyo uso se relaciona con el sector minero, fundamentalmente con las compañías Minera Escondida y Minera Zaldívar. El resto de los derechos de aprovechamiento de aguas destinados a uso minero se encuentran en el Borde del núcleo de Salar mayoritariamente en el Borde Este del mismo, correspondientes a SQM y en el Borde Sur a Rockwood.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

Se observa que sólo dos de los derechos de aprovechamiento de aguas otorgados se declaran como destinados a bebida/uso doméstico/saneamiento con un total de 5,5 L/s y uno de uso industrial de 8,5 L/s. De los 5,5 L/S otorgados para uso bebida/uso doméstico/saneamiento, 5,1 L/s fueron otorgados a Rockwood y 0,4 L/s a SENDOS II Región. Respecto a uso industrial los 8,5 L/s fueron otorgados a Rockwood. Se estima, en el caso de estos derechos, que su uso se relaciona con la actividad minera que la compañía realiza en el sector.

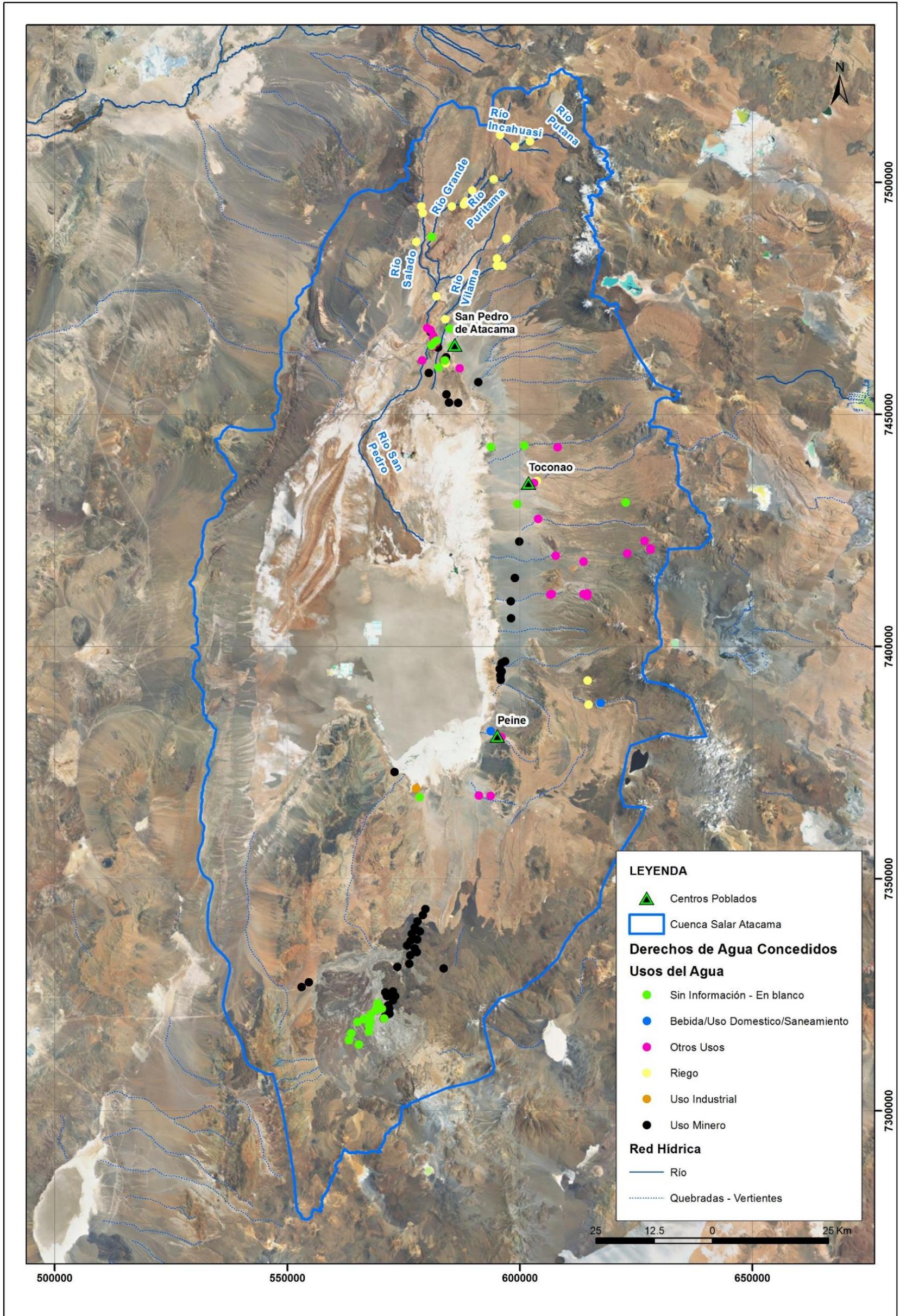
Finalmente, existen 78 expedientes en los que no se especifica el uso de las aguas o bien se relacionan con otros usos. Al identificar al solicitante se observa que los derechos sin uso especificado que se localizan en el sector Sur de la Cuenca se asocian a las compañías mineras Zaldívar y Escondida y por lo tanto se relacionan también con su uso para la minería.

Del resto de los derechos de aprovechamiento de aguas no especificados, aproximadamente 25, totalizan un caudal de 290 L/s entre subterráneos y superficiales, pertenecen a comunidades o asociaciones indígenas, particulares, inmobiliarias y hoteles, y principalmente se localizan en las cercanías de los poblados de San Pedro de Atacama, Toconao y Peine, y en los sectores más altos del lado oriental de la cuenca en quebradas y vertientes.

Así, de los 155 expedientes, los mayores caudales asignados corresponden a Minera Escondida y Minera Zaldívar y se trata de derechos de aprovechamiento de aguas subterráneos, en tanto que los otorgados a la “Comunidad Atacameña Rio Grande y Otros” (destinados a Riego) corresponden a derechos de aprovechamiento de aguas superficiales.

En el siguiente punto se presenta el análisis de los derechos de aprovechamiento de aguas que no presentan información sobre su uso y que, para este trabajo, fueron asignados a alguno de ellos considerando el nombre del solicitante y su actividad más probable.

**Figura 5-3 Distribución Derechos de Agua de acuerdo a su uso**



Fuente: Elaboración propia sobre la base de información de derechos de agua concedidos, DGA 2014.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

### 5.1.2 Reasignación de usos según nombre del solicitante

A partir del análisis de los expedientes y conforme se muestra en las estadísticas del punto anterior, se observó que al 23,6% de los derechos de aprovechamiento de aguas otorgados, equivalentes a 1.206 L/s no consta el uso al que se encuentran destinados, es decir, se encontraban en blanco y clasificados como otros usos. No obstante, se observó que muchos de los derechos clasificados como otros usos tienen como solicitantes compañías mineras, principalmente las compañías Minera Escondida y Minera Zaldívar, por lo que para los fines de este trabajo, tales derechos fueron reasignados como de uso minero. Los derechos de aprovechamiento de aguas que se encontraban en blanco y que la información contenida en la base de datos de DGA no entrega señales sobre el uso posible al que se encuentran destinados esos caudales, por lo que para los fines de este trabajo, fueron reclasificados como de otros usos.

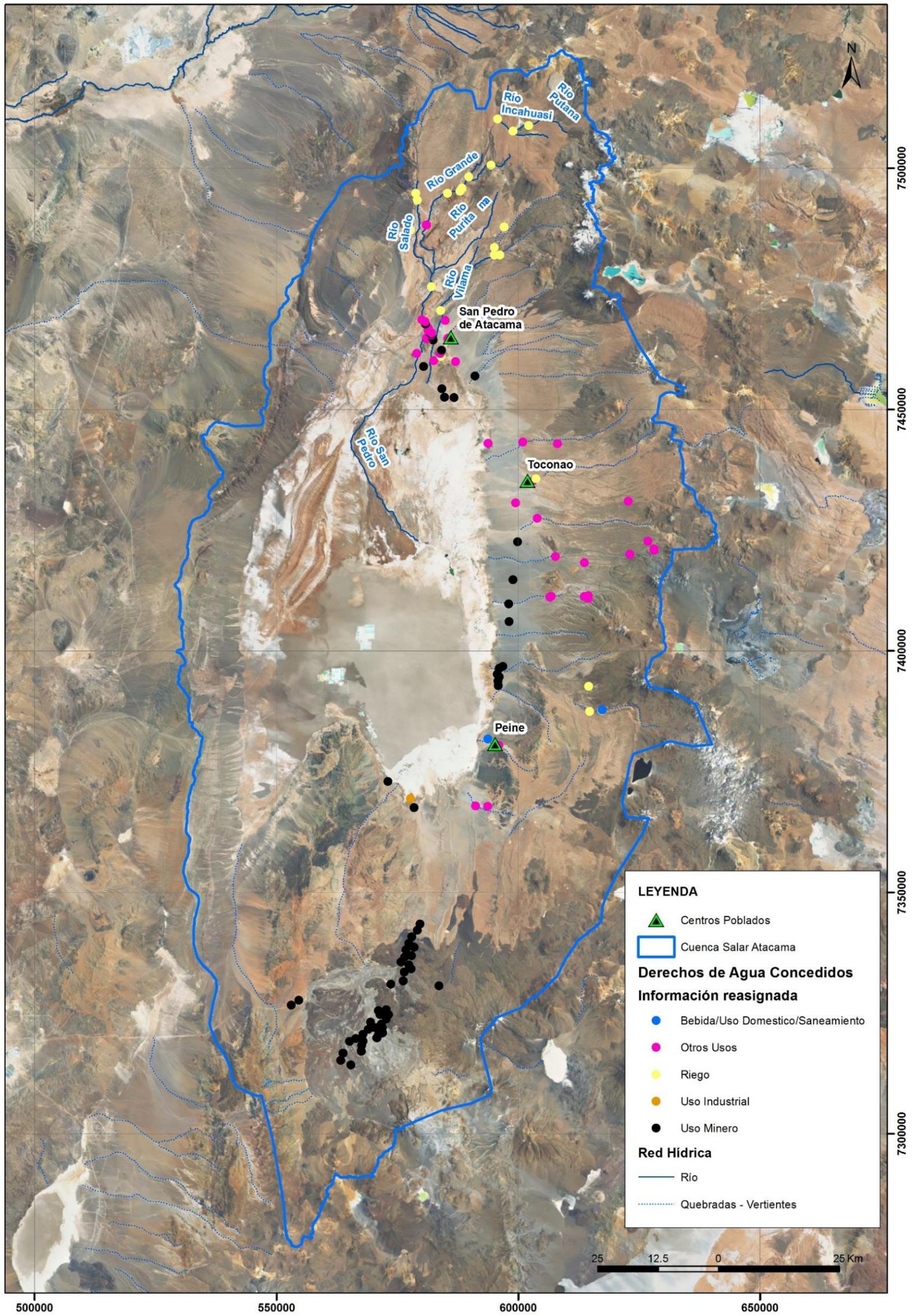
De esta manera, la Tabla 5-5 presenta los caudales de todos los derechos de aprovechamiento de aguas otorgados en la Cuenca, recalculados según uso de las aguas. Conforme queda consignado en ella, más del 55% de los derechos de aprovechamiento de aguas otorgados en el Salar tienen como destino el uso minero. Luego un 31%, aproximadamente, tienen como destino el uso para riego y al porcentaje restante le ha sido asignado el destino otros usos no especificados. La distribución espacial de este análisis se presenta en la Figura 5-4, el cual incluye los derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas y superficiales.

**Tabla 5-5 Caudales reasignados según uso de las aguas**

Uso de las aguas	Total (L/s)	Porcentaje (%)
Bebida/Uso Doméstico/Saneamiento	5,5	0,1%
Uso Industrial	8,5	0,2%
Otros Usos	681,9	13,4%
Riego	1.572,8	30,8%
Uso Minero	2.839,0	55,6%
<b>Total general</b>	<b>5.107,7</b>	<b>100%</b>

Fuente: Elaboración propia sobre la base de información de derechos de aprovechamiento de aguas concedidos, DGA 2014.

**Figura 5-4 Distribución espacial de los derechos de aprovechamiento de aguas luego de reasignar su uso de acuerdo a nombre del solicitante**



Fuente: Elaboración propia sobre la base de información de derechos de aprovechamiento de aguas concedidos, DGA 2014.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

Del análisis de los derechos de aprovechamiento de aguas destinados al uso minero, se obtiene que el mayor porcentaje, corresponde a la Compañía Minera Escondida, con un 38,6% del total del caudal, le sigue la Compañía Minera Zaldívar, con un 22,0%, y luego SQM, con un 15,9%. Los derechos de aprovechamiento de aguas de uso minero otorgados a Rockwood representan el 0,8% del total.

**Tabla 5-6 Análisis de caudales otorgados para uso minero**

Compañía	Caudal (L/s)	Porcentaje (%)
ROCKWOOD	23,5	0,8%
SQM	450,0	15,9%
CMZ	625,3	22,0%
MEL	1.094,9	38,6%
Otros	645,0	22,7%

Fuente: Elaboración propia sobre la base de información de derechos de aprovechamiento de aguas concedidos, DGA 2014.

La Tabla 5-7 presenta los caudales otorgados según uso y naturaleza de las aguas. Se observa que el uso minero utiliza solamente agua subterránea, ocupando un 91,7% de la explotación subterránea de la Cuenca. Respecto al uso para riego, principalmente corresponde a agua superficial y corriente, abarcando un 79,89% del recurso proveniente de esta fuente.

**Tabla 5-7 Caudales según uso y naturaleza de las aguas**

Etiquetas de fila	Subterránea		Superficial y Corriente		Superficial y Detenida		Total general	
	L/s	%	L/s	%	L/s	%	L/s	%
Bebida/Usos Doméstico/Saneamiento	5,0	0,2	0,5	0,0	-	-	5,5	0,1
Otros Usos	229,7	7,5	392,2	19,9	60,0	100,0	681,9	13,4
Riego	2,0	0,1	1.570,8	79,7	-	-	1.572,8	30,8
Uso Industrial	-	-	8,5	0,4	-	-	8,5	0,2
Uso Minero	2.839,0	92,3	-	-	-	-	2.839,0	55,6
<b>Total general</b>	<b>3.075,7</b>	<b>100</b>	<b>1.972,0</b>	<b>100</b>	<b>60,0</b>	<b>100</b>	<b>5.107,7</b>	<b>100</b>

Fuente: Elaboración propia sobre la base de información de derechos de aprovechamiento de aguas concedidos, DGA 2014.

### 5.1.3 Porcentaje y Coeficientes de uso de los derechos de aprovechamiento de aguas

Considerando que para efectos de la modelación numérica se requiere contar con la información de extracción de aguas subterráneas lo más cercano a lo real posible, se han definido factores de uso previsible sobre los distintos derechos de aprovechamiento de aguas otorgados de acuerdo a la actividad que tienen declarada o que se ha podido asignar. La importancia de la determinación estos factores radica en que lo normal es que los derechos de aprovechamiento no sean utilizados en forma continua, si no que responden a necesidades operativas de los diversos ámbitos para los cuales se destina este recurso.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

Estos factores han sido determinados a partir del análisis de los diferentes factores utilizados en estudios previos de la DGA, en las regiones del Norte del país, y que se listan a continuación:

- Determinación de la Disponibilidad de Recursos Hídricos para Constituir Nuevos Derechos de Aprovechamiento de Aguas Subterráneas en el Sector del Valle de Azapa, I Región. SDT N° 109, 1996.
- Evaluación de la Disponibilidad del Recurso Hídrico Subterráneo en el Acuífero de la Parte Baja del Río Lluta, Arica, I Región. SDT N° 114, 1998.
- Determinación de la Disponibilidad de Recursos Hídricos para Constituir Nuevos Derechos de Aprovechamiento de Aguas Subterráneas en el Sector del Acuífero de la Pampa del Tamarugal, I Región. SDT N° 68, 1996.

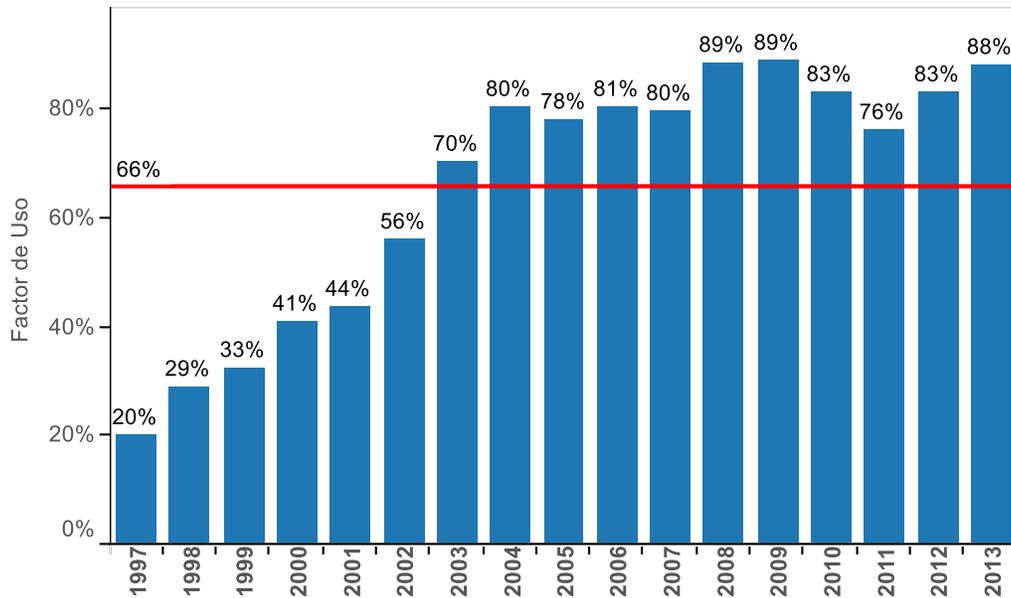
Se observa que más del 90% de los derechos de aprovechamiento de aguas de carácter subterráneo son de uso minero, y respecto de la mayoría de ellos (77%) se conocen los caudales reales de explotación, por cuanto son publicados en los reportes periódicos que emiten las empresas mineras, generalmente en el marco de sus compromisos ambientales con la autoridad. En el caso de la cuenca del Salar del Atacama, para los derechos otorgados a las compañías Minera Escondida, Minera Zaldívar, SQM y Rockwood, no es necesario aplicar un factor de uso, debido a que se conocen sus extracciones reales.

En lo referido a los restantes derechos de aprovechamiento de aguas clasificados como de uso minero otorgados a otras compañías respecto de los cuales se desconoce el porcentaje de uso, se ha considerado un coeficiente de uso calculado en base al promedio ponderado de las extracciones reales y conocidas de las empresas antes señaladas. Los caudales otorgados para uso minero muestran en la Tabla 5-6 anterior.

Estos promedios se calcularon utilizando la información de extracciones de agua desde el año 1997 al 2013, considerando los derechos de aprovechamiento de aguas otorgados que se encontraban vigentes en cada año y para cada compañía.

De acuerdo al análisis realizado, el promedio de explotación de los derechos de aprovechamiento de aguas otorgados en el sector minero es de sólo un 66%. Este valor se explica por la menor explotación realizada, por estas compañías, entre los años 1997 y 2002, que en esos años no superó el 50% de explotación de los derechos. A partir del año 2003 se observa un aumento en las extracciones, comenzando a superar el 70% de los caudales otorgados (Figura 5-5). Si bien el promedio de 66% es menor que el indicado en la bibliografía consultada que estima un 75% de uso, se considera que el análisis realizado entrega una cifra más realista de la utilización histórica del recurso destinado a minería en la cuenca.

**Figura 5-5 Porcentaje de explotación Derechos de agua destinado a minería**



Fuente: Elaboración propia sobre la base de información de derechos de aprovechamiento de aguas concedidos, y datos de bombeos de agua dulce obtenidos de las compañías MEL, CMZ, SQM y Rockwood Lithium.

Respecto de los derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas otorgados y destinados a riego, dado que no se conoce el detalle de los cultivos (tipo de cultivo y coeficiente asociado, tecnificación del riego, etc.) se ha considerado un porcentaje de uso promedio del 40%, estimado realista para la cuenca y se basa en los estudios realizados por la DGA en otras cuencas del Norte del país, que han sido citados precedentemente. En cualquier caso, esta categoría comprende un porcentaje menor de los derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas (0,1%).

Finalmente, respecto a los derechos de aprovechamiento de aguas otorgados para el área industrial y bebida/uso doméstico/saneamiento, sus caudales fueron incluidos dentro del uso minero, ya que los derechos otorgados en esa categoría corresponden mayoritariamente a Rockwood y el destino de la explotación realizada se relaciona con la actividad minera, salvo en el caso de los 0,47 L/s otorgados a SENDOS II Región que corresponden a bebida / uso doméstico / saneamiento, para el cual se utilizó un factor del 75%.

La Tabla 5-8 presenta el listado completo de los factores definidos en este trabajo para cada uso, donde se observa que para los otros usos no identificados se adoptó un 75%.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

**Tabla 5-8 Factores de uso de Derechos de Aprovechamiento de Aguas Subterráneas**

Uso	Porcentaje de uso (%)
Bebida/Uso Doméstico/Saneamiento	75
Riego	40
Uso Minero	real declarado o coeficiente
Otros usos	75

Fuente: Elaboración propia sobre la base de los estudios de la DGA anteriormente mencionados.

Estos factores y coeficientes han sido utilizados en el cálculo de la recarga de la cuenca del Salar, según da cuenta el punto “9.3.3 Balance hídrico mensual” del presente estudio. En la Tabla 5-9 se muestra la estimación de la demanda en el Salar (caudales extraídos) aplicando el factor para cada uso.

**Tabla 5-9 Aplicación de los factores de uso a los derechos subterráneos otorgados**

Uso del Agua	Caudal Otorgado (L/s)	Porcentaje de uso (%)	Caudal Estimado (L/s)
<b>Uso Minero</b>			
MEL	1.095	Explotación real por año*	
CMZ	625		
ROCKWOOD	24		
SQM	450		
Otros	645		66
<b>Riego</b>	2	60	1,2
<b>Bebida/Uso Doméstico/Saneamiento</b>	5	75	3,8
<b>Otros Usos</b>	230	75	172
<b>TOTAL</b>	3.076		2.897

\*La explotación real de estas compañías se presenta en el punto 5.2 del presente capítulo

Fuente: Elaboración propia sobre la base de los estudios de la DGA anteriormente mencionados y la recopilación de derechos de agua otorgados.

Respecto de las aguas superficiales utilizadas como agua de riego factor de uso del 60%, lo que corresponde a un 40% de retorno al acuífero debido a las ineficiencias del regadío, supuesto utilizado por Geohidrología (2013a).

## 5.2 Explotación del acuífero vinculada a proyectos mineros

De acuerdo a lo que se describe en el punto 5.1.2. Reasignación de usos según nombre del solicitante, los principales usos de aguas en la cuenca corresponden al minero y al riego, los que en conjunto abarcan más del 85% de los derechos de aprovechamiento de aguas otorgados.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

A continuación se presenta el detalle de la extracción realizada por las distintas compañías mineras que tienen derechos de aprovechamiento de aguas constituidos en el acuífero salobre del borde Este y Sur del Salar y cuyos datos son reportados a las diferentes autoridades. Específicamente se presentan los datos de bombeos de agua de las compañías Minera Escondida (MEL), Minera Zaldívar (CMZ), SQM y Rockwood.

En el caso de MEL y CMZ, la extracción de aguas en el Sur de la cuenca ambas compañías cuentan con un convenio de colaboración que le permite a MEL acceder a la información de extracción realizada por CMZ. MEL concentra esta actividad en el sector denominado Monturaqui y CMZ la realiza en el sector denominado Negrillar. De acuerdo a la información obtenida desde la DGA y luego de analizar tanto los nombres de los solicitantes como la ubicación espacial especificada en los expedientes, se obtuvo que los derechos de aprovechamiento de aguas concedidos en total identificados para ambas compañías son cercanos a los 1720 L/s, aunque del documento de MEL (2011b) se entiende que la compañía podría tener derechos de aprovechamiento de más de 1.800 L/s, puesto que en este documento se indica que los derechos constituidos se podrán ejercer en la medida que:

- Los impactos generados durante la fase de bombeo y post-bombeo producto de la explotación de la unidad acuífera denominada Monturaqui-Negrillar-Tilopozo, no generen una disminución más allá de 25 cm del nivel freático en el sector de Tilopozo.
- La explotación en la referida unidad acuífera no genere una disminución más allá del 6% del flujo pasante a través del acuífero y que descarga en el sector de Tilopozo.
- Se establece además que con el ejercicio de los derechos constituidos, no podrán explotarse en la unidad acuífera denominada Monturaqui-Negrillar-Tilopozo, un caudal medio mensual superior a 1.800 L/s.

SQM, por su parte, tiene derechos de aprovechamiento de aguas por un caudal máximo de 450 L/s, los cuales se encuentran distribuidos en 10 pozos ubicados en el Borde Este del Salar. De estos derechos 5 han sido recientemente otorgados, lo que significó un aumento de caudal autorizado de 240 L/s a los 450 L/s antes mencionados. Los datos disponibles de esta compañía indican que su explotación actual es muy cercana al uso total del caudal otorgado correspondiente a los 5 pozos actualmente operativos, que es de 240 L/s. De los nuevos derechos de aprovechamiento de aguas otorgados no se tiene certeza del inicio de su explotación y se encuentran condicionados a que se les otorgue la autorización ambiental correspondiente, algo que en la fecha de realización de este estudio no se ha producido.

La explotación de los derechos de aprovechamiento de aguas por parte de SQM es variable en el tiempo y tiene relación con las necesidades operacionales de su planta de producción. De todas maneras como se observará en el punto 5.2.3 Explotación realizada por SQM, existe un aumento de explotación a partir del año 2008, situación que se relaciona con la puesta en marcha de su proyecto “Cambios y Mejoras de la Operación Minera en el Salar de Atacama”.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

Respecto a la explotación realizada por Rockwood, ésta se concentra en el Sur del Salar, en las cercanías del poblado de Peine y en los sectores Tilopozo y Tucúcaro. En total el caudal otorgado a esta compañía es de 23,5 L/s. Su explotación se relaciona con los requerimientos industriales y de abastecimiento al campamento de Rockwood en Peine.

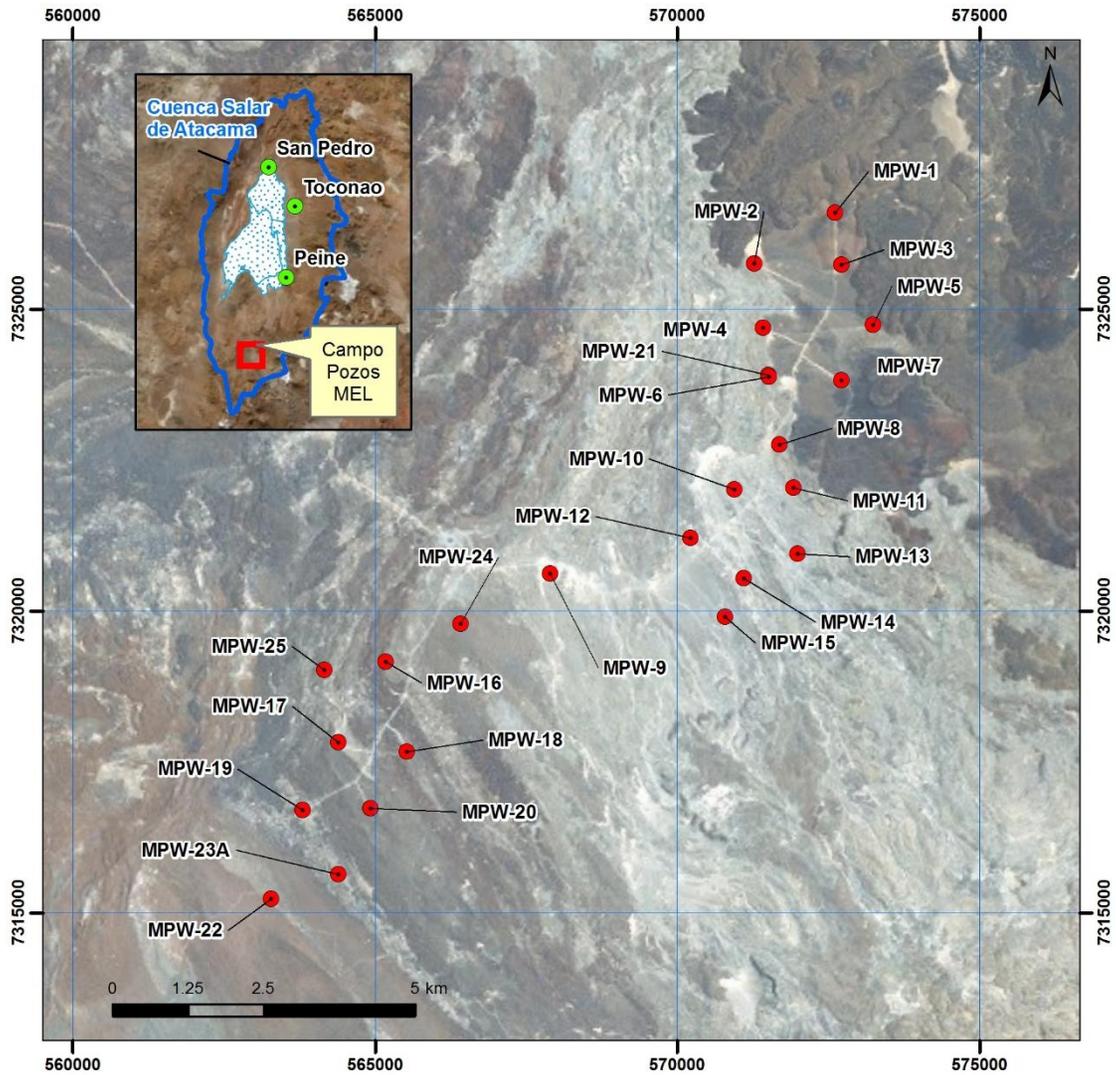
El detalle de la explotación del acuífero que realizan estas cuatro compañías, entregando la ubicación de sus pozos de bombeo y la estadística de éstos es el que se analiza a continuación.

### 5.2.1 Explotación del acuífero realizada por Escondida (MEL)

Como se ha mencionado previamente, MEL concentra su explotación en el Borde Sur de la Cuenca, principalmente en el sector de Monturaqui (Figura 5-6), con un campo de explotación conformado actualmente por 24 pozos en operación.

La Figura 5-7 muestra los caudales medios extraídos por MEL a partir del año 1998, observándose que a partir del año 2003 comienza a bombear un caudal promedio anual superior a los 1.000 L/s. De acuerdo a la revisión del “Plan de Alerta Temprana Para el Acuífero Monturaqui-Negrillar-Tilopozo: revisión de los datos de monitoreo, Informe N° 14 Revisión hasta fines de 2014”, la extracción anual realizada el año 2014 fue de 1.309 L/s y la programada para el año 2015 y 2016 es de 1.375 L/s para cada año. Para los años 2017, 2018 y 2019 el caudal extraído se estima también en 1.375 L/s cada año hasta alcanzar la disminución máxima del flujo pasante del 6% situación que se alcanza en torno al mes de Mayo de 2020.

**Figura 5-6 Ubicación del Campo de Pozos**

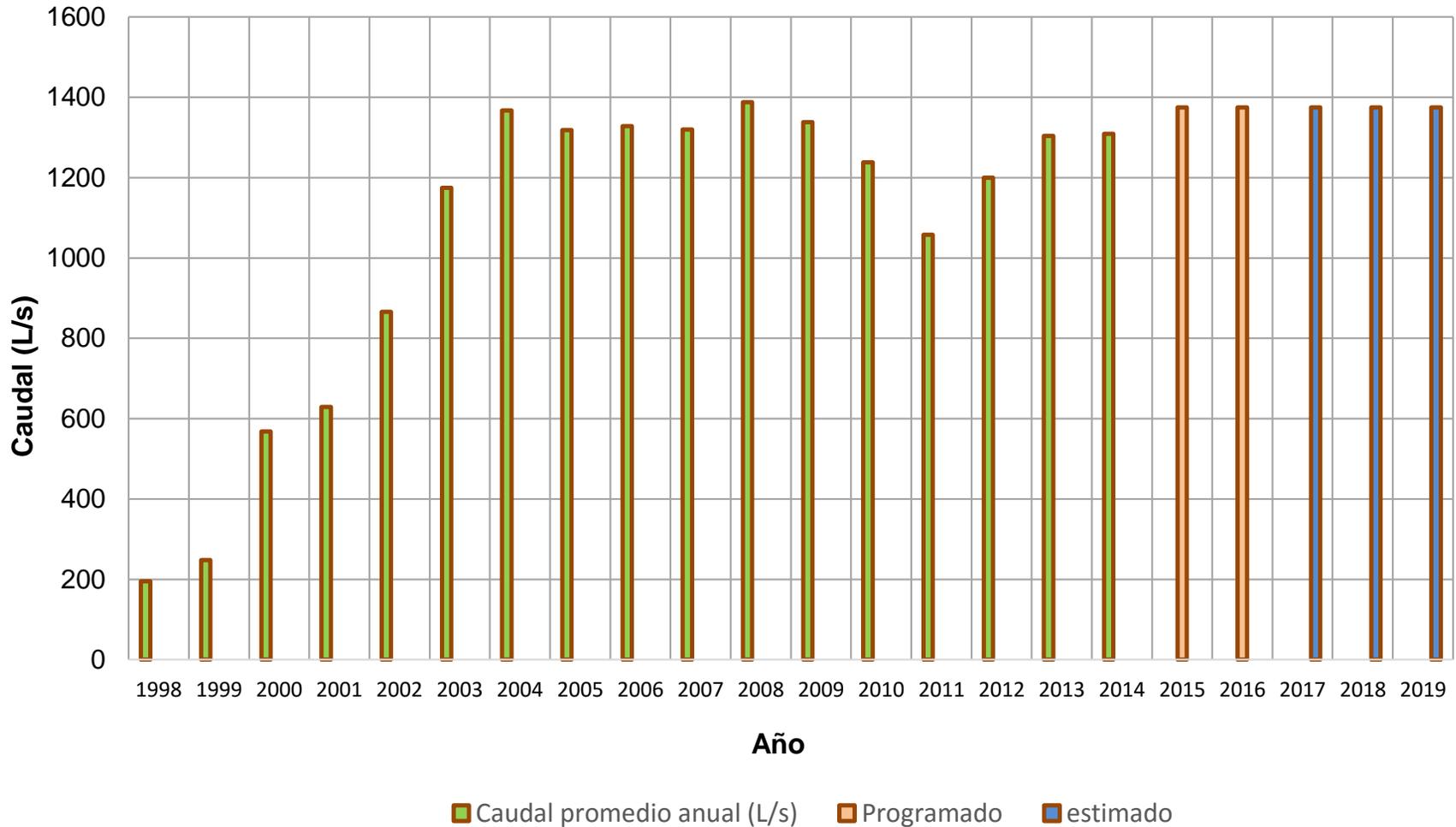


**Leyenda**

- Pozos de Bombeo MEL

Fuente: Elaboración propia con datos de terceros (MEL, 2012)

**Figura 5-7 Caudales medios anuales de bombeo Campo de Pozos MEL**



Fuente: MEL, 2015

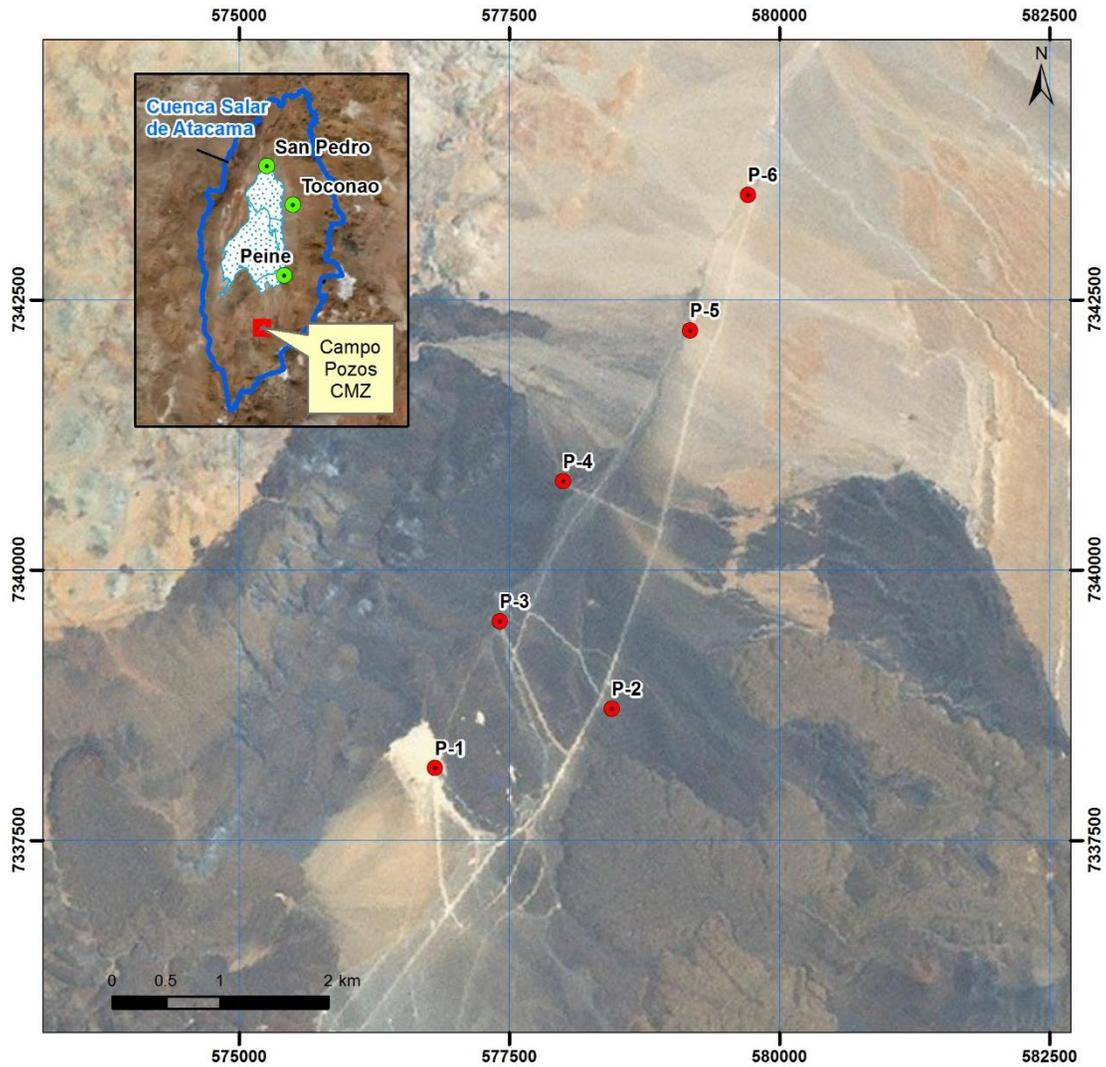
	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

### 5.2.2 Explotación realizada por Minera Zaldívar (CMZ)

Como se ha mencionado previamente la Minera Zaldívar concentra su explotación del acuífero en el área denominada Negrillar (Figura 5-8), donde se localizan 6 pozos de bombeo. El inicio de su explotación fue a mediados de 1995 extrayendo un caudal promedio de 180 L/s; desde 1996 hasta el 2005, la tasa promedio anual de bombeo fue del orden de 130 a 160 L/s; desde el año 2006 al 2010, en caudal extraído por esta empresa se incrementó a valores medios anuales del orden de 170 a 190 L/s. Desde 2011 el caudal bombeado se incrementó superando anualmente los 200 L/s de promedio, hasta el año 2014 donde el promedio anual fue 184 L/s (Figura 5-9).

De acuerdo al capítulo 2 del “Plan de Alerta Temprana Para el Acuífero Monturaqui-Negrillar-Tilopozo: revisión de los datos de monitoreo, Informe N° 14 Revisión hasta fines de 2014”, la extracción estimada en base a los últimos 2 años de extracción para los años 2015 y 2016 es de 200 L/s cada año. Para los años 2017, 2018 y 2019 el caudal extraído se estima también en 200 L/s cada año hasta alcanzar la disminución máxima del flujo pasante del 6% situación que se alcanza en torno al mes de Mayo de 2020.

**Figura 5-8 Ubicación del Campo de Pozos**

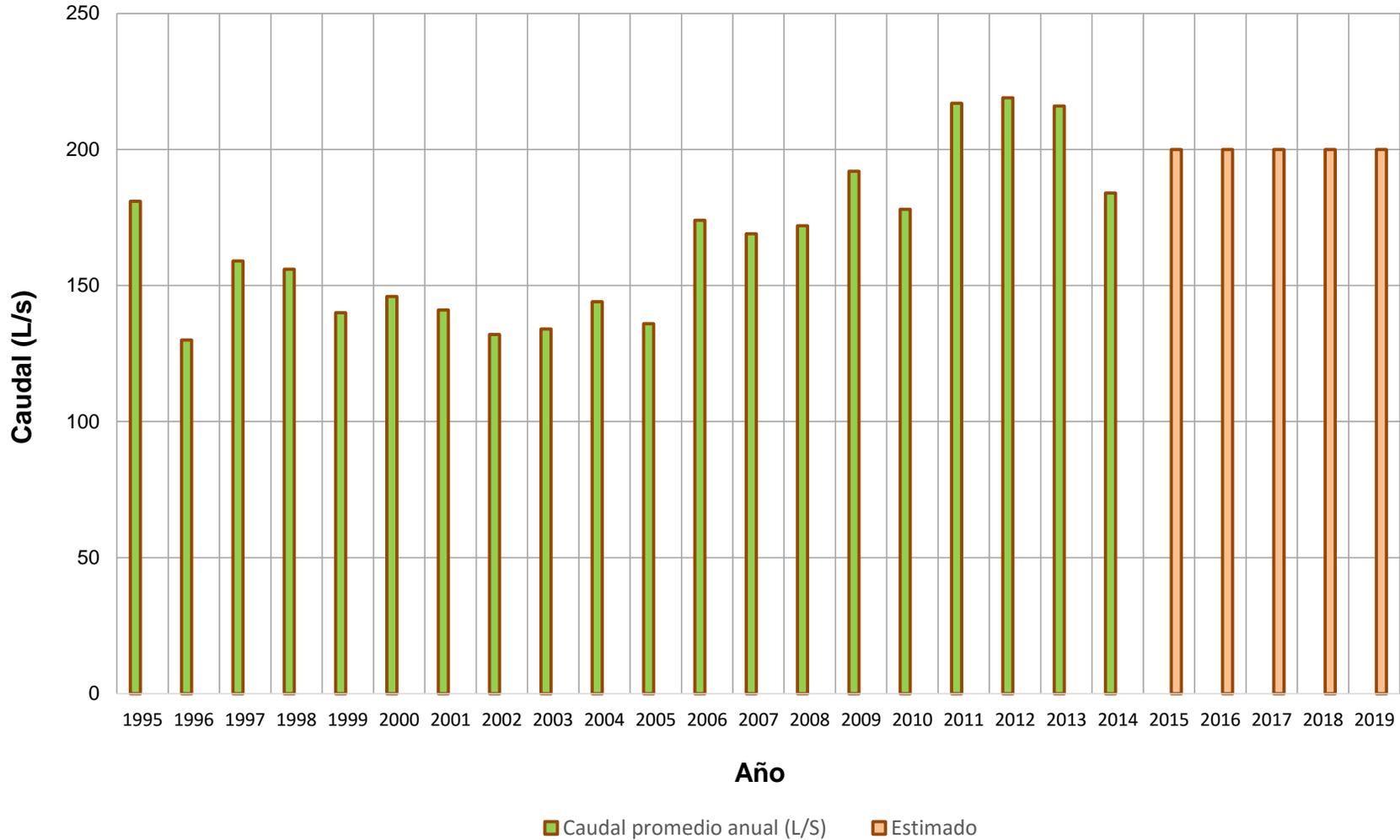


**Leyenda**

- Pozos de Bombeo CMZ

Fuente: Elaboración propia con datos de terceros (MEL, 2012)

**Figura 5-9 Caudales medios anuales de bombeo Campo de Pozos CMZ**

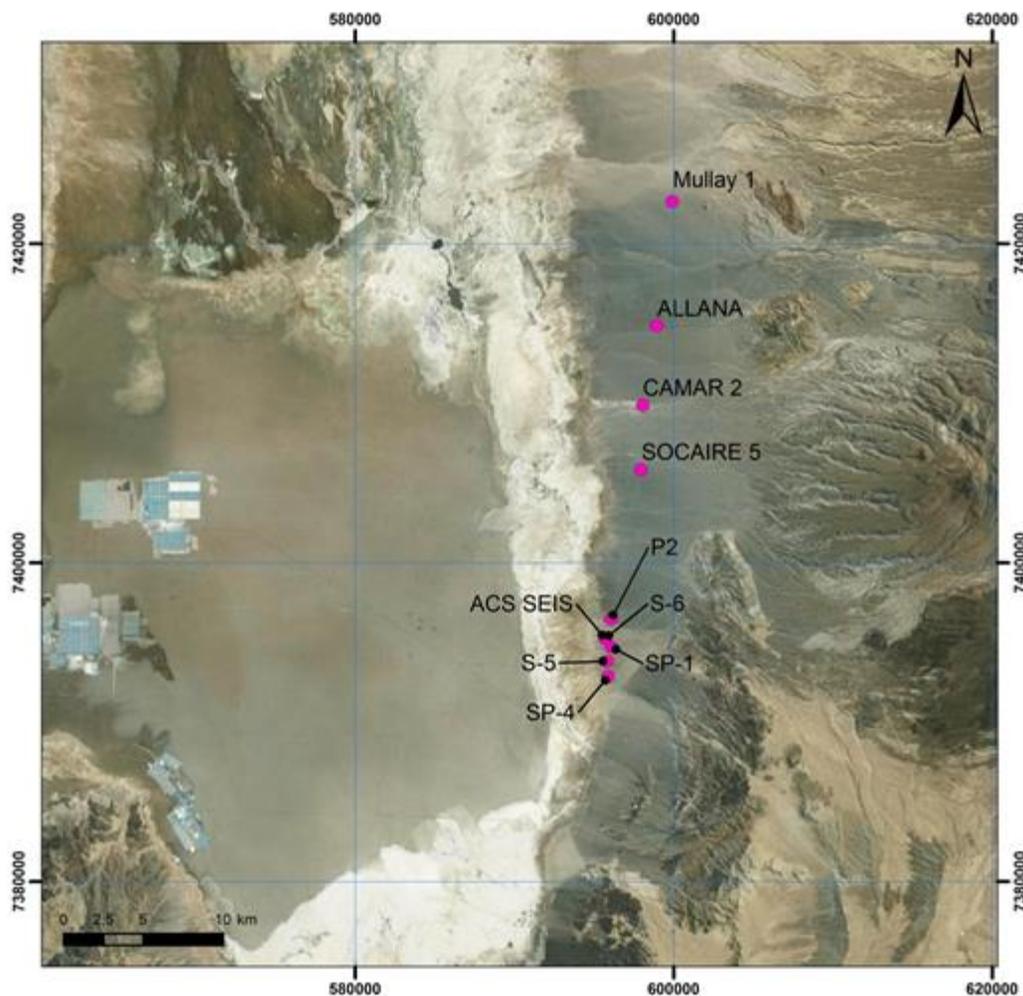


Fuente: MEL, 2015

### 5.2.3 Explotación realizada por SQM

SQM tiene derechos de aprovechamiento de aguas por un caudal máximo de 450 L/s, los cuales se encuentran distribuidos en 10 pozos ubicados en el Borde Este del Salar como se observa en la Figura 5-10. De ellos, los pozos, S-6, SP-1, SP-4, S-5 y ACS SEIS, que suman 210 L/s, no tienen autorización ambiental, por lo tanto no han sido considerados en la modelación hidrogeológica. De esta manera, cuentan con autorización de tipo ambiental los derechos otorgados a los otros 5 pozos de explotación, los que suman un total de 240 L/s.

**Figura 5-10 Ubicación Pozos de Agua de SQM**



**Leyenda**

- Pozos de agua industrial SQM

Fuente: Elaboración propia.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

En la Tabla 5-10, se presenta el código de expediente, fecha de resolución, coordenadas y el caudal máximo otorgado para cada pozo.

**Tabla 5-10 Pozos de Agua de SQM**

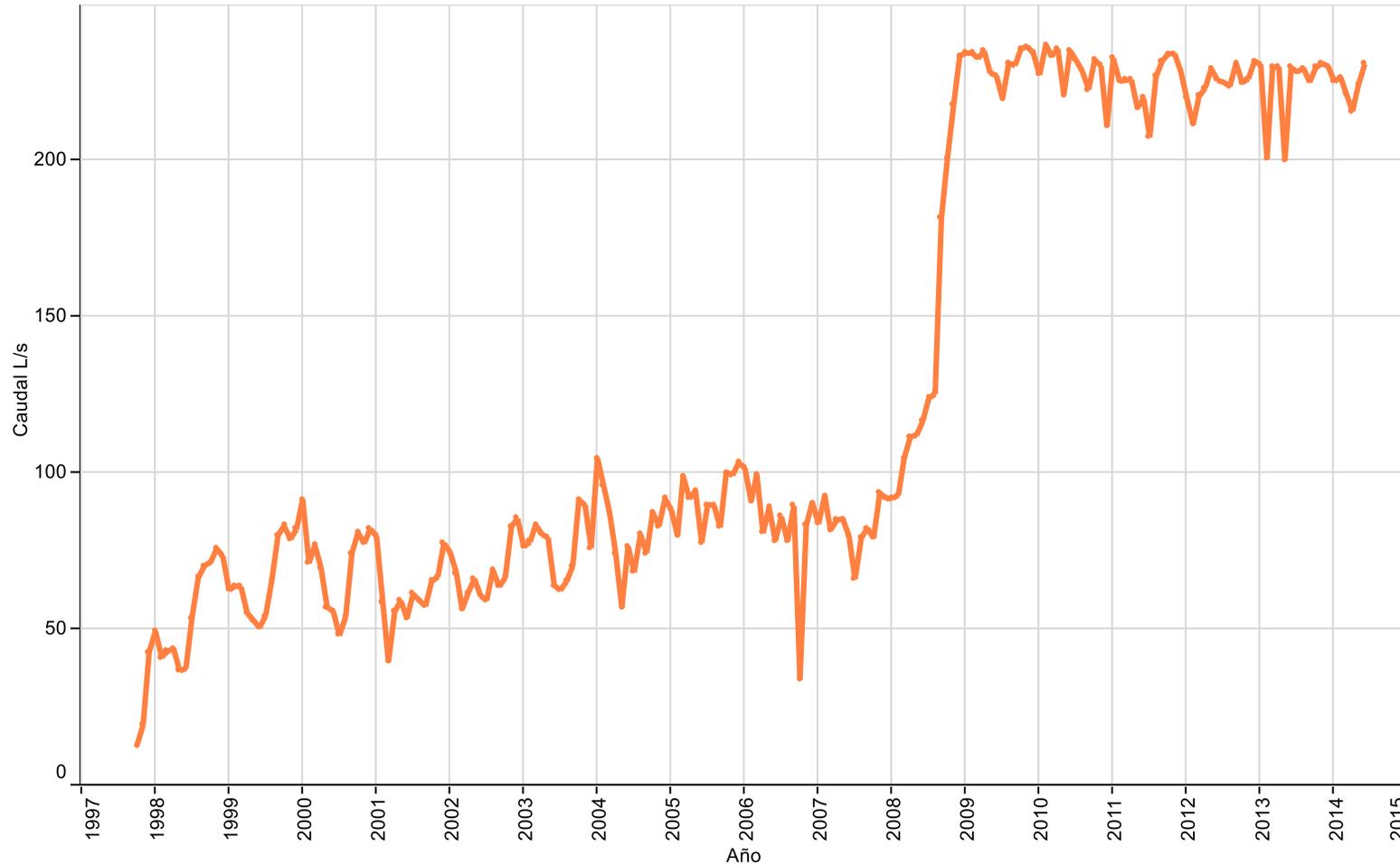
Nombre	Código de Expediente	Fecha de Resolución	WGS 84		Cota collar m.s.n.m	Caudal Autorizado (l/s)
			Este	Norte		
Mullay 1	ND-0202-2670	02/03/1988	599,918	7,422,647	2,406	40
CAMAR 2	ND-0202-2670	02/03/1988	598,048	7,409,857	2,382	60
ALLANA	ND-0202-2670	02/03/1988	598,933	7,414,864	2,406	40
SOCAIRE 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

Fuente: Elaboración propia con información de DGA, 2014

En cuanto al uso de los derechos de aprovechamiento de aguas, en la Figura 5-11 se presenta el caudal total de extracción de los pozos de agua salobre del acuífero Allana, Camar-2, P-2, Socaire 5B y Mullay 1. Para su elaboración se tomaron los datos de la referencia: Figura 2.21 Extracciones totales de agua dulce para el periodo comprendido entre noviembre de 1997 a diciembre de 1999, presentada en el Informe Final “Segunda Actualización del modelo de flujo de agua subterránea en el Salar de Atacama según RCA 226/2006”, completando la estadística entre enero de 2000 y junio de 2014 con la información proveniente del “Informe N° 15 del Plan de Seguimiento ambiental hidrogeológico Proyecto Cambios y Mejoras de la Operación Minera en el Salar de Atacama” .

**Figura 5-11 Extracción de pozos de Agua de SQM 1997 – 2014**



Fuente: Elaboración propia 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”.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

#### 5.2.4 Explotación realizada por Rockwood

Rockwood es titular de derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas permanentes y continuos en dos pozos ubicados en los sectores de Tilopozo y Tucúcaro, con caudales de extracción de 8,5 L/s, conforme a la Resolución Exenta N°316/1983 y de 10 L/s de acuerdo con la Resolución Exenta N°453/1996, ambas de la Dirección General de Aguas. El uso de estas aguas es de carácter industrial.

Adicionalmente, mediante la Resolución Exenta N° 584/2000, de la Dirección General de Aguas, fueron otorgados nuevos derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas por 5 L/s, a Rockwood para un pozo que se encuentra ubicado en el poblado de Peine, y que es utilizado para el abastecimiento de agua potable del campamento ubicado en esta localidad.

De acuerdo con lo anterior, los derechos de agua constituidos a favor de Rockwood, en el acuífero de agua dulce al borde del Salar suman 23,5 L/s, los cuales se muestran en la Tabla 5-11, en tanto que su ubicación espacial se presenta en la Figura 5-12.

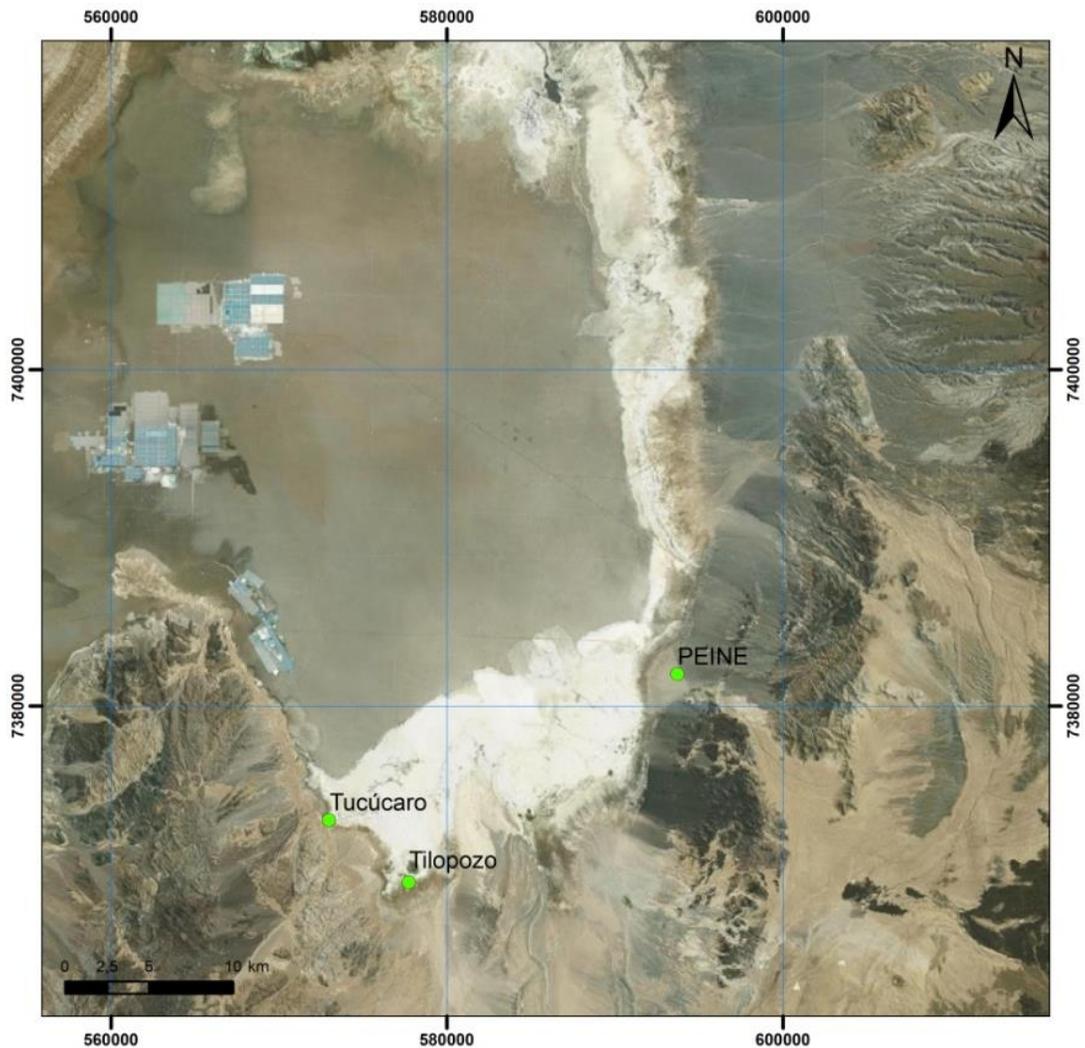
**Tabla 5-11 Pozos de Agua Industrial y potable Rockwood**

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

Fuente: elaboración propia

De los derechos de aprovechamiento en el pozo de Tilopozo y en la zanja de Tucúcaro, actualmente tienen autorización ambiental 10,9 L/s en conjunto en ambos puntos (según Res N°403/2013), y el Proyecto considera el aumento de dicho caudal en 6 L/s en conjunto en Tilopozo y Tucúcaro para su uso industrial en las instalaciones de Rockwood ubicadas en el Salar de Atacama. Este incremento de extracción no provoca efectos en los sistemas lagunares de La Punta La Brava como se ha demostrado mediante las pruebas de bombeo realizadas en los puntos de Tilopozo y Tucúcaro incluidas en el Apéndice D: “Determinación área de Influencia de Bombeo en el Pozo Tilopozo y en la Zanja de Tucúcaro”, de este Anexo

**Figura 5-12 Pozos de Extracción de Agua de Rockwood**



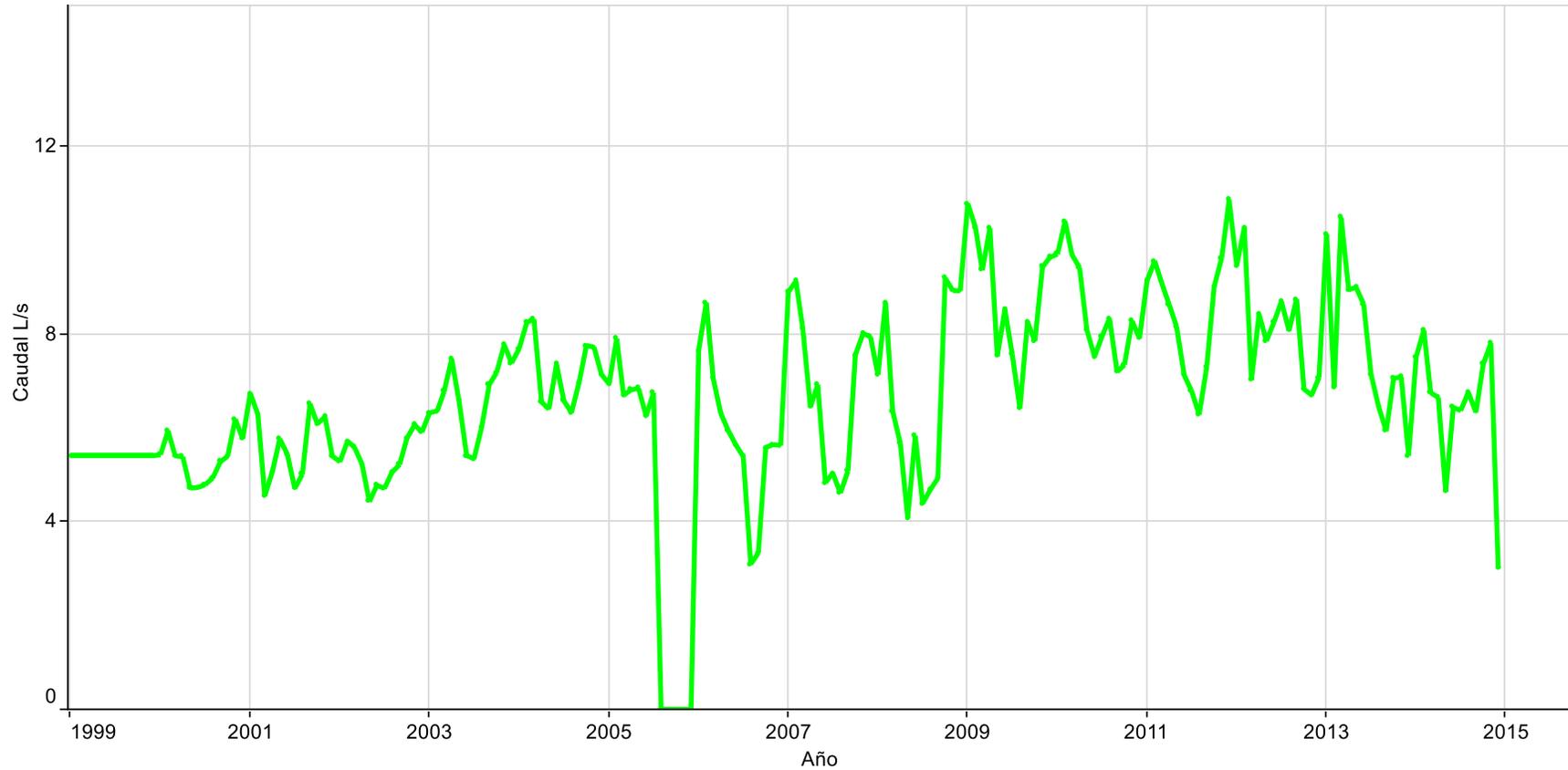
**Legenda**

- Pozos de agua industrial Rockwood

Fuente: Elaboración propia

La Figura 5-13 presenta la extracción de agua industrial realizada por Rockwood entre los años 1999 y 2014 y la Tabla 5-12 muestra el promedio histórico anual de extracción por cada pozo.

**Figura 5-13 Extracción de Agua de Rockwood entre 1999 y 2014**



Fuente: Elaboración Propia

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

**Tabla 5-12 Caudal (L/s) promedio anual bombeo Agua Dulce**

Caudal (L/s) bombeado por año																
Nombre	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
PEINE	-	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,74	0,62
TILOPOZO	5,40	5,33	5,65	4,33	3,93	4,59	3,03	4,50	5,71	4,72	7,41	6,93	6,54	6,82	2,24	3,77
TUCÚCARO	s/i	s/i	s/i	2,36	2,69	2,66	0,98	1,33	1,17	1,84	1,41	1,55	1,92	1,29	3,78	2,08
<b>Total general</b>	<b>5,40</b>	<b>5,33</b>	<b>5,65</b>	<b>6,68</b>	<b>6,62</b>	<b>7,25</b>	<b>4,01</b>	<b>5,83</b>	<b>6,88</b>	<b>6,56</b>	<b>8,82</b>	<b>8,48</b>	<b>8,46</b>	<b>8,11</b>	<b>7,76</b>	<b>6,47</b>

Fuente: Elaboración propia

### 5.3 Extracción histórica y actual de la salmuera (núcleo del Salar)

La explotación de la salmuera en el núcleo del Salar de Atacama se inició en el año de 1983 con el proyecto de la compañía minera Sociedad Chilena del Litio Limitada (hoy, Rockwood), con una extracción promedio anual de 48,6 L/s, caudal que fue incrementándose hasta alcanzar los 142 L/s al año, autorizados.

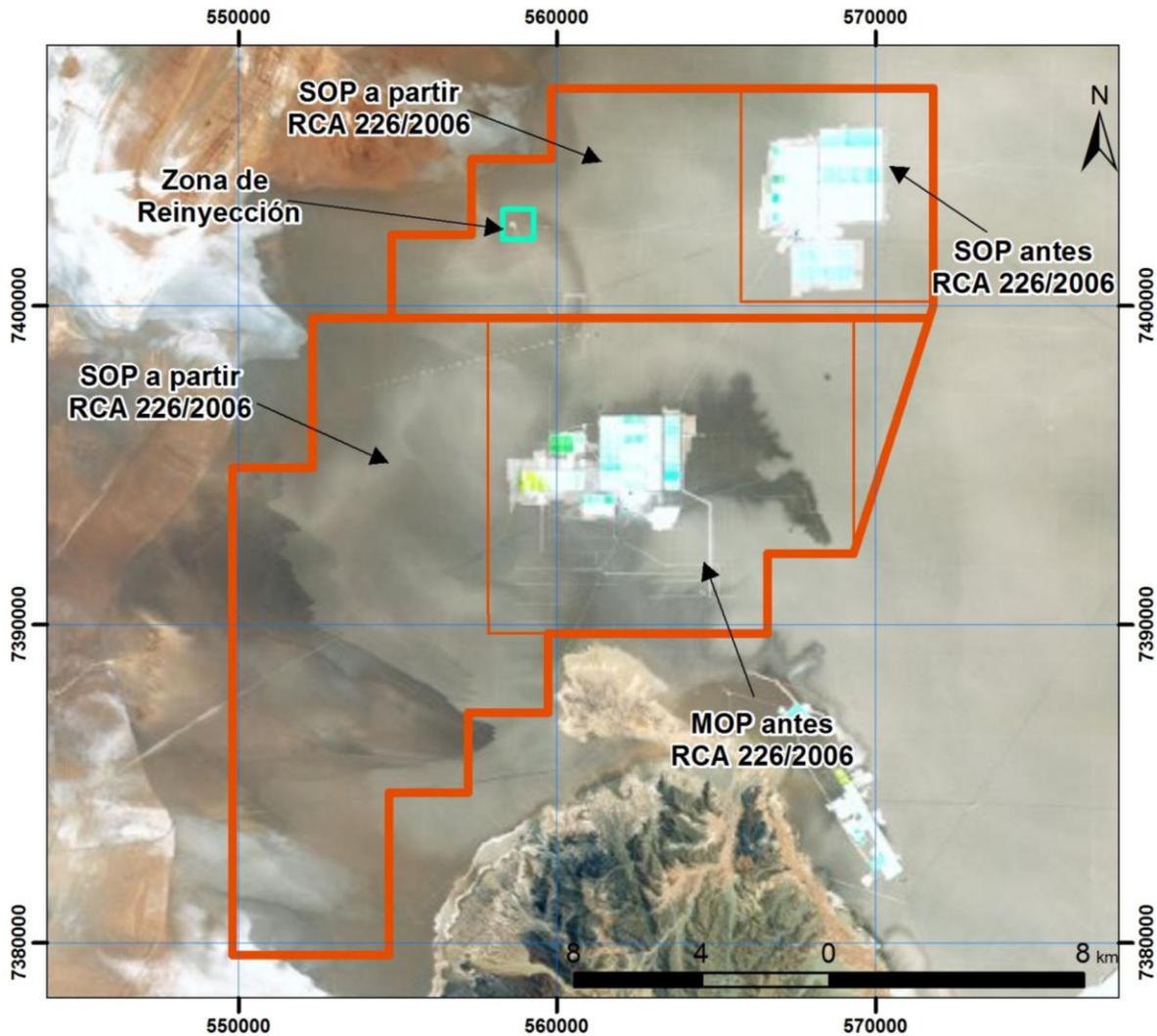
A partir del año 1994, la compañía minera Sociedad Minera Salar de Atacama (Minsal Ltda), hoy SQM Salar S.A., comenzó sus operaciones en el Salar, con una extracción promedio anual de 140 L/s de salmuera, caudal que fue aumentando gradualmente hasta alcanzar un volumen promedio anual de 1.500 L/s, en el presente año. Este volumen de extracción se proyecta incrementar hasta alcanzar los 1.700 L/s autorizados, en el último período de explotación contemplado en su esquema operacional. El detalle de estas extracciones se presenta a continuación.

#### 5.3.1 Extracción de SQM

SQM inició su actividad en el Salar de Atacama en el año 1993. Actualmente SQM posee permisos para explotar recursos minerales en un área de aproximadamente 196.000 hectáreas. Esos derechos incluyen 147.000 hectáreas de propiedad de CORFO y que son arrendadas a SQM Salar S.A. en virtud de un contrato de arrendamiento suscrito entre ambas partes, que expira en diciembre de 2030.

De acuerdo a los datos de la tabla III.1 del Anexo III “Registros Históricos y Análisis de la Información” del EIA presentado por SQM el año 2005, la explotación propiamente tal data de finales del año 1994. En aquel año en conjunto entre sus zonas de explotación (MOP y SOP) SQM extrajo cerca de 70 L/s, explotación que fue en aumento para fluctuar entre 90 y 420 L/s el año 1995. Desde comienzos del 2000 se observan mayores caudales extraídos, sin embargo es el año 2009 donde se produce un aumento en la producción debido a la entrada en operación del proyecto “Cambios y Mejoras de la Operación Minera en el Salar de Atacama” aprobado ambientalmente a través de la Resolución Exenta N° 0226/2006, de la Comisión Regional del Medio Ambiente de la II Región, que involucra además una mayor superficie de las antiguas áreas de extracción denominadas MOP y SOP, de 148 y 64 km<sup>2</sup> adicionales, respectivamente (Figura 5-14). En la RCA se indica que el incremento de la utilización de las futuras áreas MOP y SOP de extracción, que abarcan una extensión mayor hacia el Oeste del Núcleo, se realizará en forma gradual.

**Figura 5-14 Ubicación de las áreas de Extracción de Salmuera de SQM**



Fuente: Elaboración Propia en base a EIA SQM, 2004

La máxima extracción neta mensual por parte de SQM ocurrió en el mes de Noviembre de 2011, alcanzando valores de 1.799 L/s, dato que se obtiene de la diferencia de los valores mostrados en los gráficos de extracciones totales de salmuera y de las Inyecciones totales de salmuera, presentadas en el Informe Final “Segunda Actualización del modelo de flujo de agua subterránea en el Salar de Atacama según RCA 226/2006” realizado en el año 2013.

La Figura 5-15 muestra la extracción neta total de salmuera, que contiene las áreas de extracción MOP y SOP, y que corresponde a la diferencia entre el total bombeado de salmuera fresca y el total reinyectado al Salar, ya sea en forma directa (en lugares puntuales) o indirectamente (vía infiltración) para el periodo comprendido entre 1994 y 2013. Los datos entre 1994 y 2001 han sido extraídos de la tabla III.1 del Anexo

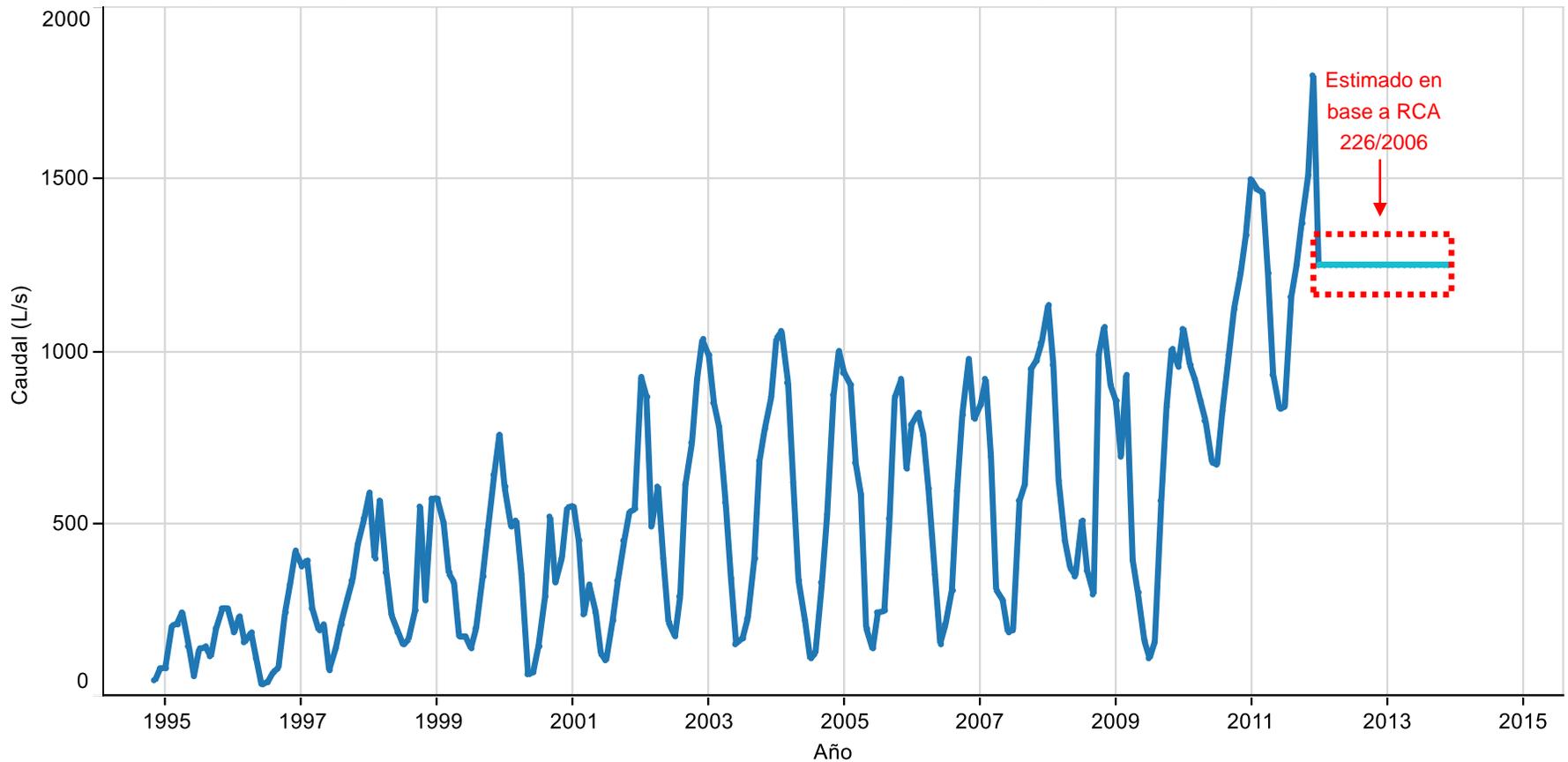
	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

III “Registros Históricos y Análisis de la Información” del EIA presentado por SQM el año 2005, luego, los datos entre 2002 y 2011 provienen de la Segunda Actualización del modelo de flujo de agua subterránea en el Salar de Atacama, entregado a la DGA como compromiso adquirido en la RCA N° 0226 de 2006. Para la información entre 2012 y 2013 se ha utilizado el esquema de aumento de extracción aprobado para SQM en la mencionada RCA.

Se ha decidido utilizar la información de SQM de la manera ya señalada, ya que la información entre los años 1994 y 2001 se presenta en el EIA del año 2005 en forma de tabla, por lo que corresponde a un valor numérico entregado por SQM. Respecto a la información entre los años 2002 y 2011 proviene de la digitalización de gráficos de extracción total y reinyecciones de salmuera presentados en el punto 2.5 de la Segunda actualización del modelo de flujo de SQM, con la cual se ha calculado la extracción neta (extracción total menos reinyección), por lo que corresponde a una aproximación del dato real.

Por otro lado, se aclara que los datos disponibles de extracciones de salmuera de SQM abarcan hasta el año 2011. Se espera contar con información actualizada próximamente, la cual será incorporada en futuras actualizaciones del presente Estudio Hidrogeológico.

**Figura 5-15 Explotación de salmueras de las áreas de extracción (MOP + SOP) de SQM entre 1994 y 2013**



**Observación:** Datos desde el año 1994 al 2001 obtenidos de la tabla III.1 del Anexo III del EIA del año 2005 y desde 2002 al 2011 de la diferencia de los valores mostrados en los gráficos de las figuras: (i) 2.18. Extracciones totales de salmuera por parte de SQM y (ii) Figura 2.19. Inyecciones totales de salmuera por parte de SQM, presentadas en el Informe Final “Segunda Actualización del modelo de flujo de agua subterránea en el Salar de Atacama según RCA 226/2006”.

Fuente: Elaboración propia

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

Para la extracción de Salmuera actual y futura, SQM solicitó en su EIA “Cambios y mejoras de la operación minera en el Salar de Atacama”, presentado en año 2005, un aumento de explotación de acuerdo a una regla operación, la cual se especifica en el Considerando 8 de la RCA N° 0226 de 2006. Esta regla aprueba un máximo caudal de extracción definido para cada área de explotación (MOP y SOP), la cual consiste en que, en el caso de que las operaciones de SQM no produzcan reinyección directa de salmuera (bitterns), ni desde el sector MOP ni SOP (reinyección total bitterns=0 L/s), SQM podrá bombear como máximo lo presentado en la Tabla 5-13 y Figura 5-16, lo cual gráficamente corresponde a un escalonamiento del aumento de producción, el cual se presenta en la Figura 5-16. Además en la RCA se indica que “esta regla operacional asegura que las tasas promedio anuales de bombeo no produzcan daño ambiental”.

El inicio del primer escalón de extracción de salmuera se ha establecido en el inicio del año 2009 debido a que de acuerdo al Informe de Visita Inspectiva realizada por la Autoridad ambiental el 18 de agosto de 2009, SQM informa que se había dado inicio al primer escalón de extracción de salmuera. Al no tener el antecedente exacto de esta fecha se ha adoptado como inicio el mes de agosto de 2009<sup>2</sup>. El fin de la explotación se ha establecido en diciembre de 2030, ya que corresponde a la fecha de expiración del contrato de arrendamiento de las pertinencias mineras que SQM tiene con la CORFO.

**Tabla 5-13 Caudales de Bombeo Máximos promedio anual de SQM**

Área de Extracción	Periodo (Año)	Caudal Máximo Promedio anual (L/s)
<b>MOP</b>	2009-2010	400
	2011-2014	800
	2015-2020	900
	2021-2027	950
	2028-2030	1.000
<b>SOP</b>	2009-2010	350
	2011-2014	450
	2015-2020	600
	2021-2027	650
	2028-2030	700

Fuente: Elaboración propia en base a RCA N° 0226 de 2006.

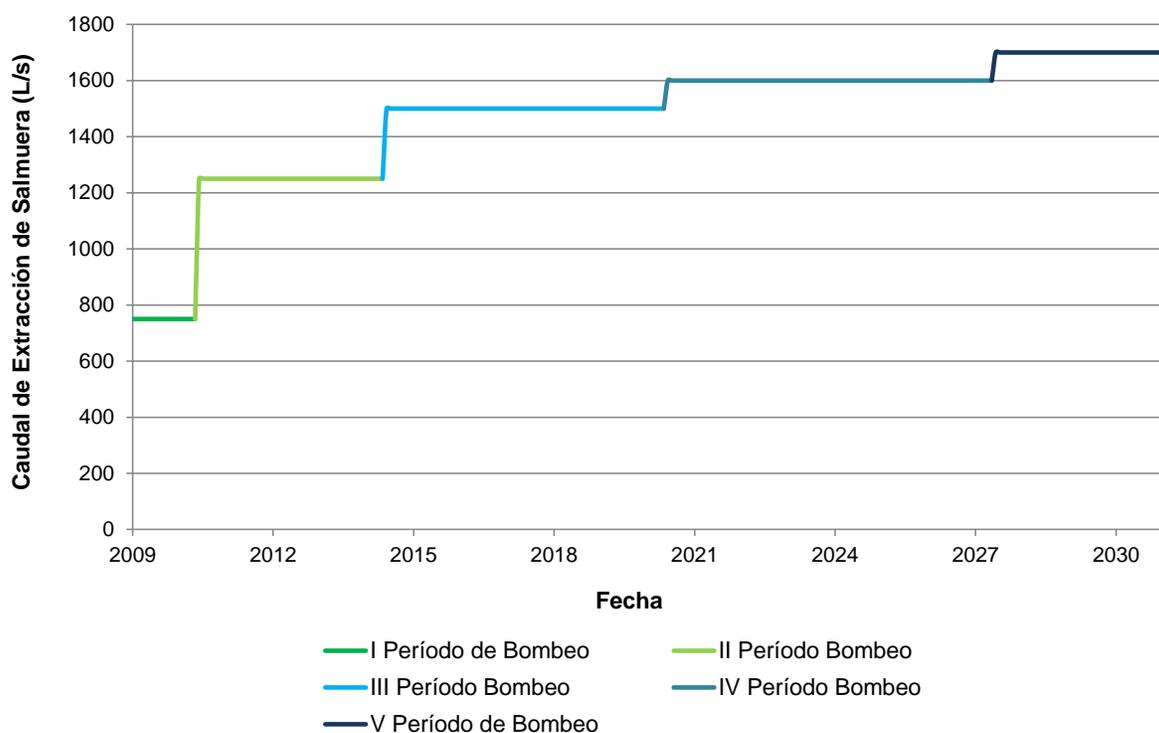
Sin embargo, dado que SQM sí reinyecta salmuera al Salar podrá bombear más salmuera fresca a medida que incremente sus reinyecciones en bitterns, de manera tal que el efecto ambiental sea el mismo al considerado en el escenario con reinyección total nula. La cantidad adicional de salmuera que podrá bombear a medida que reinyecta, es de 0,13 L/s adicionales desde el área MOP y 0,13 L/s desde el área SOP, por cada L/s total (MOP y SOP) que se reinyecte en forma directa (bitterns) hasta un total de 270 L/s (Considerando 8.3.7 de la RCA N° 0226 de 2006).

<sup>2</sup> El informe de esta Visita Inspectiva se encuentra disponible en la sección de Seguimiento y Fiscalización del EIA “Cambios y Mejoras de la Operación Minera en el Salar de Atacama” dentro del sitio web del Servicio de Evaluación Ambiental.

Según esta regla operacional definida por SQM, asumiendo que el año 2015 correspondiese al año 7, se podría decir que el bombeo promedio anual máximo en las áreas MOP y SOP actual estaría en torno a los 1.500 L/s, de los cuales 900 L/s corresponderían al máximo caudal de bombeo que se extraerían del área MOP y 600 L/s del área SOP, asumiendo que no se estaría realizando reinyección directa desde los bitterns.

Desde el año 2016 hasta el año 2033, según la RCA N° 0226/2006, SQM podrá bombear salmuera por un caudal neto máximo de 1.500 L/s (entre el año 2015 al 2020), 1.600 L/s (entre 2021-2027) y 1.700 L/s (entre 2028-2033), los cuales van aumentando gradualmente a través de la vida útil del proyecto.

**Figura 5-16 Regla Operacional bombeos de salmuera SQM**



Fuente: Elaboración propia en base a RCA N° 0226/2006

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

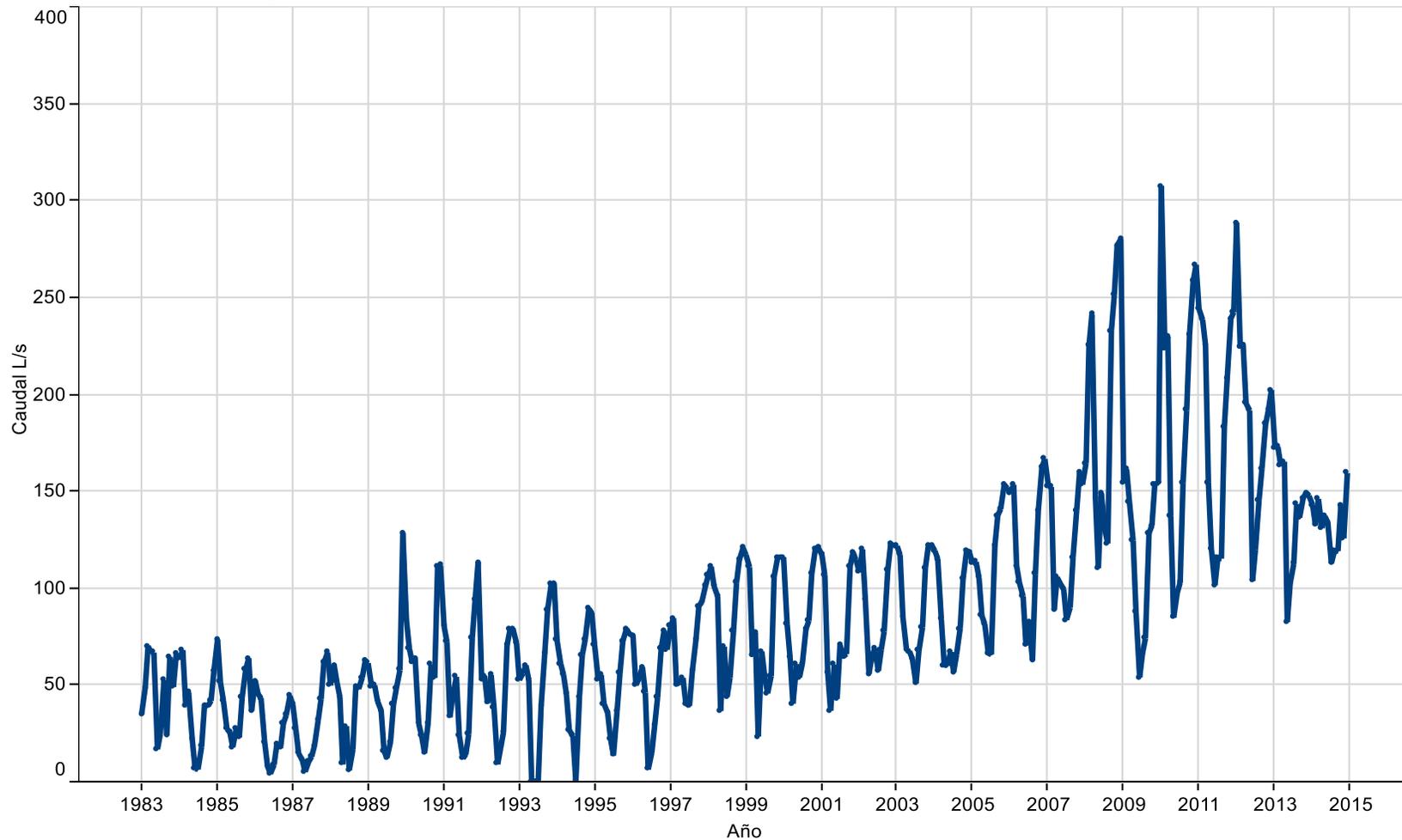
### 5.3.2 Extracción de Rockwood

La producción de Cloruro de potasio (KCl) de la Planta de Potasa de Rockwood es de 136.000 t/año. Esta capacidad de producción se autorizó ambientalmente a través de las siguientes resoluciones dictadas por la Comisión Regional de Medio Ambiente de la II Región:

- La Resolución Exenta N° 092/2000, que aprobó la Declaración de Impacto Ambiental (DIA) del proyecto “Construcción de Pozas de Evaporación Solar”, que dejó establecida una capacidad productiva de 100.000 t/año de Cloruro de Potasio para una extracción de Salmuera desde el Salar de Atacama de 113 L/s (88 L/s+ 25 L/s).
- La Resolución N° 3132/2006, que aprobó la Declaración de Impacto Ambiental (DIA) del proyecto “Modificación al Proyecto Construcción de Pozas de Evaporación Solar”, que autorizó la extracción adicional de 29 L/s de salmuera con lo que el valor autorizado para la extracción de salmuera desde el Salar de Atacama alcanzó 142 L/s, lo cual quedó ratificado en la Resolución Exenta N° 403/2013, de la Comisión de Evaluación de la Región de Antofagasta, que aprobó el proyecto "Secador Planta Potasa Rockwood Litio Limitada".

La Figura 5-17 muestra la extracción promedio mensual de salmuera efectuada por Rockwood entre 1983 y 2014, la cual es menor en los meses de invierno y mayor en verano en atención a la menor y mayor tasa de evaporación, respectivamente, que tienen los sistemas de pozas donde se procesa la salmuera. Durante el último período de operación comprendido entre 2013 y 2014 los valores de extracción mensual se encuentran entre los 110 y 160 L/s., los cuales se ajustan al caudal autorizado ambientalmente de 142 L/s, promedio anual. La Tabla 5-17 presenta las coordenadas de referencia y caudales históricos anuales para los pozos de bombeo utilizados por el Titular del proyecto durante la operación de éste.

**Figura 5-17 Extracción promedio mensual de Salmuera de Rockwood entre 1983 y 2014**



Fuente: Elaboración propia

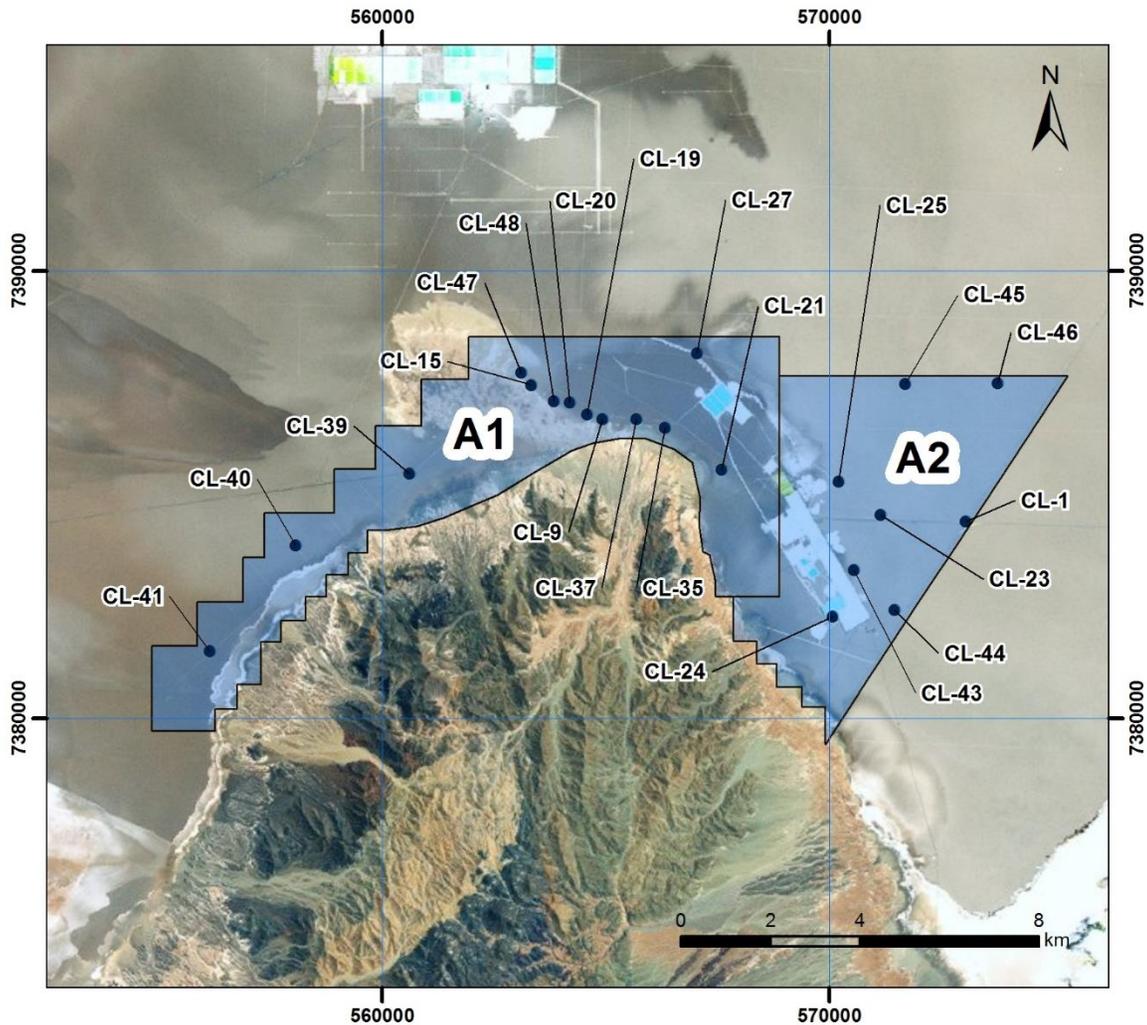
**Tabla 5-14 Caudales (L/s) Históricos de bombeo de Salmuera**

Nombre	Coordenadas UTM		Caudal (L/s) bombeado por año																																	
	Este	Norte	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014		
CL-1	573.049	7.384.403	27,75	13,15	6,18	0,01	6,02	5,78	5,15	9,45	5,50	2,02	11,73	8,03	12,16	11,58	3,84	16,15	8,89	9,26	9,58	14,27	13,70	9,98	6,47	6,52	11,93	15,18	15,71	19,68	16,39	16,44	14,80	17,74		
CL-9	564.931	7.386.684	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,00	0,00	1,17	0,67	0,73	0,84	1,79	1,50	5,69	7,26	5,19	4,54	0,99	1,03	0,77	0,87	1,77	1,98		
CL-15	563.329	7.387.453	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,80	5,73	5,16	10,38	6,47	7,17	6,18	4,95	7,96	6,17	4,65	4,72	4,37	3,52	3,79	4,57	6,01	6,42	7,13	9,54	6,97	5,89	3,83	4,76	3,88	4,19		
CL-17	565.711	7.386.853	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,93																			
CL-19	564.577	7.386.801	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,35	5,73	6,08	0,70	0,00	0,00	0,03	0,05	2,13	5,55	4,13	5,71	2,44	1,80	1,67	2,38	2,96	2,86		
CL-20	564.190	7.387.063	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,50	6,85	7,21	6,22	6,74	6,40	6,86	4,54	6,73	7,71	7,75	7,94	9,04	7,25	8,74	8,77	5,36	5,27	7,08	7,54	7,14		
CL-21	567.589	7.385.565	10,23	6,55	8,52	7,23	8,12	7,82	7,22	7,59	7,85	4,35	7,11	7,42	3,74	6,22	2,80	2,33	3,71	1,90	2,43	2,75	1,72	2,93	3,98	4,05	8,58	6,93	13,26	13,77	11,35	12,45	11,88	9,38		
CL-22	566.843	7.386.203	10,38	6,55	3,60	0,90	2,74	9,05	1,86	2,53	3,90	0,40	3,30	5,07	0,51	0,00	14,22	21,17	10,32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	6,31	13,56	13,03	10,12	6,84	0,00		
CL-23	571.141	7.384.543	0,23	6,38	14,36	12,63	10,37	13,42	16,96	10,15	7,25	0,00	0,32	0,00	0,00	0,32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,45	3,41	2,47	2,74	6,95	8,13	8,41	4,38	0,48	3,54	2,11	3,89	7,72		
CL-24	570.070	7.382.264	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,61	10,00	9,45	9,11	7,93	15,18	17,34	16,01	7,52	1,51	8,17	10,47	9,16	7,60	9,17	10,08	18,50	21,17	20,06	24,40	24,45	18,99	17,53	21,31	20,95	20,41		
CL-25	570.207	7.385.290	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,34	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7,66	6,37	12,39	17,98	15,88	20,66	19,93	21,81	18,76	16,74	16,66	21,91	23,46	19,29	22,20	18,30	15,49	13,87		
CL-26	564.419	7.387.956	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,46	5,52	4,30	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
CL-27	567.043	7.388.162	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,05	0,80	0,79	0,99	0,87	0,95	1,19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,00	0,00	0,00	3,27	3,87	
CL-28	568.539	7.384.505	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,56	4,06	1,81	0,42	0,00	0,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
CL-29	569.513	7.383.212	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,88	18,04	11,89	7,95	3,06	0,96	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
CL-35	566.323	7.386.495	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,00	9,04	7,26	3,16	3,23	3,73	3,11	2,98	10,10	4,57	4,82	4,56	2,36	0,41	0,47	0,31	5,84	7,52		
CL-36	567.342	7.385.806	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12,57	8,23	6,79	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
CL-37	565.679	7.386.693	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,65	2,64	3,49	5,14	2,06	4,37	3,92	3,87	4,38	3,97	4,94	4,22	2,51	0,40	0,59	1,00	1,91	2,72		
CL-39	560.617	7.385.473	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	22,44	0,00	20,60	20,51	5,59	0,00	0,00	
CL-40	558.065	7.383.864	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	12,89	0,00	4,97	-	-	-	-	
CL-41	556.151	7.381.492	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	6,01	16,12	17,19	8,59	14,70		
CL-45	571.689	7.387.482	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	13,55	0,00	20,23	9,21	26,98	12,92	19,24	
CL-52	562.799	7.385.766	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,41	-	-	-	-		
CL-53	572.018	7.384.515	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	10,92	0,00	2,50	16,41	3,47	0,00	0,00	
CL-60	557.529	7.382.960	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	14,18	0,00	0,00	5,65	0,00	
CL-61	571.040	7.386.743	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
T-0	569.310	7.386.317	0,00	4,61	8,12	6,50	1,26	3,77	4,66	3,93	0,87	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,00	0,00	0,00	3,13	0,00		
T-1	557.552	7.382.964	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,00	0,00	0,00	4,74	4,01	3,79	2,55	1,92	7,31	7,93	5,05	0,00	0,00	0,00	-	-	-	-		
T-4	568.250	7.387.603	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,00	0,00	0,00	9,00	13,10	11,11	10,86	10,12	10,15	9,81	9,59	4,56	0,79	5,62	8,31	8,15	2,83	0,00		
T-5	567.110	7.388.364	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,00	0,00	0,00	7,65	11,33	8,10	7,72	7,31	7,06	6,93	6,68	7,43	7,03	7,00	6,91	6,52	2,85	0,00		
T-7	567.414	7.385.599	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	8,10	0,00	0,00	-	-	-	-	
T-8	559.148	7.383.795	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	12,62	8,06	21,04	4,07	0,00		
<b>Total general</b>			<b>48,6</b>	<b>37,2</b>	<b>40,8</b>	<b>27,3</b>	<b>28,5</b>	<b>39,8</b>	<b>46,7</b>	<b>59,3</b>	<b>53,5</b>	<b>49,3</b>	<b>51,6</b>	<b>53,6</b>	<b>50,8</b>	<b>49,4</b>	<b>67,8</b>	<b>86,1</b>	<b>79,3</b>	<b>82,2</b>	<b>80,4</b>	<b>88,9</b>	<b>89,4</b>	<b>87,3</b>	<b>111,2</b>	<b>116,9</b>	<b>120,1</b>	<b>194,0</b>	<b>119,5</b>	<b>199,8</b>	<b>182,2</b>	<b>186,1</b>	<b>141,1</b>	<b>133,3</b>		

Fuente: Elaboración propia

Actualmente la extracción de salmuera se realiza en el interior de dos polígonos denominados A1 y A2 utilizando 21 pozos de explotación, estos polígonos y los pozos donde se realiza la extracción se han representado en la Figura 5-18. Los vértices de dichos polígonos se encuentran en la Tabla 5-15 y Tabla 5-16 respectivamente, la coordenadas de los vértices se muestran en coordenadas UTM sistema WGS 84.

**Figura 5-18 Ubicación de Pozos de Extracción de Salmuera de Rockwood**



**Leyenda**

- Área de extracción de Salmuera Rockwood
- Pozos de Extracción de Salmuera actuales

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 5-15 Vértices Polígono A1**

WGS 84			WGS 84			WGS 84		
Vértice	Este	Norte	Vértice	Este	Norte	Vértice	Este	Norte
1	568.878	7.388.538	19	561.379	7.384.484	37	556.259	7.380.202
2	568.878	7.382.714	20	560.770	7.384.294	38	556.259	7.379.707
3	567.850	7.382.714	21	560.065	7.384.198	39	554.850	7.379.707
4	567.450	7.382.714	22	559.666	7.384.198	40	554.850	7.381.610
5	567.450	7.383.037	23	559.666	7.383.704	41	555.859	7.381.610
6	567.317	7.383.647	24	559.247	7.383.704	42	555.859	7.382.600
7	567.165	7.383.723	25	559.247	7.383.209	43	556.887	7.382.600
8	567.089	7.384.332	26	558.923	7.383.209	44	556.887	7.383.589
9	567.108	7.384.903	27	558.752	7.383.209	45	557.363	7.383.589
10	566.936	7.385.721	28	558.752	7.382.714	46	557.363	7.384.598
11	566.537	7.386.026	29	558.295	7.382.714	47	558.923	7.384.598
12	565.889	7.386.254	30	558.295	7.382.181	48	558.923	7.385.569
13	565.280	7.386.254	31	557.743	7.382.181	49	559.856	7.385.569
14	564.709	7.386.159	32	557.743	7.381.705	50	559.856	7.386.540
15	564.234	7.385.988	33	557.287	7.381.705	51	560.884	7.386.540
16	563.415	7.385.512	34	557.287	7.380.753	52	560.884	7.387.586
17	562.578	7.384.998	35	556.754	7.380.753	53	561.931	7.387.586
18	561.931	7.384.721	36	556.754	7.380.202			

Fuente: elaboración propia

**Tabla 5-16 Vértices Polígono A2**

WGS 84		
Vértice	Este	Norte
1	568.878	7.387.649
2	575.332	7.387.649
3	572.856	7.383.894
4	572.073	7.382.714
5	570.667	7.380.583
6	570.667	7.380.580
7	569.905	7.379.414
8	569.905	7.380.240
9	569.392	7.380.240
10	569.392	7.380.696
11	568.821	7.380.696
12	568.821	7.381.210
13	568.383	7.381.210
14	568.383	7.381.724
15	567.850	7.381.724
16	567.850	7.382.714
17	568.878	7.382.714
18	568.878	7.387.649

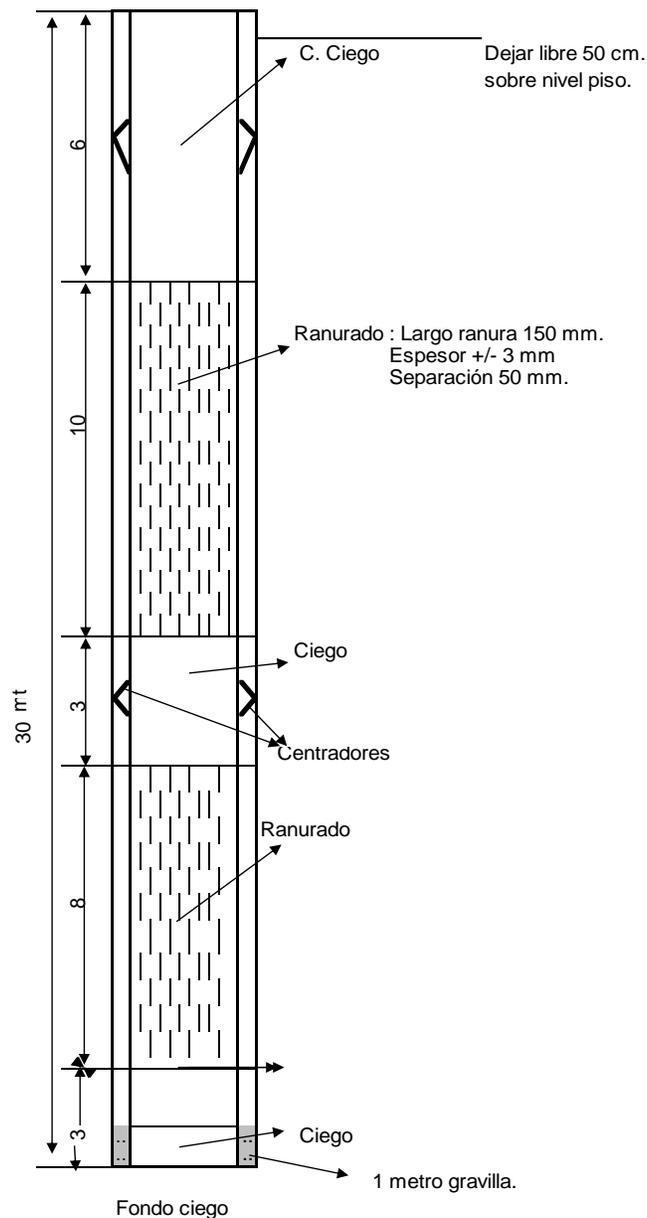
Fuente: elaboración propia

Los pozos de esta red actual de explotación de salmuera tienen una profundidad de 30 m, con un diámetro de pozo de 20 pulgadas y diámetro de la camisa de 14 pulgadas. Las características generales de un pozo típico se presentan a continuación en la Figura 5-19.

**Figura 5-19 Perfil Pozo Típico Rockwood**

Diámetro pozo : 20 pulgadas.

Diámetro camisa : 14 pulgadas



Fuente: elaboración propia

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

El proyecto de Rockwood, en actual evaluación, contempla el aumento del caudal de 142 L/s de extracción actual a 442 L/s. Dicho incremento de extracción se realizará en el polígono denominado A1 (Figura 5-18). El aumento de extracción se realizará de manera gradual mientras se construye la infraestructura necesaria para el funcionamiento del proyecto. El aumento de extracción comenzará una vez aprobado el proyecto, por lo menos un año después de la finalización de la construcción de los pozos del Plan de Alerta Temprana que se encuentran ubicados en el núcleo del Salár. El caudal se incrementará cada seis meses en escalones de 60 L/s, finalizando dos años después con un aumento total de 300 L/s. Este esquema o regla operacional se presenta en la Tabla 5-17, donde se observa que los pozos actualmente en funcionamiento continuarán con su explotación de 142 L/s como promedio anual.

La Figura 5-20 muestra esquemáticamente el aumento de extracción de salmuera propuesta en el marco del presente EIA.

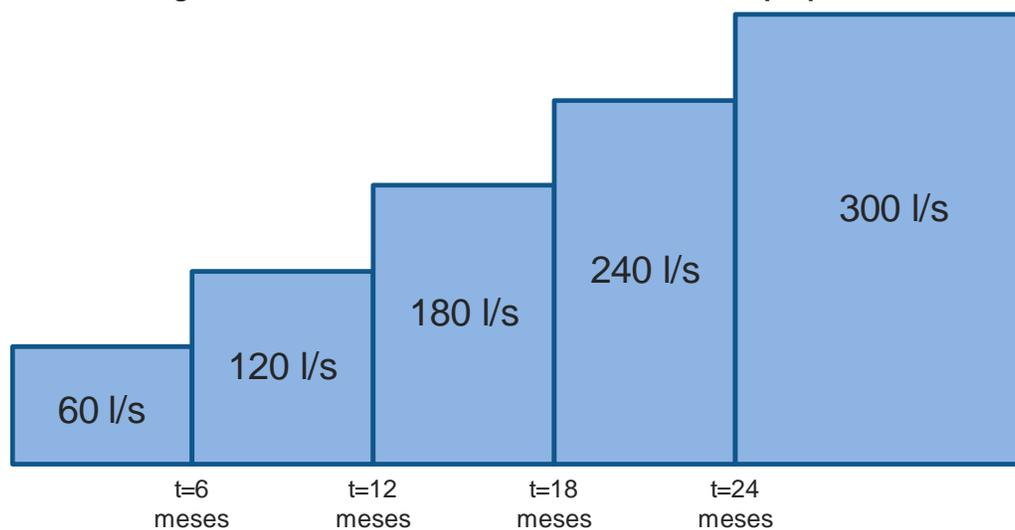
**Tabla 5-17 Regla extracción solicitada**

	Actual	Inicio*	Inicio + 6 Meses	Inicio + 12 Meses	Inicio + 18 Meses	Inicio + 24 Meses
Aumento Extracción	0	60	120	180	240	300
Extracción Total	142	202	262	322	382	442

\* Se iniciará 12 meses después de finalizar los pozos del PAT

Fuente: elaboración propia

**Figura 5-20 Aumento de Extracción de salmuera propuesto**

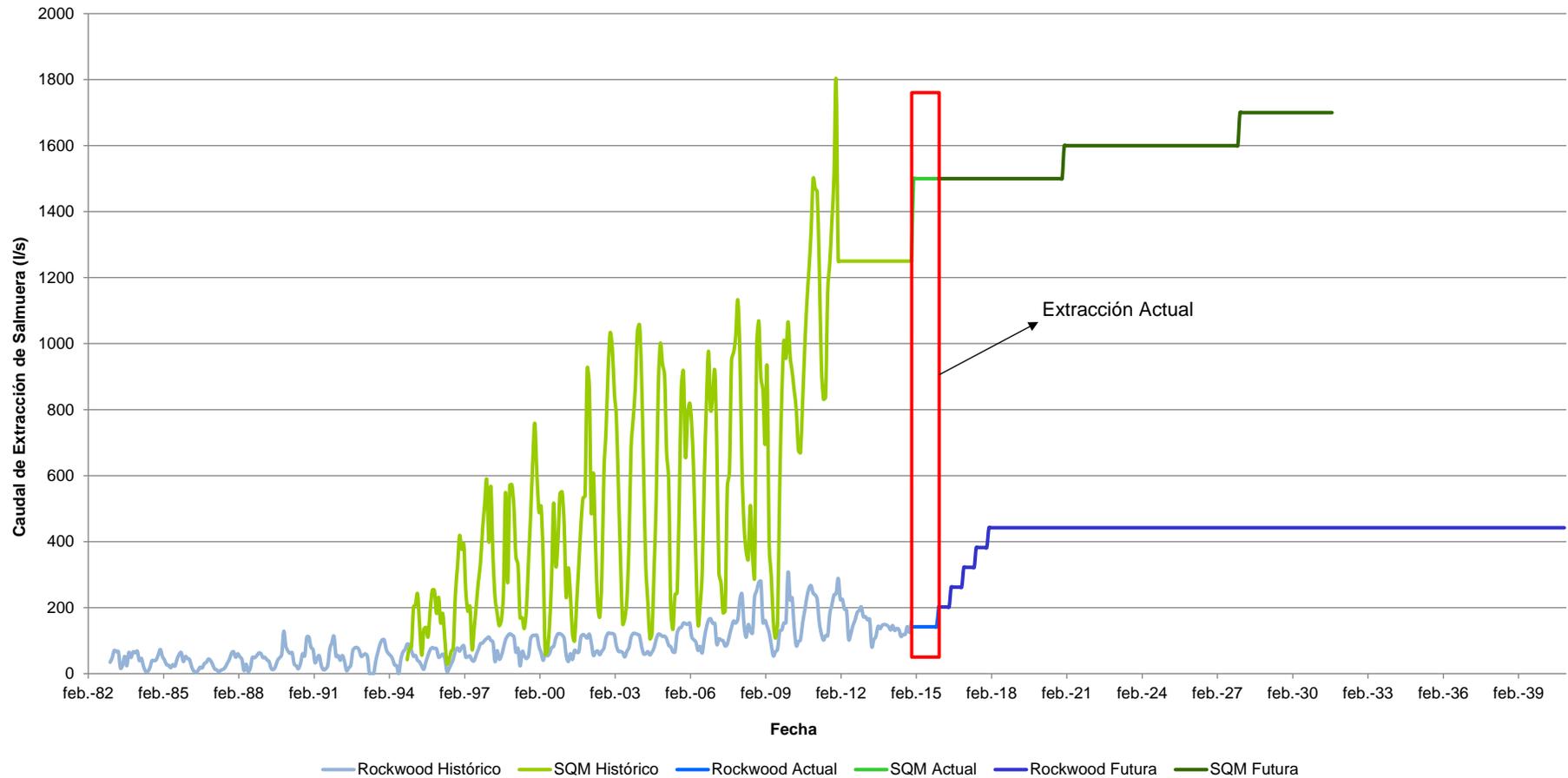


Fuente: Elaboración propia

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

La siguiente Figura 5-21 recopila la información de extracciones históricas tanto para SQM como para Rockwood, además de las extracciones promedio actuales y las proyectadas en el tiempo de acuerdo a las reglas de extracción planteadas en la RCA N° 0226 de 2006 para SQM y la regla de aumento de extracción solicitado en el presente proceso de evaluación ambiental por Rockwood.

**Figura 5-21 Extracción de Salmuera Histórica, Actual y Futura de SQM y Rockwood**



Fuente: Elaboración propia

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

#### 5.4 Resumen de la explotación en la cuenca del Salar

A continuación se presenta en la Tabla 5-18, un resumen de extracciones de salmuera y agua dulce en el Salar de Atacama, de caudales otorgados y ambientalmente autorizados, diferenciando los principales usuarios, así como las extracciones adicionales solicitadas por el Proyecto.

**Tabla 5-18 Resumen de Extracciones de salmuera y de Agua Dulce**

	ROCKWOOD		SQM		MEL-CMZ-OTROS
	Salmuera	Agua Dulce	Salmuera	Agua Dulce	Agua Dulce
<b>Caudal otorgado (L/s)</b>		23,5		450	4634,2
<b>Caudal ambientalmente autorizado (L/s)</b>	142	10,9	1.700	240	1.800
<b>Extracciones adicionales solicitadas (L/s)</b>	300	6			

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

## 6 HIDROLOGÍA

### 6.1 Clima y marco hidrológico regional

La principal característica climática de la Región de Antofagasta es su marcada aridez. El desierto se manifiesta plenamente en la Depresión Intermedia, entre la Cordillera de la Costa y la de Los Andes, donde la influencia marítima pierde importancia. La situación de extrema aridez en esta zona intermedia y la escasa vegetación existente definen un paisaje natural conocido como Desierto de Atacama. En esta región se localizan cuatro subtipos climáticos desérticos, localizados en franjas longitudinales.

A lo largo de la costa se localiza el clima desértico costero nuboso. Sus efectos se manifiestan hasta 20 kilómetros al interior donde la sequedad atmosférica es mayor, debido a que por causas del relieve la influencia marítima es retenida en los cerros de la Cordillera de la Costa. Las características principales de este subtipo climático se traducen en un efecto modelador de las temperaturas producido por la corriente fría de Humboldt, la presencia de abundante humedad, neblinas matinales y la ausencia de precipitaciones. Las escasas lluvias registran un leve aumento hacia el Sur del litoral, de igual manera lo mismo ocurre hacia el interior del altiplano.

En la franja intermedia de la región se desarrolla el subtipo climático desértico interior que corresponde al clima desértico propiamente tal, caracterizado por una aridez extrema, ausencia de humedad, gran sequedad atmosférica y gran amplitud térmica entre el día y la noche. Las temperaturas diurnas extremas son de 30°C y en la noche bajan de 1° a 2°C. En las zonas intermedias de las pampas interiores, encerradas por serranías del oriente por la precordillera andina, la región posee las características climáticas más áridas del Norte chileno. Es a esto a lo que se le denomina Desierto de Atacama, en que las precipitaciones son muy escasas y la humedad relativa es inferior al 50%.

Entre los 2.000 y 3.500 msnm., donde se ubica el Salar de Atacama, el clima es desértico marginal de altura, el cual presenta una mayor cantidad y volumen de precipitaciones en los meses de verano, entre 20 y 60 mm anuales. Esto explica el asentamiento de poblados cordilleranos como San Pedro de Atacama, Toconao o Peine.

El clima de estepa de altura se da preferentemente en las áreas de los bordes o márgenes de los desiertos y, también como sucede en el Norte del país, existe un clima estepario de altura. Esta región se ubica por sobre los 3.500 msnm., lo que corresponde a la zona altiplánica. Sus principales características son las bajas temperaturas (siendo la media anual de 2°C) y donde la amplitud térmica entre el día y la noche es muy alta (más de 20°C). Las precipitaciones son mayores y se producen en los meses de verano, sobrepasando los 100 mm anuales en algunas zonas de mayor altitud. A medida que se avanza hacia el Sur del altiplano de esta región, las lluvias de verano comienzan a disminuir y a mayor altura predomina una precipitación sólida.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

Los rasgos hidrológicos de la región están determinados por sus condiciones climáticas y morfológicas, en donde los cursos de agua permanente son escasos y se limitan, en general, al sector de la Cordillera de Los Andes, y son retenidos en su trayecto al Oeste por la Cordillera de Domeyko. Esta morfología da como resultado la existencia de cuencas endorreicas, las cuales debido a la alta tasa de evaporación han formado numerosos Salares, entre los que destaca por su extensión el Salar de Atacama.

De esta manera, la cuenca del Salar de Atacama se ubica en una zona de clima muy árido, y presenta una marcada zonificación de Este a Oeste. La zona oriental es definida como del tipo “Desértico Marginal de Altura” y la zona occidental, incluyendo al área misma del Salar, como del tipo “Desértico Normal” (Mardones, 1986). Las escasas precipitaciones sobre el sector occidental del Salar se deben en parte al predominio del Anticiclón Subtropical del Pacífico Suroriental que tiene su influencia en una parte amplia del margen Oeste de América del Sur, generando gran estabilidad atmosférica (Vargas, 2000). En el resto de la Cuenca, vale decir su sección más oriental, las precipitaciones ocurren principalmente desde enero a marzo, producto de la humedad transportada desde la cuenca Amazónica (invierno boliviano), y en menor importancia entre Abril y Agosto debido al desplazamiento de frentes fríos desde la Antártica. Éstas disminuyen desde 300 mm/año en la Cordillera de los Andes hasta unos 10 a 20 mm/año en la cordillera de Domeyko, y sobre el Salar mismo el promedio estadístico es de unos 12 mm/año.

## 6.2 Cuenca hidrográfica

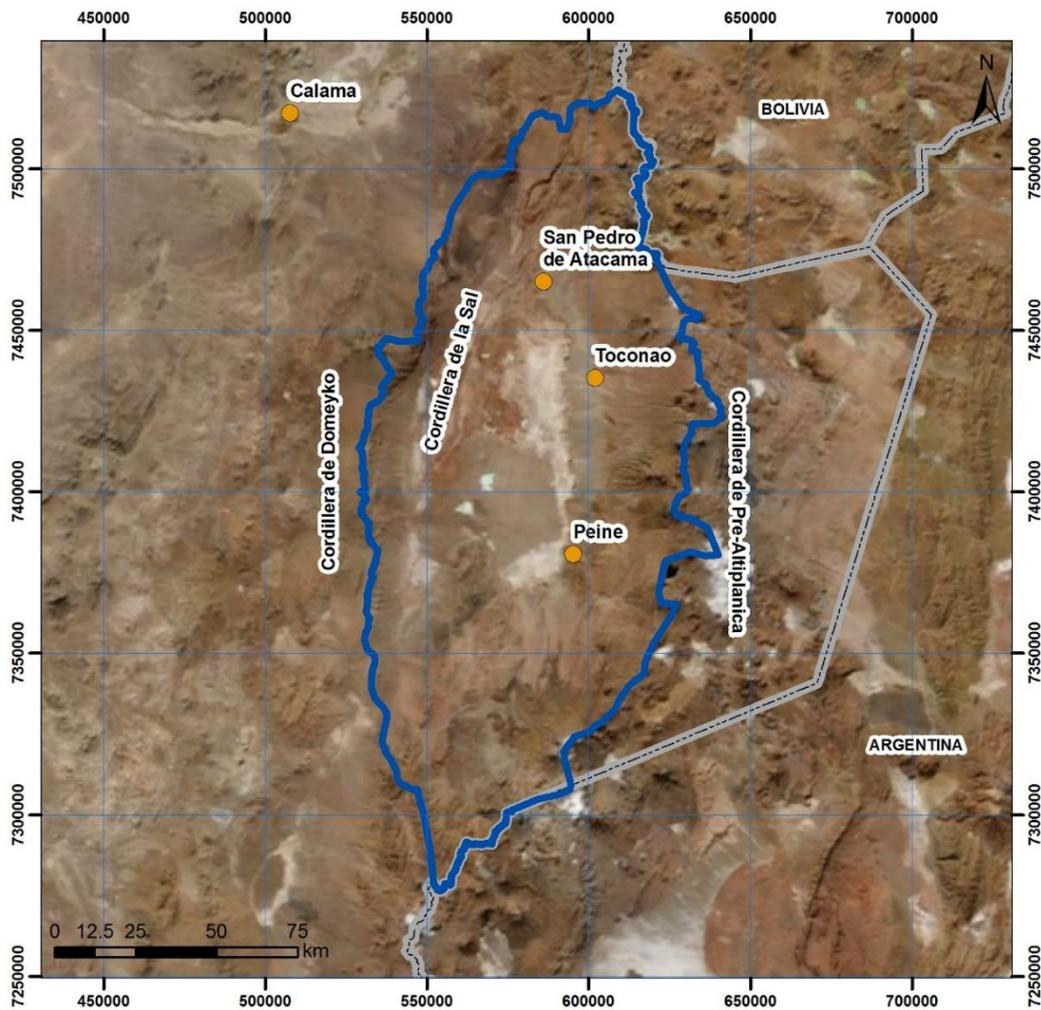
La cuenca hidrográfica del Salar corresponde a una cuenca endorreica, en donde el sector central, más bajo y relativamente plano, es donde se ubica el Salar de Atacama, propiamente tal, aproximadamente en la cota 2.300 msnm. Está conformada por sub-cuencas aportantes, que escurren hacia el Salar y drenan justo en el límite de los depósitos salinos. El Salar cuenta con un núcleo ubicado en el centro del sector Sur, compuesto por una costra de cloruro de sodio.

En esta región, los únicos ríos de escurrimiento permanente son el río Loa, el río San Pedro y el río Vilama, estos dos últimos afluentes del sector Norte del Salar. El río Loa, que constituye el recurso hídrico de mayor relevancia, posee casi 400 km de longitud, y un caudal medio anual variable entre 0,5 y 5 m<sup>3</sup>/s. Otros recursos hídricos superficiales escurren por algunos cursos menores de agua situados en la zona altiplánica y cordillera principal, además de numerosas aguadas en quebradas y bordes de Salares, especialmente hacia el oriente de la Cordillera de Domeyko.

La principal zona de recarga de la cuenca tiene su origen en las precipitaciones sobre las altas cumbres que limitan la cuenca por el Norte y Oriente del Salar. La mayoría de los cauces no tienen flujo permanente y presentan escurrimientos eventuales con ocasión de eventos importantes de precipitación. Como excepción existen algunas quebradas que funcionan como vertientes alimentadas de aguas de origen subterráneo que si tienen un escurrimiento permanente.

Para la determinación de la cuenca del Salar se tomó como base la realizada para el estudio Actualización de la Evaluación de la Disponibilidad de Recursos Hídricos para Constituir Derechos de Aprovechamiento en las Subcuenclas Afluentes al Salar de Atacama (DGA, 2010), basado en criterios topográficos (modelo digital de elevación), hidrográficos e hidrogeológicos, el cual fue verificado para el presente estudio, apoyándose en cartografía IGM e imágenes satelitales, produciendo pequeños ajustes. En la Figura 6-1 se muestra la cuenca hidrográfica del Salar de Atacama.

**Figura 6-1 Cuenca Hidrográfica Salar de Atacama**



**Leyenda**

- Cuenca Salar Atacama
- Límite internacional
- Centros poblados

Fuente: Elaboración propia

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

Se destaca que en el capítulo 9 de este estudio, en el punto 9.2.2 de Balance hídrico, se describe la subdivisión que se ha hecho de la cuenca, con criterios hidrológicos pero también hidrogeológicos de tal forma de calcular con mayor detalle los flujos que entran y salen de cada una de estas subcuencas, por precipitación, evaporación, escurrimientos superficiales y subterráneos.

### 6.3 Pluviometría

En la región donde ubica el Salar de Atacama, las precipitaciones importantes comienzan a partir de los 2.000 msnm, aumentando con la altura hacia el oriente. Bajo esta cota, las precipitaciones son muy esporádicas y de baja magnitud.

Las precipitaciones están influenciadas por la altura y por un sistema convectivo que genera lluvias estivales en el Altiplano. Estas tormentas son generalmente de corta duración y de poca extensión territorial. Si bien es común observar tormentas de baja intensidad (menos de 20 mm/día), hay una ocurrencia ocasional de tormentas muy intensas (hasta 280 mm/día). También ocurren lluvias de menor importancia entre Abril y Agosto debido al desplazamiento de frentes fríos desde la Antártica.

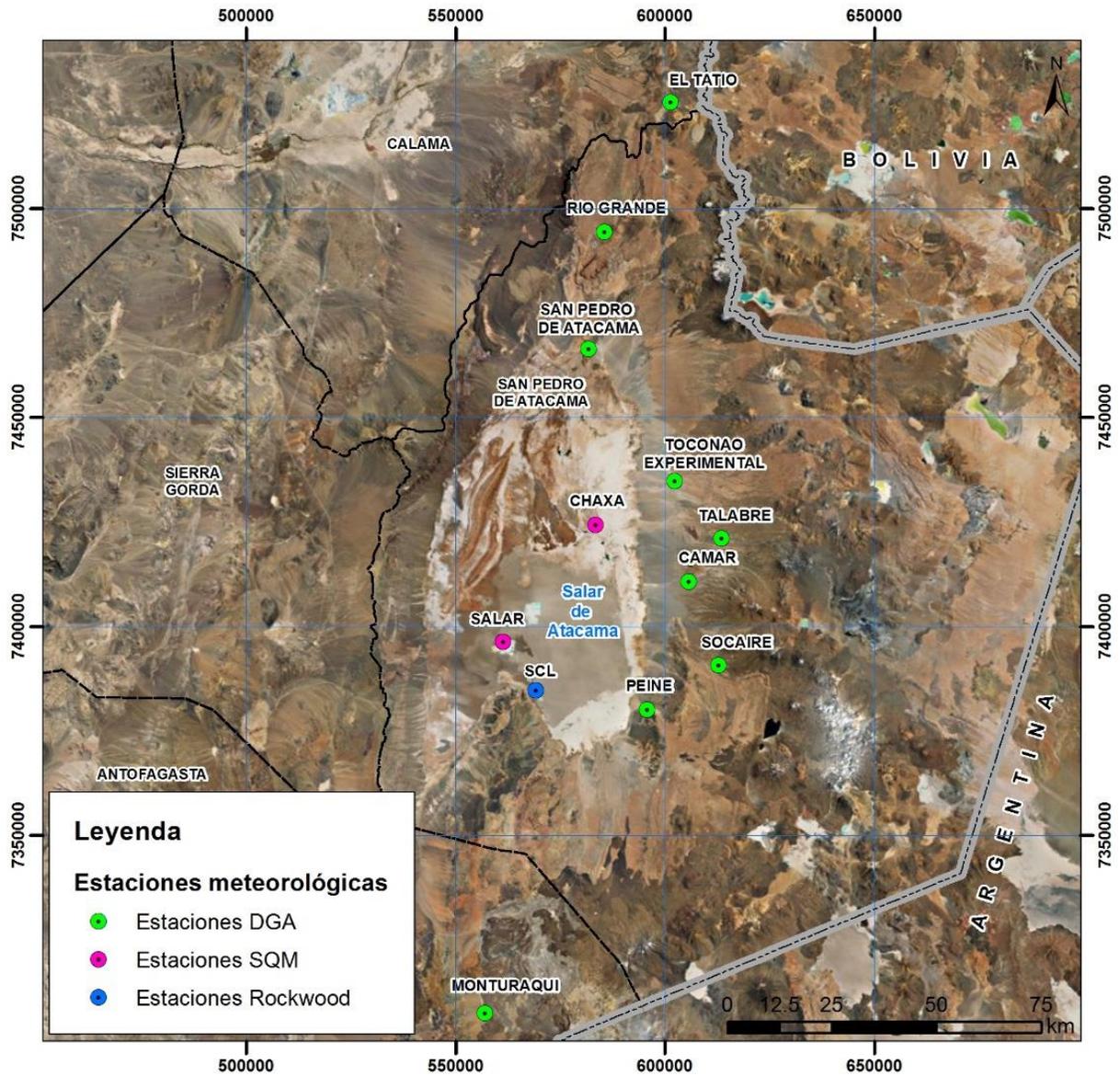
Con todo esto, las variaciones anuales de precipitaciones son importantes, presentándose series de años muy secos (DGA, 2010). Así, la precipitación en el Salar es baja, concentrándose preferentemente en los meses de verano, siendo el mes de febrero donde en general se acumulan los valores más altos. Si bien no existe un registro extenso, la precipitación anual media es del orden de 12 mm, de acuerdo con los registros pluviométricos de las estaciones Planta SCL de Rockwood y Chaxa de SQM desde 1990 y de Salar de SQM desde el año 2000.

#### 6.3.1 Registros disponibles

En la cuenca del Salar de Atacama existen varias estaciones meteorológicas pertenecientes a la DGA. Adicionalmente existen tres estaciones al interior del Núcleo del Salar, dos de la empresa SQM (Chaxa y Salar) y otra perteneciente a Rockwood (Planta SCL). En la Tabla 6-1 se indican la altura y coordenadas de las estaciones, cuya información procede de, para las estaciones de la DGA, de la información señalada por la DGA en el mapa interactivo de su página Web, para las dos estaciones de SQM, de sus reportes públicos; y de Rockwood para la estación Planta SCL. En la Figura 6-2 se muestra el periodo de extensión del registro pluviométrico para cada estación y en la Figura 6-3 se muestra la ubicación geográfica de las ellas.



**Figura 6-3 Ubicación Estaciones Meteorológicas**



Fuente: Elaboración propia sobre imagen Google Earth

### 6.3.2 Precipitaciones medias

Con el fin de caracterizar el régimen de precipitaciones, se considera que el período utilizado de las estaciones pluviométricas disponible sea homogéneo. En este sentido se realizó un relleno estadístico de aquellos valores mensuales de precipitación faltantes para el periodo 1974-2013 en la mayoría de las estaciones. Para las estaciones de SQM se utilizó el período de 1990 a 2013.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

Para el relleno de la información estadística disponible, se ha utilizado lo realizado en el estudio de DGA, 2010. Este estudio presenta un completo análisis de estadística de precipitaciones de la zona, con un proceso de relleno de datos que abarcó 25 estaciones de la región. Entre éstas se encuentran 6 de las 9 estaciones consideradas para este estudio, a saber: El Tatio, Río Grande, Peine, Camar, Socaire y Toconao Experimental. El periodo de análisis abarcó desde 1970 hasta marzo de 2009.

La metodología de relleno utilizada en el estudio de la DGA citado, consistió en un método estocástico multivariado cuyo resultado para cada estación son valores aleatorios de la variable precipitación que conservan, en promedio, la media, desviación estándar, probabilidad de no lluvia y correlación mensual con otras estaciones utilizadas en el análisis. Entonces, para las 6 estaciones mencionadas se utilizó la estadística rellena del estudio de la DGA hasta 2009, actualizando la estadística hasta el año 2013 con la información disponible en la DGA, a excepción de la estación Toconao Experimental que sólo estuvo vigente hasta el año 2009. Para esta estación, la estadística se extendió hasta el año 2013 utilizando un relleno más simplificado que el utilizado por la DGA, pero basado en los mismos principios, correlación mensual y probabilidad de no lluvia.

Para las estaciones San Pedro de Atacama y Talabre, no consideradas en el relleno estadístico del estudio de la DGA, 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 probabilidad de no lluvia se utiliza asignando valor cero de precipitación a meses en que en las estaciones con registro en esos meses la precipitación fue nula. La estación Monturaqui no fue rellena, ya que su corta extensión no permitió obtener una correlación aceptable con otras estaciones, por lo cual no fue utilizada en la caracterización de las precipitaciones mensuales de la cuenca y sólo se tuvo como referencia para la elaboración del plano de isoyetas. En el Apéndice E. Hidrología, se incluye la estadística completada de las estaciones de la DGA seleccionadas, destacándose los valores estadísticos originales, los rellenos por estudio de la DGA y por este estudio. Se incluyen también las correlaciones utilizadas para este relleno.

Adicionalmente a la información pluviométrica de la DGA, se dispone de estadística en las estaciones de SQM y Rockwood (Tabla 6-2) ubicadas al interior del Salar (Figura 6-3). De acuerdo con el promedio directo de datos de estas estaciones, la precipitación anual media en el Salar es de 11,7 mm. La estadística mensual recopilada para estas estaciones se incluye también en el Apéndice E. Hidrología. La estación Planta SCL de Rockwood fue extendida según la metodología descrita anteriormente (correlación mensual y probabilidad de no lluvia) para homologar el periodo estadístico.

Para la estación Salar de SQM, se tienen datos medidos desde el año 2000 a 2013, mientras que la información que entrega esta compañía para el período entre 1990 a 1999 corresponden a datos de precipitaciones mensuales generados por SQM mediante un modelo de simulación estadístico (SQM, EIA Adenda 1 Sección III). La estación Chaxa de SQM, también presenta datos medidos entre 2000 a 2013, y fue extendida en el presente estudio hasta el año 1990 mediante correlación mensual con la estación Planta

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

SCL de Rockwood. Los datos de SQM desde 2000 a 2013 fueron extraídos de sus informes semestrales del Plan de Seguimiento Ambiental.

**Tabla 6-2 Precipitaciones Anuales al Interior del Salar (mm)**

AÑO	Planta SCL	Salar (SQM)	Chaxas (SQM)
1990	2,78	23,22	2,7
1991	7,73	11,84	7,5
1992	6,42	17,05	6,2
1993	0,44	17,28	0,4
1994	0,48	8,90	0,5
1995	2,87	14,89	2,8
1996	9,93	9,55	9,6
1997	34,5	12,83	33,4
1998	5,5	8,19	5,3
1999	8,5	5,64	7,7
2000	9,4	3,4	24,7
2001	85,9	9,1	47,0
2002	42	20,8	28,2
2003	2	2,7	11,6
2004	1,5	0,7	4,0
2005	8,5	1,0	13
2006	7,6	6,6	5,8
2007	0	10,4	3,5
2008	10	0,0	1,3
2009	2,4	0,8	3,5
2010	0	5,1	0,4
2011	17	5,8	11,7
2012	0	5,0	39,5
2013	42,5	25,8	40,6
<b>Promedio</b>	<b>12,8</b>	<b>9,4</b>	<b>12,9</b>

XX según valores simulados por SQM

XX rellenado por correlación anual

En la Tabla 6-3 se muestran las precipitaciones medias mensuales y anuales finalmente determinadas para cada estación de la DGA, determinadas para el periodo estadístico 1974-2013, y las ubicadas al interior del Salar de Rockwood y SQM, determinadas para el periodo estadístico 1990-2013. Como se señaló, en la estación Monturaqui los valores representan sólo el periodo 1974-1979, y se incluyó sólo para tenerla como referencia para la elaboración del plano de isoyetas.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

**Tabla 6-3 Precipitaciones Mensuales y Anual (mm)**

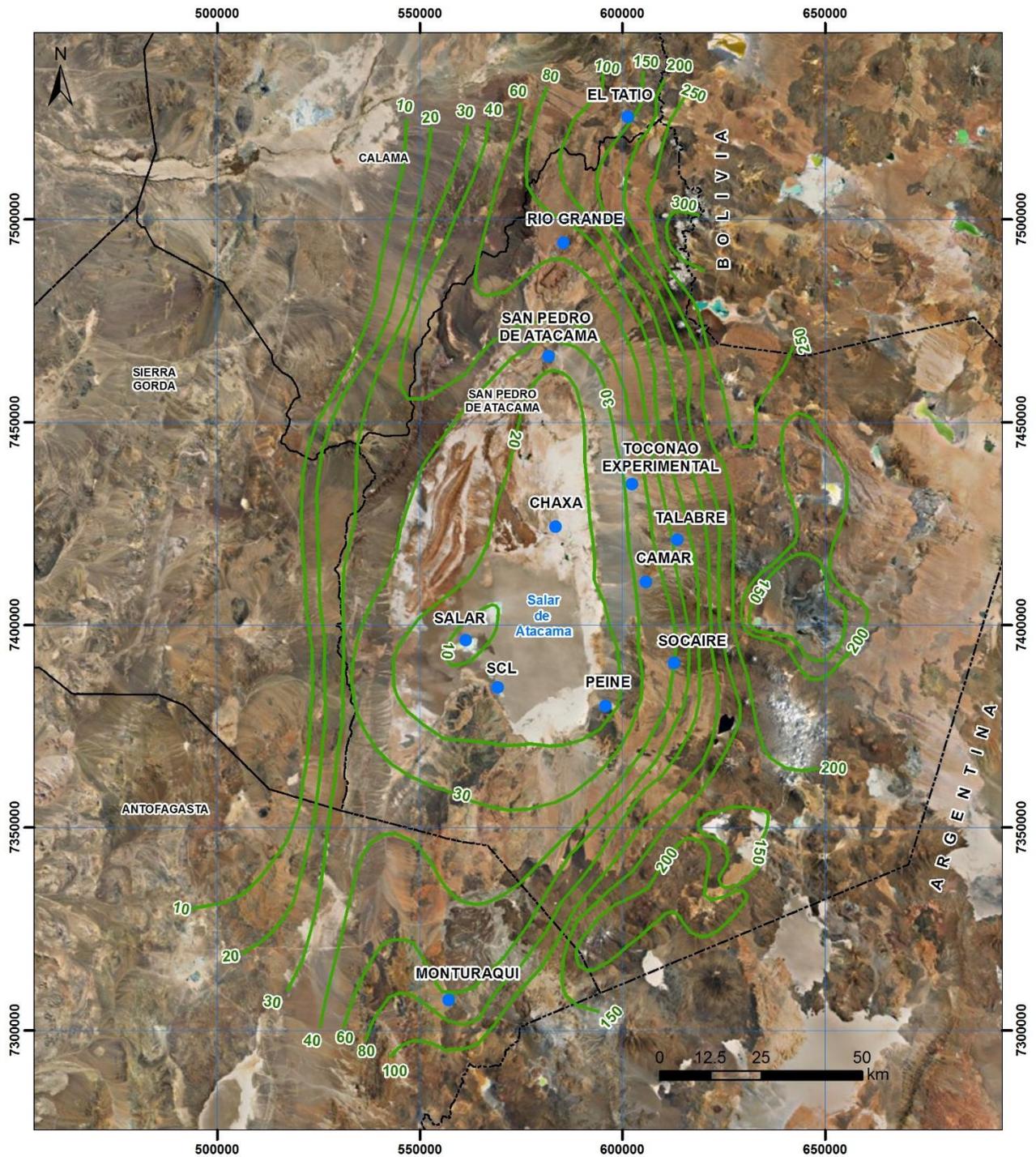
ESTACION	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
CAMAR	6,7	12,6	8,0	0,1	1,1	2,9	0,2	0,8	0,5	0,0	0,2	0,6	33,8
EL TATIO	47,3	46,0	33,0	1,0	3,0	2,8	1,0	1,7	1,6	0,5	0,8	7,0	145,5
PEINE	2,4	6,3	5,0	0,5	1,4	1,7	0,5	0,6	0,5	0,1	0,0	0,2	19,1
RIO GRANDE	20,5	26,1	14,8	0,5	1,2	3,6	0,9	1,1	0,6	0,1	0,2	1,7	71,3
SAN PEDRO DE ATACAMA	5,0	10,5	5,5	0,0	0,7	1,2	0,1	0,4	0,2	0,0	0,3	0,3	24,3
SOCAIRE	11,1	13,7	5,3	1,1	2,6	2,6	0,9	0,8	0,9	0,3	0,3	0,8	40,4
TALABRE	15,6	24,5	11,2	1,3	2,3	5,6	1,2	2,0	0,8	0,0	0,4	1,2	66,1
TOCONAO EXPERIMENTAL	6,9	13,3	6,0	0,2	1,3	2,4	0,2	0,5	0,4	0,1	0,1	1,0	32,2
MONTURAQUI (*)	40,6	12,1	4,0	1,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	58,5
PLANTA SCL	1,3	2,5	5,6	0,4	0,6	0,8	1,0	0,6	0,1	0,0	0,0	0,0	12,8
Chaxa SQM	2,9	4,2	2,1	1,8	0,3	0,5	0,1	0,3	0,0	0,0	0,0	0,6	12,9
Salar SQM	1,8	1,0	1,5	0,8	0,5	1,0	0,5	0,1	0,3	0,1	0,7	1,2	9,4

(\*) Estación Mounturaqui con información periodo 1974-1979

Fuente: Elaboración propia

Con los valores de precipitación determinados, se presenta en la Figura 6-4 un plano de isoyetas de precipitación anual para la Cuenca del Salar. Para su elaboración, considerando que no se tiene una buena cobertura de estaciones en toda la cuenca, se tuvo en cuenta también la presentada en el mapa de isoyetas del Balance Hídrico de Chile (DGA, 1987), en especial al Oeste del Salar donde no se tiene información pluviométrica.

**Figura 6-4 Plano Isoyetas Precipitación Promedio Anual**

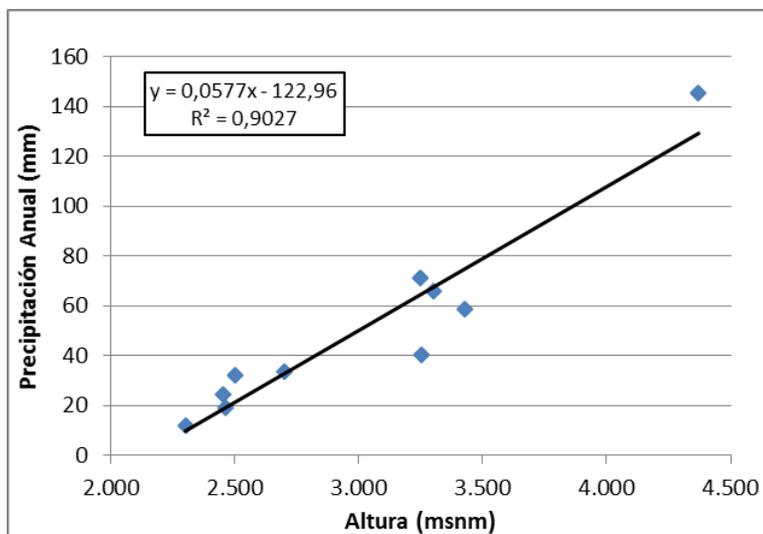


Fuente: Elaboración propia sobre imagen Google Earth

### 6.3.3 Relación Precipitación-Altura

Como se observa en el mapa de isoyetas anteriormente presentado, las precipitaciones en la Cuenca están relacionadas con la altura a la que se producen. En la Figura 6-5 se muestra la buena correlación que existe entre ésta y la altura geográfica de cada estación. También se observa que la precipitación anual en el interior del Salar, determinada en 11,7 mm a la cota 2.300 msnm, es consistente con la relación precipitación-altura definida. Considerando las estaciones utilizadas, ubicadas en la zona Este de la Cuenca, se considera que este gradiente es representativo de dicho sector de la Cuenca. Por otro lado, para el sector Oeste de la Cuenca, como se señaló anteriormente, y representado en el mapa de isoyetas, las precipitaciones son menores, por lo tanto el gradiente de precipitaciones será menor.

**Figura 6-5 Precipitación Anual versus Altura sector Este**



Fuente: Elaboración propia

Se destaca que, con el objetivo de desarrollar los modelos numéricos que se presentan en el Capítulo 10, en el punto 9.2 de Balance hídrico se definieron las relaciones precipitación-altura a nivel promedio mensual, las que permiten luego generar balances mensuales para la estimación de la recarga mensual del sistema que se aplica en el modelo numérico.

## 6.4 Evaporación

### 6.4.1 Evaporación de tanque

En la Cuenca del Salar de Atacama existen 8 estaciones meteorológicas que miden la evaporación de lámina libre, dentro de las cuales 5 pertenecen a la DGA, 1 a Rockwood y 2 a SQM. Las estaciones

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

pertenecientes a SQM y a Rockwood se ubican dentro de la propiedad de estas en el Salar. En la Tabla 6-4 se presenta ubicación, altura y periodo de registro.

**Tabla 6-4 Estaciones con Estadística de Evaporación de Tanque**

Estación	Código BNA	Coord UTM (Datum WGS84)		Altura msnm	Periodo Estadística
		Norte	Este		
El Tatio	02105022-9	7.525.377	601.377	4.370	1984-1996
San Pedro de A.	02510006-9	7.466.358	581.811	2.450	1963-1989
Peine	02500020-K	7.380.038	595.837	2.460	1974-2012
Toconao Experimental	02500016-1	7.434.832	602.365	2.500	1975-2009
Monturaqui	02660001-4	7.307.475	557.081	3.430	1974-1979
Planta SCL	Rockwood	7.387.000	568.000	2.306	2002-2013
Chaxas SQM	Soquimich	7.424.000	583.000	2.307	1999-2013
Salar SQM	Soquimich	7.397.000	561.000	2.306	1999-2013

Fuente: Dirección General de Aguas

Considerando la estabilidad interanual de la evaporación mensual, donde el coeficiente de varianza de los datos estadísticos disponibles es del orden al 15% en promedio para las estaciones consideradas, no se estima necesario homologar el periodo estadístico para caracterizar la evaporación de superficie libre en la zona. En el Apéndice E. Hidrología, se incluye la información estadística de evaporación mensual de las estaciones señaladas, mientras que en la Tabla 6-5 se muestran los valores de evaporación media mensual y total media anual obtenida de la estadística recopilada.

**Tabla 6-5 Evaporación de Tanque Media Mensual (mm)**

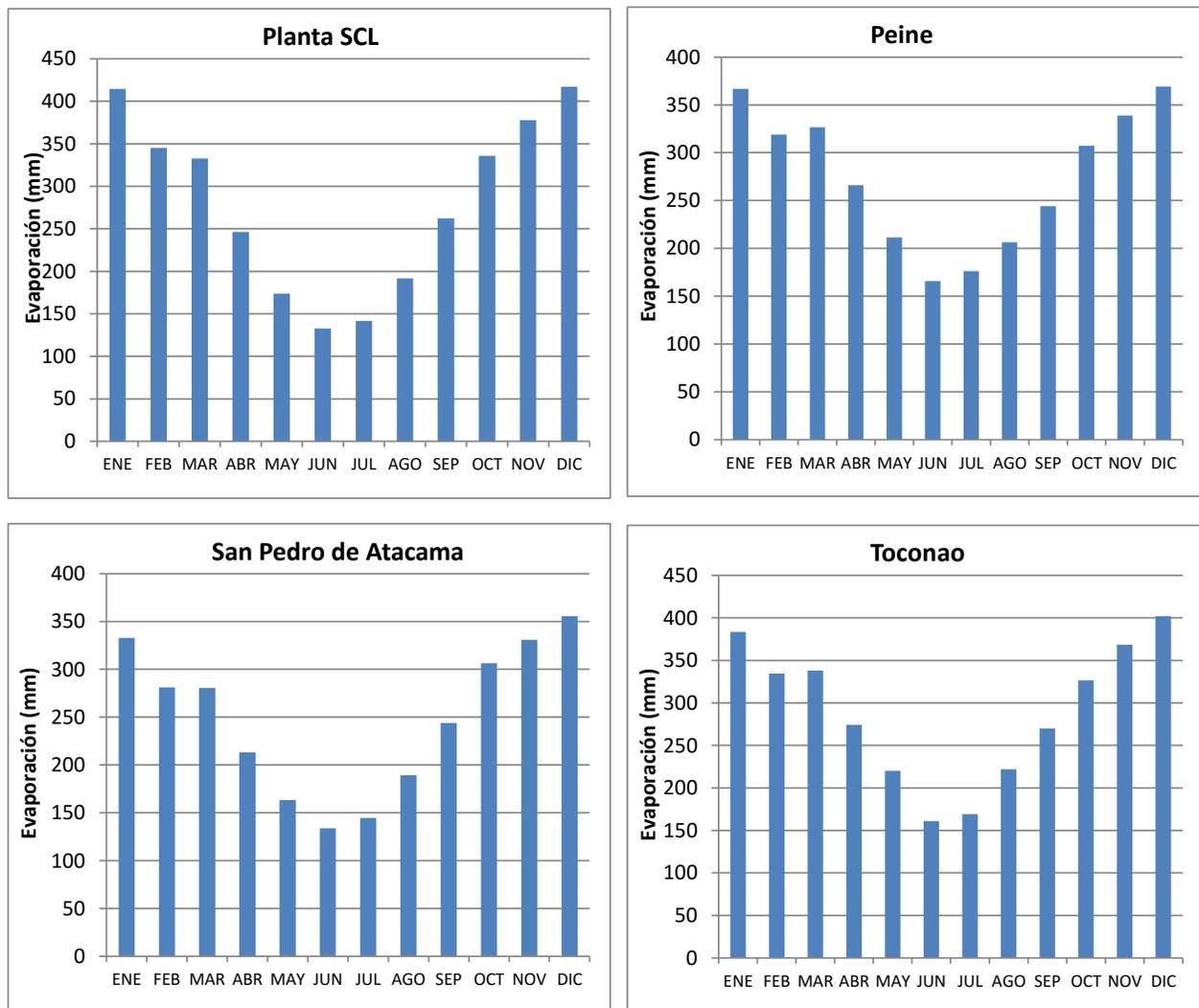
Mes	El Tatio	San Pedro A.	Toconao	Peine	Monturaqui	Planta SCL	Chaxas SQM	Salar SQM
ENE	165,9	332,8	383,6	366,8	262,6	414,5	321,7	363,9
FEB	138,0	281,1	334,6	319,0	227,8	345,0	288,7	293,3
MAR	152,3	280,6	337,9	326,7	283,8	332,6	275,9	260,5
ABR	124,3	213,2	274,1	265,9	197,0	246,3	215,5	181,5
MAY	99,8	163,3	220,0	211,4	165,4	173,8	143,6	133,0
JUN	72,8	133,8	161,0	165,6	114,2	132,7	115,9	136,4
JUL	91,0	144,8	169,2	176,1	139,9	141,8	140,6	165,5
AGO	90,0	189,3	221,9	206,4	159,4	191,5	196,6	232,6
SEP	127,3	243,8	270,0	244,1	225,4	262,4	247,2	282,7
OCT	169,5	306,5	326,6	307,3	278,2	335,9	372,5	350,3
NOV	168,4	330,9	368,3	338,9	275,0	377,9	393,4	358,6
DIC	183,2	355,6	402,2	369,1	333,6	417,1	342,4	383,6
<b>Anual</b>	<b>1582,3</b>	<b>2975,4</b>	<b>3469,3</b>	<b>3297,3</b>	<b>2662,3</b>	<b>3371,5</b>	<b>3054,1</b>	<b>3141,9</b>

Fuente: Elaboración propia (en base a datos DGA)

En la Figura 6-6 se muestran gráficos de variación estacional en 4 estaciones de la Cuenca del Salar, donde se observa la clara influencia estacional, donde las más altas tasas de evaporación se producen en verano, con peaks en los meses de diciembre y enero en todas las estaciones, y las más bajas tasas en invierno, siendo en junio y julio las menores en todas las estaciones.

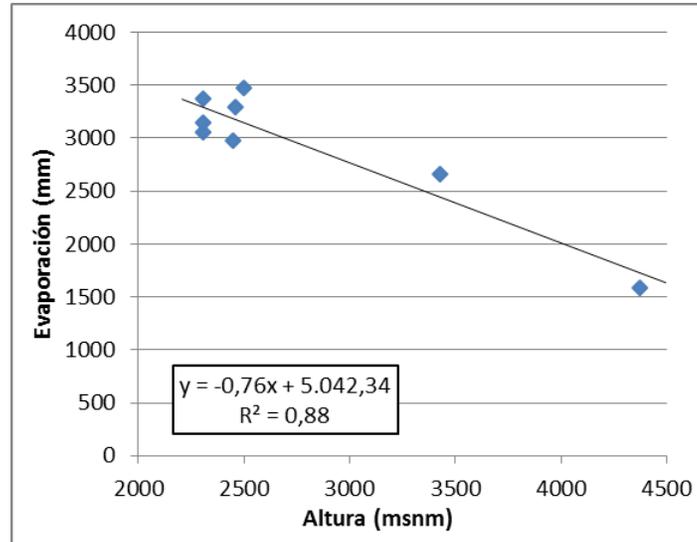
En la Figura 6-7 se ha graficado la relación evaporación-altura, donde se observa la buena correlación entre ambas variables ( $R^2=0.88$ ) con una clara disminución de la evaporación con el aumento en altura geográfica, siendo la estación Planta SCL ubicada al interior del Salar donde se registran los valores más altos, con una evaporación media anual de 3.372 mm, y la estación de El Tatio, ubicada a más de 4.000 msnm con un valor medio anual de 1.581 mm.

**Figura 6-6 Variación Estacional de la Evaporación**



Fuente: Elaboración propia

**Figura 6-7 Relación Evaporación versus Altura**



Fuente: elaboración propia

#### 6.4.2 Evaporación de tanque de la salmuera

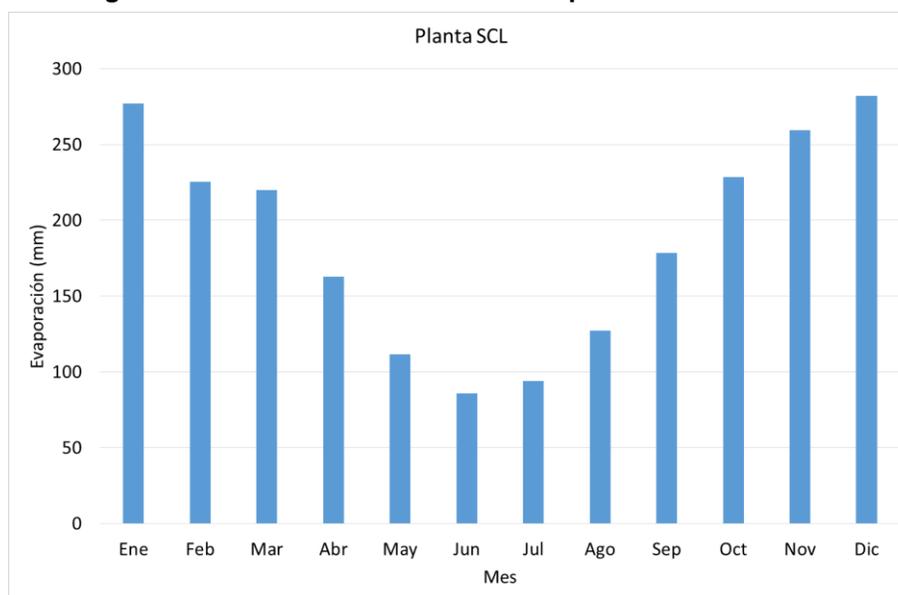
En la estación meteorológica Planta SCL, además de ser registrada la evaporación de tanque de agua fresca, se registra mensualmente la evaporación de tanque de la salmuera que se extrae desde el Núcleo del Salar. En la Tabla 6-6 se presenta el promedio mensual para la evaporación y en la Figura 6-8 se muestra la variación mensual de ésta.

**Tabla 6-6 Evaporación de Tanque Media Mensual**

Mes	Evaporación mes (mm)
Enero	277
Febrero	226
Marzo	220
Abril	163
Mayo	112
Junio	86
Julio	94
Agosto	127
Septiembre	179
Octubre	228
Noviembre	260
Diciembre	282
<b>Anual</b>	<b>2.252</b>

Fuente: Elaboración propia

**Figura 6-8 Variación mensual de la evaporación de salmuera**



Fuente: Elaboración propia

Al igual que en el agua fresca la evaporación máxima se presenta en los meses de diciembre y enero, mientras que la evaporación mínima se presenta en junio. La evaporación media anual es de 2.252 mm y el promedio mensual es 282 mm. Se observa que, comparando con la evaporación de agua fresca medida en la misma estación (Planta SCL), la evaporación de la salmuera es aproximadamente un 33% menor que la del agua fresca, tanto mes a mes como en el total anual.

Los datos de evaporación de salmuera registrados mensualmente entre los años 2002 y 2013 se presentan en el Apéndice E. Hidrología, del presente Anexo 1.

#### 6.4.3 Tasa de evaporación y evapotranspiración en el Salar de Atacama

A continuación se presentan las zonas y tasas de evaporación utilizadas en este estudio. La descripción de las zonas de evaporación y el cálculo de las tasas se presentan en forma detallada en el Apéndice J. Estimación de la tasas de evaporación y evapotranspiración en el Salar de Atacama, del presente Anexo.

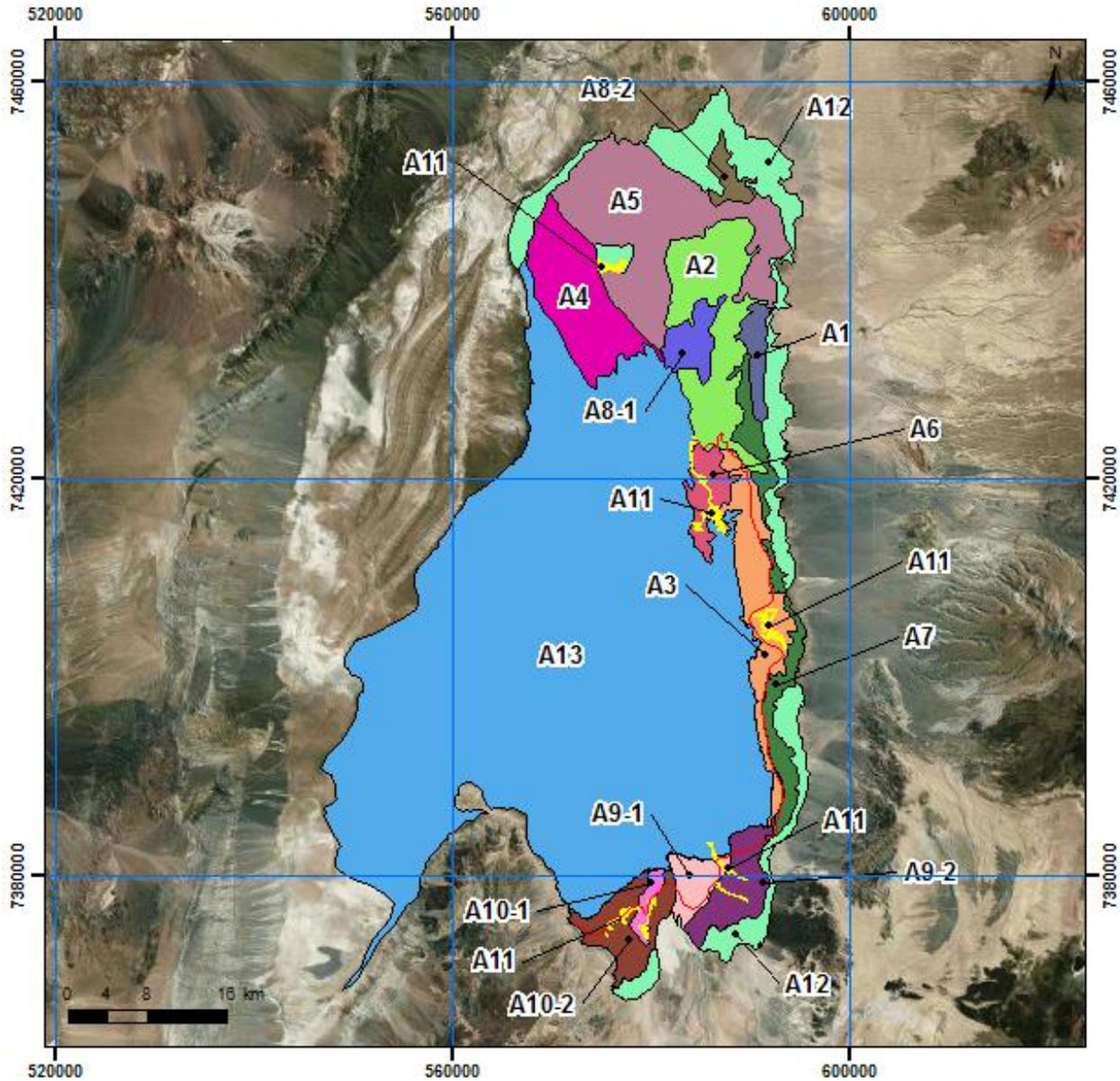
##### 6.4.3.1 Zonas de evaporación Salar de Atacama

En la Figura 6-9 se presentan las zonas de evaporación, basadas en las zonas de Mardones (1997) y cuya delimitación se presenta en detalle en el punto 4.1 Zonas de evaporación del Apéndice J Evaporación en el Salar de Atacama, y la posición de la interfase salina en superficie determinada en el punto 8.4.3

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

Geometría de la interfase salina del Capítulo 8 Hidrogeología. Cabe señalar que la zona A13 corresponde al núcleo de halita y la zona A11 a lagunas.

**Figura 6-9 Representación espacial zonas de evaporación**



**Leyenda**

**Zonas de Evaporación**

A1	A5	A8-2	A10-2	Interfase Salina
A2	A6	A9-1	A11	
A3	A7	A9-2	A12	
A4	A8-1	A10-1	A13	

Fuente: Elaboración propia

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

Como se explica en el punto 9.1.1 Modelo conceptual de la Cuenca del Capítulo 9 Modelo Conceptual y Balance Hídrico, la sección de la Zona Marginal ubicada afuera de la interfase salina, denominada Zona Marginal Acuifero, evapora agua que proviene de la recarga procedente de las subcuencas. La sección ubicada entre la interfase salina y la zona A13 (núcleo de halita) en cambio, denominada Zona Marginal Intermedia, evapora tanto agua salobre proveniente de la recarga de las subcuencas y que desborda por encima de la interfase salina, como salmuera proveniente de la zona A13. Las zonas A13 y A11 (lagunas) no experimentan la división anterior ya que la fuente del agua que evapora no cambia.

Conforme a lo anterior, las zonas A2, A3, A9-2, A9-1, A10-1 y A10-2 poseen Zona Marginal intermedia y salobre, mientras que el resto de las zonas poseen sólo Zona Marginal salobre.

Debido a que la tasa de evaporación depende de la densidad del agua y a que la densidad varía considerablemente de un lado a otro de la interfase salina, como se presenta en el punto 3.5 Variación de la evaporación en función de la salinidad del Apéndice J, es necesario evaluar por separado la evaporación de las Zonas Marginales intermedia y salobre, como se presenta en el punto a continuación.

#### 6.4.3.2 Tasa de evaporación

Desde el año 2013 el titular ha realizado mediciones de la evaporación en 10 de las 16 zonas de evaporación definidas por Mardones, con el fin de validar y complementar las tasas diarias utilizadas anteriormente en el cálculo del flujo de evaporación en el Salar. Debido a que los resultados obtenidos son coherentes con el modelo conceptual y a la solidez de las mediciones realizadas, se ha decidido utilizar las tasas de evaporación determinadas por el titular para el cálculo de balance hídrico en la Cuenca, presentado en el subcapítulo 9.3.1 Balance hídrico en la cuenca del Salar de Atacama, del Capítulo 9. Los resultados de las mediciones y el cálculo de la tasa diaria de evaporación para cada zona se presenta en detalle en los puntos 4.5 Procesamiento de la información y 4.6 Cálculo de la evaporación en Zona Marginal y Núcleo del Apéndice J Evaporación en el Salar de Atacama.

En la Tabla 6-7 muestra la superficie y la tasa de evaporación para cada zona marginal en el sector salobre e intermedio de ser pertinente. Además, se presenta el área total y la tasa calculada como el promedio ponderado por superficie de las zonas salobre e intermedia. Para las zonas A13 y A11 se indica solo el total de superficie, tasa y flujo ya que no son divididas en Zona Marginal salobre e intermedia.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

**Tabla 6-7 Tasa y Flujos de evaporación por zonas**

Zona Mardones	Agua salobre			Intermedia			Total		
	Superficie (km <sup>2</sup> )	Tasa (mm/d)	Flujo (L/s)	Superficie (km <sup>2</sup> )	Tasa (mm/d)	Flujo (L/s)	Superficie (km <sup>2</sup> )	Tasa (mm/d)	Flujo (L/s)
A1	21,46	0,2651	65,9				21,5	0,265	65,9
A2	127,99	0,0466	69,1	1,7	0,036	0,7	129,7	0,046	69,8
A3	25,10	0,0641	18,6	62,7	0,047	34,2	87,8	0,052	52,8
A4	108,95	0,6365	802,6				108,9	0,636	802,6
A5	209,98	0,2573	625,3				210,0	0,257	625,3
A6				30,2	0,010	3,4	30,2	0,010	3,4
A7	63,25	0,6761	495,0	1,3	0,651	9,6	64,5	0,676	504,6
A8-1	28,14	0,0288	9,4				28,1	0,029	9,4
A8-2	15,68	1,0416	189,1				15,7	1,042	189,1
A9-1	7,24	0,6423	53,8	19,1	0,209	46,1	26,3	0,328	99,9
A9-2	40,76	0,1104	52,1	8,3	0,229	21,9	49,0	0,130	74,0
A10-1	4,62	0,8464	45,3	5,7	0,175	11,5	10,3	0,476	56,8
A10-2	33,03	0,9987	381,8	18,0	0,236	49,1	51,0	0,730	430,9
A11							9,4	6,500	704,7
A12	216,86	0,3099	777,8				216,9	0,310	777,8
A13							1655,0	0,058	1117,7
<b>Total (L/s)</b>			<b>3585,7</b>			<b>176,5</b>			<b>5584,6</b>

Fuente: Elaboración propia

Según se observa en la tabla, la tasa de evaporación varía entre 0,01 y 1,04 mm/d, valores que corresponden a la costra de halita con una profundidad promedio de 0,85 cm (zona A6) y a la zona de vegas (zona A8-1) respectivamente.

La principal diferencia entre la evaporación obtenida por el titular, con la que se resuelve el balance hídrico en la cuenca, y por Mardones (1986 y 1997), se encuentra en el Núcleo, ya que el obtenido por el titular fue de 1.117,7 L/s mientras que según Mardones es 96,7 L/s. A pesar esta diferencia la evaporación total del Salar es 5,6 m<sup>3</sup>/s, valor equivalente al obtenido por la DGA (2010).

El análisis de los resultados obtenidos por el titular, la comparación con los resultados obtenidos por Mardones (1986 y 1997) y las razones por las cuales se utilizarán los resultados del primero se presentan en profundidad en el punto 4.6 Cálculo de la evaporación en Zona Marginal y Núcleo del Apéndice J Evaporación en el Salar de Atacama.

## 6.5 Fluviometría

Los principales cursos fluviales presentes en el entorno del Salar son el río San Pedro, con un caudal promedio del orden de 1 m<sup>3</sup>/s, y episodios torrenciales de hasta 25 m<sup>3</sup>/s, y el río Vilama, con un caudal promedio de 160 L/s. Ambos desembocan en el margen Norte del Salar. El río San Pedro forma un delta seco, mientras que el río Vilama, sometido a una fuerte presión extractiva, se infiltra y desaparece al Sur de San Pedro de Atacama. Los máximos caudales se registran entre los meses de enero a marzo,

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

coincidiendo con los máximos pluviométricos. En el margen Este del Salar, una serie de torrentes efímeros circulan por quebradas cuyas zonas de cabecera se sitúan en la zona del altiplano andino.

La DGA cuenta con varias estaciones fluviométricas en la Cuenca, que son las señaladas en la Tabla 6-8 y cuya ubicación geográfica se muestra en la Figura 6-10, según coordenadas UTM informadas por la DGA en el mapa interactivo de su página Web. En el Apéndice E se incluye la estadística disponible a diciembre de 2014 de estas estaciones. Se han agregado en dicha figura tres puntos de medición en quebradas afluentes al sector oriente del Salar, informadas en documento Hidrogeología de la II Región y Asesoría para la revisión de Informes de estudios de Recursos Hídricos (DGA-Dictuc, 2005), y cuya ubicación es referencial.

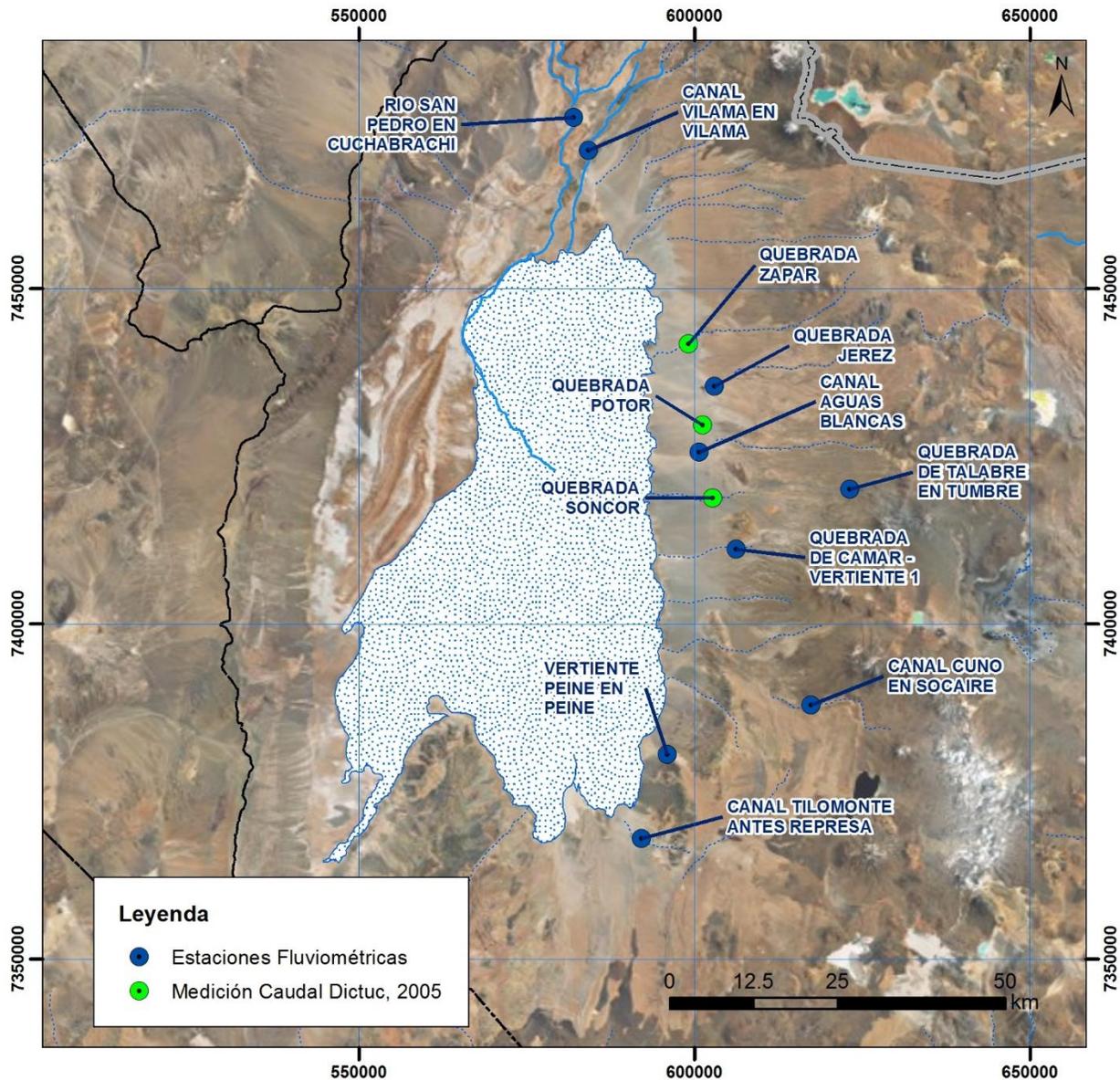
**Tabla 6-8 Estaciones Fluviométricas DGA**

Estación	Código BNA	Coord. UTM (Datum WGS84)		Periodo Registro
		Norte	Este	
CANAL AGUAS BLANCAS	02500002-1	7.425.586	600.710	1977 - 2001
CANAL VILAMA EN VILAMA	02500004-8	7.470.634	584.206	1976 - 2013
CANAL CUNO EN SOCAIRE	02500005-6	7.387.883	617.422	1989 - 2013
RIO SAN PEDRO EN CUCHABRACHI	02510001-8	7.475.533	582.062	1947 - 2013
VERTIENTE PEINE EN PEINE (*)	02500011-0	7.380.529	595.982	1995 - 2012
CANAL TILOMONTE ANTES REPRESA	02500006-4	7.367.957	592.170	1997 - 2013
QUEBRADA DE CAMAR - VERTIENTE 1 (*)	02500009-9	7.411.185	606.261	1997 - 2012
QUEBRADA DE CAMAR - VERTIENTE 2 (*)	02500010-2	7.411.656	606.697	1997 - 2012
QUEBRADA DE TALABRE EN TUMBRE (*)	02500008-0	7.420.125	623.226	1995 - 2012
QUEBRADA JEREZ EN TOCONAO (*)	02500007-2	7.435.488	603.030	1995 - 2012

(\*) Estaciones de Aforo

Fuente: Dirección General de Aguas

**Figura 6-10 Ubicación Estaciones Fluviométricas DGA**



Fuente: Elaboración propia sobre imagen Google Earth

En la Tabla 6-9 se señalan los caudales medios mensuales para las estaciones consultadas que cuentan con registro continuo, determinados para el periodo estadístico disponible en cada estación señalado anteriormente, y en la Figura 6-11 la variación estacional de los caudales medios mensuales, donde se observa que sólo el río San Pedro presenta variaciones estacionales de su caudal debido a las mayores precipitaciones de los meses de verano. En cambio, los demás cauces no reflejan estas variaciones

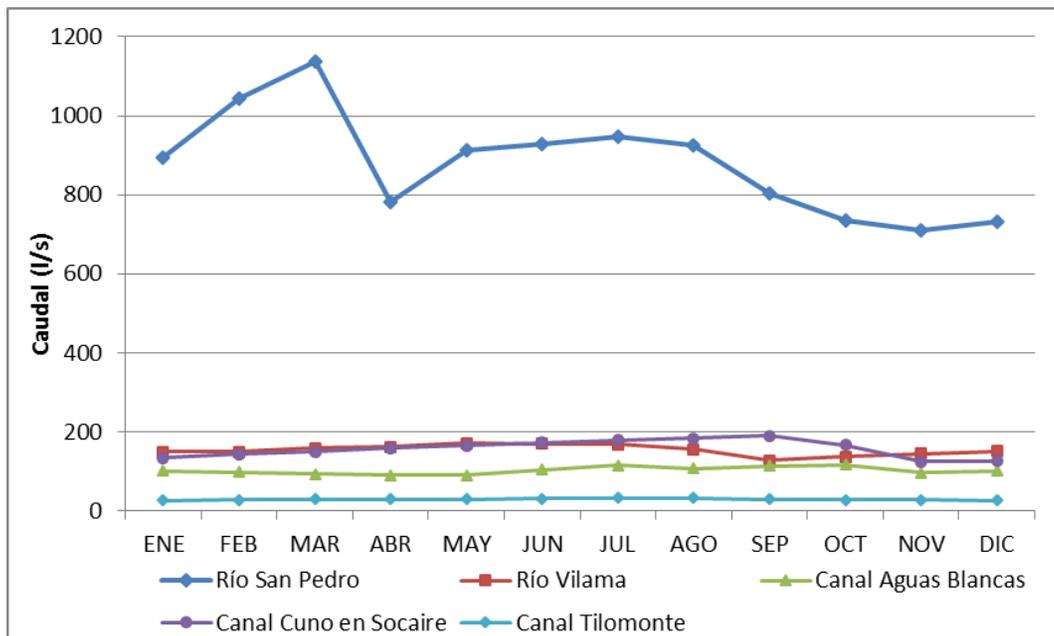
producto de las precipitaciones debido a que su principal fuente de alimentación sería de origen subterráneo.

**Tabla 6-9 Caudales Medios Mensuales Cauces afluentes al Salar (L/s)**

Mes	Río San Pedro en Cuchabrachi	Río Vilama en Vilama	Canal Aguas Blancas	Canal Cuno en Socaire	Canal Tilomonte
Enero	894	149	101	134	26
Febrero	1043	149	99	144	28
Marzo	1136	159	94	150	30
Abril	783	161	91	160	29
Mayo	912	172	90	166	30
Junio	927	169	105	173	31
Julio	947	168	115	179	33
Agosto	926	156	107	183	32
Septiembre	803	128	114	190	30
Octubre	734	138	117	166	28
Noviembre	709	145	96	124	28
Diciembre	733	152	101	126	27
<b>Promedio</b>	<b>879</b>	<b>154</b>	<b>102</b>	<b>158</b>	<b>29,3</b>

Fuente: Elaboración propia (en base a datos DGA)

**Figura 6-11 Variación Estacional Cauces afluentes al Salar**



Fuente: Elaboración propia

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

Para las estaciones de la DGA en que sólo se realizan aforos sistemáticos, los valores promedio de los caudales medidos en el periodo indicado en la Tabla 6-8 son los siguientes:

**Tabla 6-10 Caudales promedio aforados por la DGA en sus estaciones fluviométricas con aforos sistemáticos**

Punto de Aforo	Min (l/s)	Max (l/s)	Promedio (l/s)
Vertiente Peine en Peine	1	15	7,5
Quebrada de Camar Vertiente 1	1	18	6
Quebrada de Camar Vertiente 2	2	20	12
Quebrada de Talabre en Tumbre	1	40	12
Quebrada Jerez en Toconao	11	82	62

Fuente: Elaboración propia (en base a datos DGA)

Además de los cauces anteriores, en el estudio de DGA-Dictuc (2005) se presentan caudales promedios de mediciones realizadas en los siguientes cauces afluentes al borde Este del Salar (sector Norte):

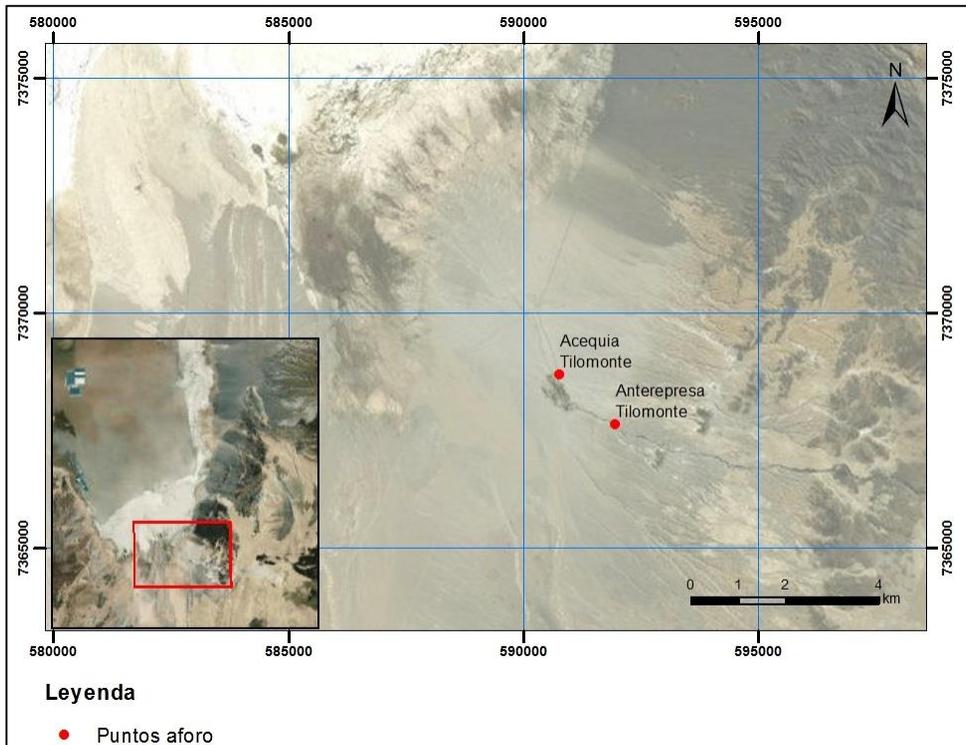
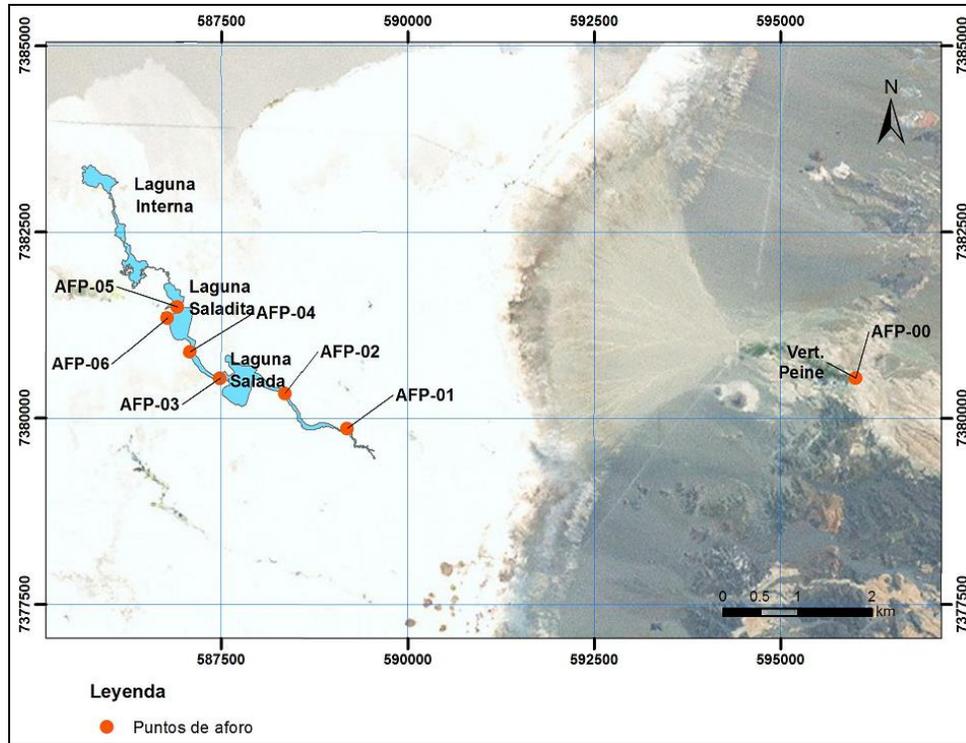
- Quebrada Zapar 7 l/s
- Quebrada Potor 30 l/s
- Quebrada Soncor 6 l/s

Adicionalmente a la estadística disponible de la DGA, como parte del presente estudio y con el objetivo de tener mayores antecedentes para el análisis del funcionamiento del sistema hídrico, en especial de los sistemas lagunares, se ha realizado un programa mensual de mediciones de caudal en diferentes puntos. Estos se concentran en el sistema de lagunas Salada y Saladita y en las vertientes de Peine y Tilomonte. La ubicación de los puntos de aforo se muestra en la Figura 6-12. Las mediciones se comenzaron en septiembre de 2014.

El detalle de las características y resultados de los aforos realizados se incluye en el Apéndice E y en la Tabla 6-11 los resultados de los caudales aforados a la fecha del presente estudio.

De los resultados de los aforos, es posible observar que, para el sector de Peine y las lagunas Salada-Saladita-Interna, los valores de los caudales aforados, comparados para una misma fecha, decrecen desde el punto AFP-01 hacia AFP-05, como se observa en el gráfico de la Figura 6-13. Desde un punto de vista del balance, tal decrecimiento reflejaría, por un lado, que gran parte de la alimentación de este sistema lagunar por el afloramiento de aguas subterráneas ocurre aguas arriba de la estación de aforo AFP-01 y, por el otro, que después de esta estación ocurre una pérdida de agua debido al proceso de acumulación de agua en las lagunas y a la evaporación a la cual se exponen en ellas.

**Figura 6-12 Ubicación Puntos de Aforo**

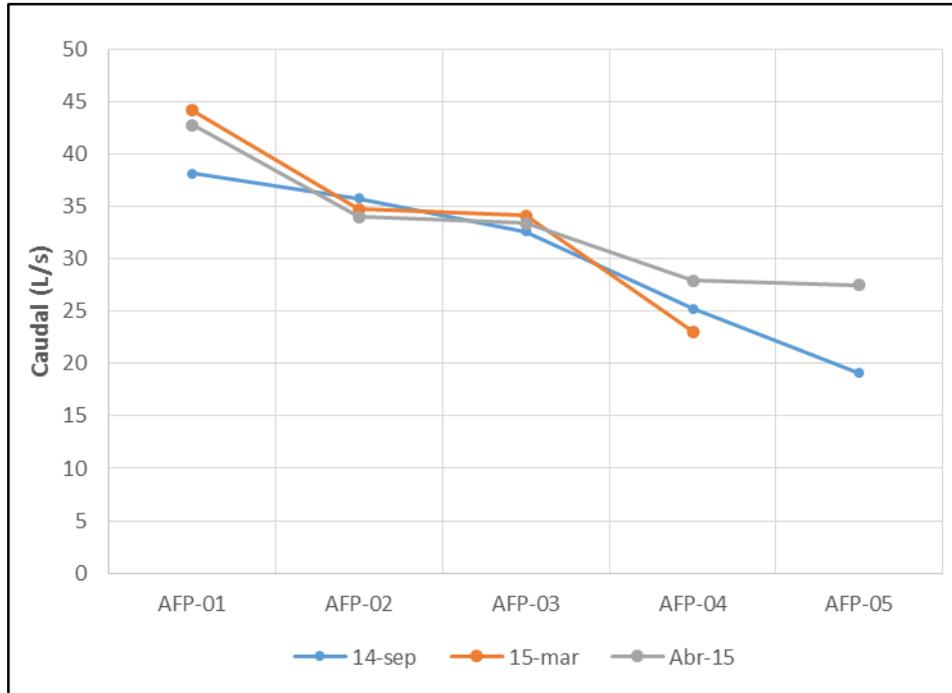


**Tabla 6-11 Resultados de Aforos**

PUNTO DE AFORO	FECHA DE AFORO	CAUDAL (L/s)
AFP - 00	02/09/2014	12,3
	11/10/2014	6,3
	13/11/2014	5,3
	11/12/2014	5,7
	07/01/2015	11,6
	19/02/2015	8,3
	05/03/2015	6,0
	12/04/2015	6,6
AFP - 01	04/09/2014	38,2
	09/03/2015	44,2
	14/04/2015	42,8
AFP - 02	04/09/2014	35,8
	09/03/2015	34,7
	14/04/2015	34,0
AFP - 03	04/09/2014	32,6
	09/03/2015	34,1
	14/04/2015	33,4
AFP - 04	03/09/2014	25,3
	12/10/2014	18,6
	09/11/2014	32,2
	07/03/2015	23,0
	15/04/2015	27,9
AFP - 05	07/03/2015	19,1
	15/04/2015	27,5
Anterepresa Tilomonte	11/09/2014	41,8
	12/10/2014	40,9
	11/11/2014	41,6
	08/12/2014	35,5
	07/01/2015	28,6
	14/02/2015	39,8
	09/03/2015	41,8
	08/04/2015	40,9
Acequia Tilomonte	11/09/2014	19,0
	12/10/2014	27,7
	11/11/2014	16,0
	08/12/2014	35,5
	07/01/2015	7,0

Fuente: Elaboración propia

**Figura 6-13 Aforos Lagunas Sistema Peine**



	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

## 7 HIDROQUÍMICA

En este capítulo se analizan los resultados de monitoreo químico e isotópico efectuados por el titular entre febrero 2013 y diciembre 2014. Adicionalmente, en el Apéndice F. Análisis físico-químico e isotópico del agua, se recopilan las tablas de resultados y certificados de laboratorio de cada punto muestreado en el marco del presente estudio. El análisis de estos resultados se complementó con antecedentes públicos y privados, de manera de tener una caracterización hidroquímica de las principales fuentes de aguas superficiales y subterráneas en la Cuenca del Salar de Atacama.

### 7.1 Objetivo y alcances

El objetivo de este capítulo es tener una caracterización química de las aguas superficiales y subterráneas que se encuentran en el área de influencia del Proyecto. Considerando que en el sector Este y Sur de la Cuenca del Salar se desarrollan sistemas ecológicos de interés, este estudio abarca de modo particular las lagunas del margen sur de la Cuenca, como son La Punta y La Brava y el sistema lagunar Peine y en el sector Norte del Salar, lagunas como Aguas de Quelana, y el sistema Soncor. (Figura 7-1).

De esta manera, los resultados hidroquímicos sirven para establecer una relación entre los flujos de aporte de agua subterránea, los sistemas lagunares y las salmueras del Núcleo del Salar, junto con proporcionar información que ayude a sustentar el modelo conceptual hidrogeológico del Salar Atacama.

**Figura 7-1 Área de estudio y ubicación de sistemas lagunares**



Fuente: Elaboración propia

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

## 7.2 Ubicación de sectores y puntos de monitoreo

En la Tabla 7-1 se presentan los puntos monitoreados, características principales y tipo de medición realizada durante 2013-2014, la que incluye medición de perfiles de conductividad y temperatura en pozos totalmente ranurados, análisis *in situ* de parámetros físico-químicos y muestreos químicos e isotópicos para su análisis en laboratorio.

En la Figura 7-2 se muestra en detalle la ubicación de estos puntos. Cabe mencionar que esta figura además incluye la ubicación de puntos monitoreados por terceros (en la variable hidroquímica) entre 2007 y 2013, los que se detallan en la siguiente sección.

Para facilitar la interpretación hidroquímica, la ubicación de los puntos de monitoreo se ha dividido en ocho (8) sectores (Figura 7-1), según el sistema lagunar que representen, la unidad hidrogeológica donde se emplacen, y su ubicación geográfica. Estos se definen a continuación:

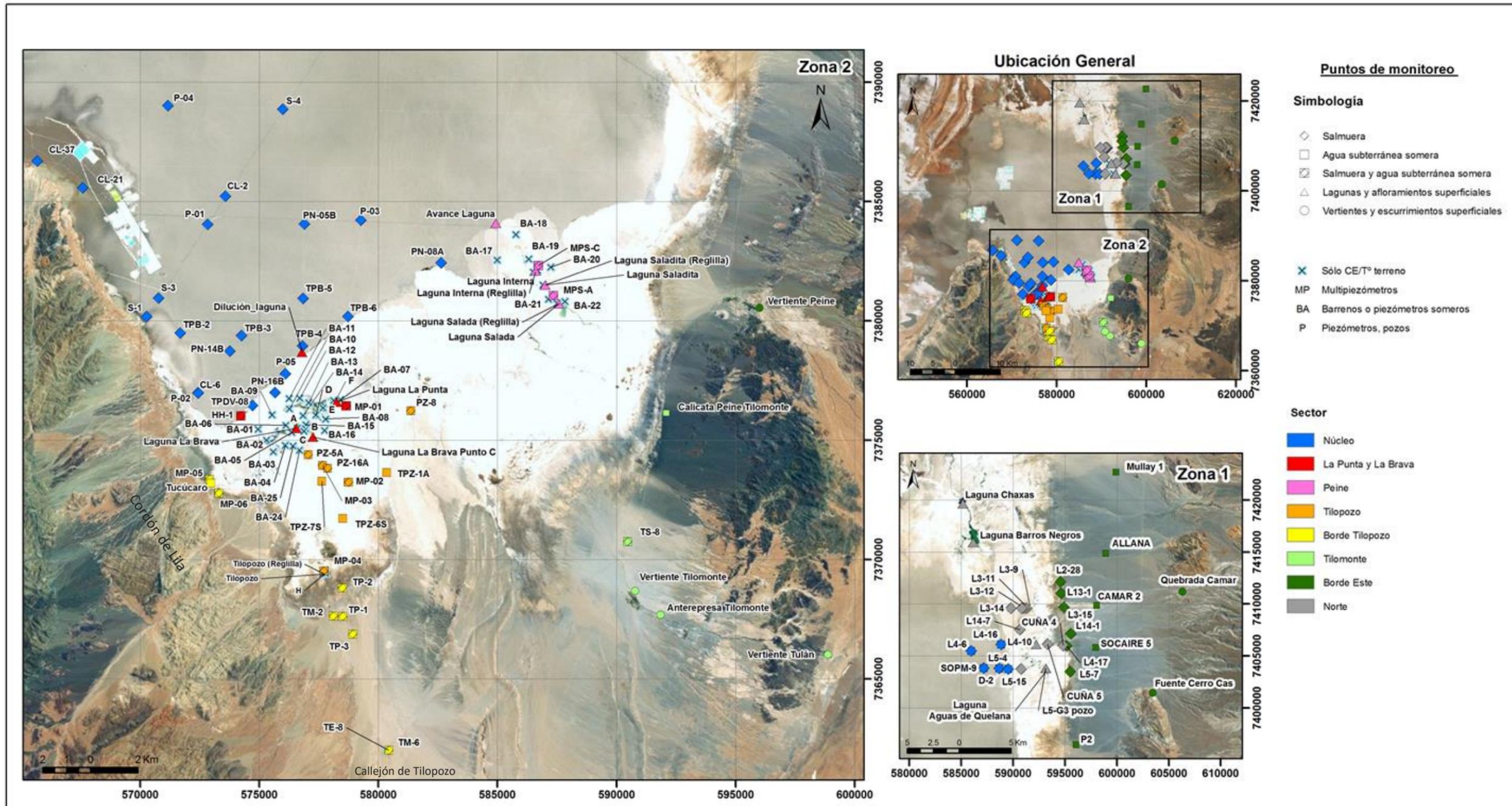
- **Núcleo costra de halita (N):** Incluye todos los pozos y/o afloramientos de agua que se encuentran en el área y borde de la costra de halita, que permitan la caracterización de la salmuera.
- **Sector La Punta y La Brava (PB):** incluye el monitoreo de las lagunas con estos mismos nombres y de aquellos pozos, piezómetros y barrenos alrededor de ellas, y otros puntos que permitan describir este sistema.
- **Sistema Peine (P):** incluye el monitoreo de las lagunas denominadas Salada, Saladita e Interna, así como pozos, piezómetros y barrenos alrededor de ellas, y otros puntos que permitan la caracterización de este sistema.
- **Sector Tilopozo (TZ):** entorno a la localidad de Tilopozo, se incluye todos los puntos de agua subterránea ubicados en el sector sur del Salar, en la costra sulfatada-carbonatada, y que recibe recarga de aguas subterráneas del acuífero de Monturaqui.
- **Sector Borde Tilopozo (BTZ):** A diferencia del anterior, los puntos en el borde occidental de Tilopozo, incluye a todos aquellos pozos ubicados fuera de la costra sulfatada-carbonatada, que se desarrollan sobre depósitos aluviales, en las faldas del Cordón de Lila y Callejón de Tilopozo.
- **Sector Tilomonte (TM):** Incluye todos los afloramientos y puntos de agua subterránea ubicados en el sector sureste del Salar, sobre depósitos aluviales, entorno a la localidad de Tilomonte.
- **Borde Este (BE):** Incluye todos los afloramientos de aguas superficiales ubicados en el sector oriental del área de estudio, donde afloran secuencias de lavas volcánicas y depósitos de relleno aluvial. Este sector incluye principalmente el monitoreo de escurrimientos y vertientes en las quebradas de Camar y Peine.
- **Sistema Norte (SN):** Incluye las lagunas de la Zona Marginal Este, que se desarrollan en el sector norte del Salar, denominadas Chaxa, Quelana y Barros Negros, y piezómetros, pozos, escurrimientos superficiales y vertientes que permitan su caracterización.

**Tabla 7-1 Red de monitoreo mensual SGA-Rockwood. Periodo 2013-2014**

Sector	Punto	Coordenadas (WGS 84)		Descripción	Profundidad (m)	Perfil Cond-Temp	sólo CE/pH/T in situ	Química	Isotopía	Comentarios	
		Este	Norte								
NUCLEO	CL-6	572.422	7.376.975	Piezómetro	s/i			x	x		
	CL-2	573.582	7.385.213	Piezómetro	s/i			x	x		
	CL-21	567.589	7.385.565	Piezómetro	30,0			x	x		
	CL-37	565.679	7.386.693	Piezómetro	30,0			x	x	medición puntual jun, 2013	
	P-01	572.834	7.384.032	Piezómetro	60,0			x	x		
	P-02	572.433	7.376.977	Piezómetro	28,4			x	x		
	P-03	579.260	7.384.212	Piezómetro	60,0			x	x		
	P-04	571.158	7.389.005	Piezómetro	60,0			x	x		
	P-05	576.091	7.377.780	Piezómetro	100,5			x	x		
	PN-05B	576.894	7.384.044	Piezómetro	30,0			x	x		
	PN-08A	582.634	7.382.429	Piezómetro	30,0			x	x		
	PN-14B	573.770	7.378.723	Piezómetro	50,0			x	x		
	PN-16B	575.663	7.376.996	Piezómetro	30,0			x	x		
	S-1	570.270	7.380.179	Piezómetro	s/i			x	x	medición puntual feb, 2013	
	S-3	570.775	7.380.949	Piezómetro	4,0			x	x		
	S-4	575.984	7.388.860	Piezómetro	24,0			x	x		
	TPB-2	571.683	7.379.480	Piezómetro	s/i			x	x	medición puntual feb, 2013	
	TPB-3	574.251	7.379.371	Piezómetro	s/i			x	x	medición puntual feb, 2013	
	TPB-4	576.812	7.378.943	Piezómetro	s/i			x	x	medición puntual feb, 2013	
	TPB-5	576.841	7.380.935	Piezómetro	4,9			x	x		
	TPB-6	578.728	7.380.171	Piezómetro	s/i			x	x	medición puntual feb, 2013	
	TPDV-08	574.720	7.376.454	Piezómetro	s/i			x	x		
	Dilución laguna	576.008	7.377.823	lámina de agua	-			x	x	medición puntual feb, 2013	
	PEINE	BA-17	584.997	7.382.542	Piezómetro somero	1,8		x			
		BA-18	585.778	7.383.610	Piezómetro somero	1,4		x			
		BA-19	586.321	7.382.592	Piezómetro somero	1,8		x			
		BA-20	587.247	7.382.250	Piezómetro somero	1,8		x			
		BA-21	587.159	7.380.905	Piezómetro somero	1,6		x			
BA-22		587.837	7.380.817	Piezómetro somero	1,8		x				
BA-23		586.684	7.382.108	Piezómetro somero	1,8		x				
Laguna Interna		586.605	7.382.101	Laguna	-			x	x		
Laguna Salada		587.586	7.380.722	Laguna	-			x	x		
Laguna Saladita		587.019	7.381.497	Laguna	-			x	x		
Avance laguna		584.940	7.384.090	lámina de agua	-			x	x	medición puntual oct, 2013	
MPS-AA		587.361	7.381.053	Piezómetro	4,0			x	x		
MPS-AB		587.360	7.381.056	Piezómetro	30,7			x	x		
MPS-AC		587.361	7.381.052	Piezómetro	40,0	x					
MPS-CA		586.725	7.382.313	Piezómetro	3,4	x				medición puntual nov, 2013	
MPS-CB	586.723	7.382.312	Piezómetro	42,0	x		x	x	mediciones puntuales, 2013-2014		
MPS-CC	586.726	7.382.313	Piezómetro	43,3	x						
PUNTA-LA BRAVA	BA-01	574.964	7.375.461	Piezómetro somero	1,6		x				
	BA-02	575.305	7.375.003	Piezómetro somero	1,5		x				
	BA-03	575.594	7.374.516	Piezómetro somero	1,4		x				
	BA-04	576.096	7.374.776	Piezómetro somero	1,7		x				
	BA-05	576.373	7.375.324	Piezómetro somero	1,8		x				
	BA-06	576.120	7.375.626	Piezómetro somero	1,4		x				
	BA-07	578.406	7.376.692	Piezómetro somero	1,9		x				
	BA-08	577.783	7.375.887	Piezómetro somero	1,9		x				
	BA-09	575.545	7.376.062	Piezómetro somero	1,8		x				
	BA-10	576.268	7.376.317	Piezómetro somero	1,6		x				
	BA-11	576.254	7.376.750	Piezómetro somero	1,6		x				
	BA-12	576.707	7.376.759	Piezómetro somero	1,4		x				
	BA-13	577.081	7.376.565	Piezómetro somero	1,4		x				
	BA-14	576.842	7.376.029	Piezómetro somero	1,5		x				
	BA-15	576.968	7.375.650	Piezómetro somero	1,4		x				
	BA-16	577.746	7.375.405	Piezómetro somero	1,5		x				
	BA-24	576.693	7.374.573	Piezómetro somero	1,8		x				
	BA-25	576.424	7.374.761	Piezómetro somero	1,8		x				
	Laguna La Brava	576.553	7.375.506	Laguna	-			x	x		
	Laguna La Brava Punto C	577.265	7.375.129	Laguna	-			x	x		
	Laguna La Punta	578.263	7.376.600	Laguna	-			x	x		
	MP-01A	578.647	7.376.429	Piezómetro	7,2			x	x		
	MP-01B	578.650	7.376.430	Piezómetro	30,4			x	x		
	MP-01C	578.646	7.376.429	Piezómetro	30,6	x					
	TPDV-09	574.465	7.375.708	Piezómetro	2,7			x	x		
HH_1	574.220	7.376.009	Piezómetro	s/i			x	x			
TILOMONTE	Acequia/Vertiente Tilomonte	590.777	7.368.684	Cauce superficial	-			x	x		
	Antepresa Tilomonte	591.962	7.367.618	Cauce superficial	-			x	x		
	Tulán	598.889	7.366.021	vertiente	-			x	x	medición puntual mar, 2013	
	Calicata Peine Tilomonte	592.103	7.376.138	Calicata	s/i			x	x	medición puntual feb, 2013	
	TS-8	590.465	7.370.743	Piezómetro	100,0	x		x	x		
TILOPOZO	MP-02A	578.747	7.373.235	Piezómetro	12,0			x	x		
	MP-02B	578.744	7.373.236	Piezómetro	52,0			x	x		
	MP-02C	578.748	7.373.235	Piezómetro	50,0	x					
	MP-03A	577.651	7.373.947	Piezómetro	12,5			x	x		
	MP-03B	577.653	7.373.947	Piezómetro	30,5			x	x		
	MP-03C	577.650	7.373.947	Piezómetro	30,3	x					
	MP-04A	577.716	7.369.509	Piezómetro	41,5			x	x		
	MP-04B	577.717	7.369.513	Piezómetro	81,7			x	x		
	MP-04C	577.713	7.369.510	Piezómetro	120,7	x					
	PZ-5A	577.054	7.374.385	Piezómetro	s/i			x	x		
	PZ-8	581.371	7.376.229	Piezómetro	s/i			x	x		
	PZ-16A	577.866	7.373.821	Piezómetro	s/i			x	x		
	Tilopozo	577.715	7.369.511	Vegas	0,0			x	x		
	TPZ-1A	580.347	7.373.650	Piezómetro	3,1			x	x		
	TPZ-6S	578.506	7.371.715	Calicata	s/i			x	x		
TPZ-7S	577.631	7.373.281	Calicata	s/i			x	x			
TPZ-6S	578.506	7.371.715	Piezómetro somero	s/i			x	x			
BORDE TILOPOZO	MP-05A	572.915	7.373.356	Piezómetro	20,2			x	x		
	MP-05B	572.913	7.373.356	Piezómetro	65,3			x	x		
	MP-05C	572.916	7.373.355	Piezómetro	80,0	x					
	MP-06A	573.298	7.372.778	Piezómetro	30,0			x	x		
	MP-06B	573.296	7.372.777	Piezómetro	60,0			x	x		
	MP-06C	573.299	7.372.779	Piezómetro	81,5	x		x	x		
	TM-2	578.116	7.367.622	Piezómetro	s/i			x	x		
	TM-6	580.451	7.362.009	Piezómetro	s/i			x	x		
	TP-1	578.503	7.367.615	Piezómetro	98,0			x	x		
	TP-2	578.497	7.368.805	Piezómetro	80,0			x	x		
	TP-3	578.925	7.366.868	Piezómetro	118,0			x	x		
	TE-1	578.091	7.367.635	Piezómetro	s/i			x	x	medición puntual feb-mar, 2013	
	TE-8	580.447	7.361.999	Piezómetro	s/i			x	x	medición puntual feb-mar, 2013	
	Tucúcaro	572.970	7.373.199	Calicata	s/i			x	x		
	BORDE ESTE	Quebrada Camar	606.314	7.411.194	Cauce superficial	-			x	x	
Fuente Cerro Cas		603.441	7.401.470	Vertiente	-			x	x	medición puntual mar, 2013	
Vert. Peine		596.010	7.380.542	Vertiente	-			x	x		
NORTE	Lag Aguas de Quelana	593.163	7.403.837	Laguna	-			x	x		
	Lag Barros Negros	586.194	7.415.908	Laguna	-			x	x		
	Lag Chaxas	585.201	7.419.629	Laguna	-			x	x		

Fuente: Elaboración propia

Figura 7-2 Puntos de monitoreo con información química y/o isotópica



Fuente: Elaboración propia

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

### 7.3 Antecedentes de los puntos de monitoreo

Para llevar a cabo la caracterización de la composición hidroquímica e isotópica, cada sector cuenta con la siguiente información:

#### Sector Núcleo del Salar

- En el marco del Proyecto Rockwood, se tienen monitoreos mensuales de química e isotopía efectuados entre marzo 2013 y diciembre 2014 (Tabla 7-1). En total estos corresponden a 22 puntos de aguas subterráneas (pozos/piezómetros) y 1 punto superficial referido a láminas de aguas eventuales (zonas de dilución, también denominadas “open pools”) que se desarrollan entre el límite de la costra de Halita y la costra sulfatada-carbonatada. Este último punto cuenta con análisis químicos e isotópicos de octubre 2013.
- Estudios anteriores como los de Fock (2009) cuenta con datos químicos (iones mayoritarios) de 5 pozos en el sector nororiental del Núcleo del Salar (Tabla 7-2).

#### Sector La Punta y Brava:

- Monitoreos mensuales de química e isotopía efectuados en 8 puntos, cuatro de los cuales corresponden a piezómetros. En total se tienen 93 análisis químicos e isotópicos de agua muestreadas entre marzo 2013 y diciembre 2014.
- Perfiles de conductividad y temperatura mensuales en el piezómetro MP-01C.
- Informe N° 13 del Plan de Alerta Temprana para el Acuífero Monturaqui-Negrillar-Tilopozo de Minera Escondida, MEL (2014). Contiene parámetros físico-químicos, entre 1998 y 2013, de las lagunas utilizando como lugar de referencia las reglillas (denominadas sistemáticamente por una letra) ubicadas en cada uno de estos cuerpos de agua. Estos corresponden a la Laguna La Brava (A, B, C), Laguna La Punta (D, E, F).
- Estos se complementan con datos químicos obtenidos de tesis y publicaciones, tales como McCartney (2001) en su estudio hidroquímico de las aguas subterráneas en el sector de Tilopozo.
- Estudios isotópicos ( $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$  y clorofluorocarbonos (CFC), realizados por Munk and Hynek (2012) contribuyen a entender el proceso de infiltración en este sector.

#### Sector borde Tilopozo

- Monitoreos químicos e isotópicos en 14 puntos, y perfiles de conductividad y temperatura, efectuados entre marzo 2013 y diciembre 2014. En total se obtuvieron 83 análisis químicos e isotópicos, en su mayoría de piezómetros instalados en los depósitos aluviales, seguido de muestras de zanja en la quebrada Tucúcaro, muestreada puntualmente entre febrero y noviembre de 2013.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

### Sector Tilopozo:

- Monitoreos mensuales de química e isotopía efectuados en el contexto de este estudio, y perfiles de conductividad y temperatura entre marzo 2013 y diciembre 2014. En total se cuenta con 131 análisis químicos e isotópicos.
- Informe N° 13 del Plan de Alerta Temprana para el Acuífero Monturaqui-Negrillar-Tilopozo (MEL, 2014). Contiene parámetros físico-químicos de la vega de Tilopozo (punto H).
- Estudios isotópicos ( $\delta^{18}O$ - $\delta D$  y clorofluorocarbonos (CFC), realizados por Munk and Hynek (2012) contribuyen a entender el proceso de infiltración en este sector.

### Sector Peine

- Monitoreos mensuales de química e isotopía efectuados en las lagunas y multipiezómetros, y perfiles de conductividad y temperatura, entre febrero 2013 y diciembre 2014. En total se obtuvieron 103 análisis químicos e isotópicos, 45 de ellos corresponden a los piezómetros MPS y el resto a muestra de las lagunas Salada, Saladita e Interna.
- Estudios anteriores, tales como el Informe N° 14 Plan de Seguimiento de SQM-Geohidrología (2014), contiene datos entre 2007 y 2013 (Tabla 7-2).
- Este reporta información química in situ de 2 puntos, L10-1 y L10-4, y análisis de químicos en 3 puntos de las lagunas, denominados reglillas Salada, Saladita e Interna.
- Perfiles de conductividad mensual medidos por SQM entre 2007 y 2014.

### Sector Tilomonte

- Monitoreos mensuales de química e isotopía efectuados en el contexto de este estudio, y perfiles de conductividad y temperatura (pozo TS-8) entre febrero 2013 y diciembre 2014. En total se cuenta con 45 análisis químicos e isotópicos de 5 puntos, 2 puntos de aguas superficiales (acequia/vertiente y antepresa Tilomonte) y 3 puntos de aguas subterráneas (1 pozo, 1 excavación y 1 vertiente). Estos se desglosan como sigue:
  - Acequia/vertiente Tilomonte, 18 análisis químicos e isotópicos entre febrero 2013 y noviembre 2014 (marzo y abril 2013 sin datos).
  - Antepresa, 4 muestras, marzo 2013, octubre, noviembre y diciembre 2014
  - Vertiente Tulán, 1 muestra, marzo 2013
  - Pozo TS-8, 20 análisis químicos e isotópicos entre marzo 2013 y noviembre 2014
  - Calicata, 1 muestra, febrero 2013.

### Borde Este

- Monitoreos mensuales de química e isotopía efectuados en el contexto de este estudio, entre junio 2013 y diciembre 2014. En total se cuenta con 21 análisis químicos e isotópicos de la Quebrada de Camar, ubicada en el sector nororiental del área de estudio, y otros 21 análisis químicos e isotópicos de la vertiente de Peine, y 1 de la vertiente Cas.
- Estudios anteriores llevados a cabo por SQM en el sector nororiental del Salar permiten complementar el análisis del Borde Este. Se reporta información química in situ y de laboratorio (iones mayoritarios,

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

Arsénico, zinc, hierro y manganeso) de 7 puntos: Allana, Camar 2, Socaire 5, Mullay 1, L2-3, L4-3 y P2 (Tabla 7-2 y Figura 7-2).

- Además, datos químicos obtenidos de tesis y publicaciones, tales como Fock (2009) en su estudio del Acuífero Aluvial del Borde Este del Salar de Atacama, entre Quebradas Camar y Socaire, cuenta con datos químicos muestreados en diciembre 2009 (Tabla 7-2).

### Sector Norte

- Monitoreos mensuales de química e isotopía efectuados en el contexto de este estudio, entre mayo 2013 y diciembre 2014. Se cuenta con 17 análisis químicos e isotópicos de aguas superficiales para cada una de las lagunas Aguas de Quelana, Barros Negros, Chaxa (en total 51 análisis).
- Estudios anteriores llevados a cabo por SQM presentan datos de conductividad eléctrica de 14 puntos, con datos entre 2007 y 2013.
- Datos químicos e isotópicos obtenidos de tesis y publicaciones, tales como Fock (2009), y Salas *et al.* (2010) referente a la hidrogeología del sistema lagunar del margen este del Salar, etc.
- Perfiles de conductividad mensual medidos por SQM entre 2007 y 2014.

**Tabla 7-2 Puntos monitoreados por terceros. Periodo 2007-2013**

Sector	Fuente	Punto de Monitoreo	Tipo de punto	Profundidad (m)	Coordenadas UTM (Datum WGS84)		
					Este	Norte	
BORDE ESTE	SQM (2007-2013)	ALLANA	cauce	-	598.933	7.414.864	
		CAMAR 2	cauce	-	598.048	7.409.857	
		Mullay 1	piezómetro	157	599.918	7.422.647	
		P2	piezómetro	59	596.063	7.396.456	
		SOCAIRE 5	piezómetro	82	597.952	7.405.823	
	Fock (2009)	CAMAR 2	cauce	-	598.048	7.409.857	
		L2-28	piezómetro	25	594.585	7.412.134	
		L3-15	piezómetro	50	594.922	7.409.667	
		L4-17	piezómetro	11	595.169	7.405.966	
		L5-7	piezómetro	11	595.448	7.403.484	
		L13-1	piezómetro	11	594.639	7.411.012	
		L14-1	piezómetro	11	595.568	7.407.112	
		SOCAIRE 5	piezómetro	82	597.952	7.405.823	
NUCLEO	Fock (2009)	D-2	calicata	0	588.662	7.403.782	
		L4-6	piezómetro	s/í	585.966	7.405.471	
		L4-16	piezómetro	11	588.869	7.406.103	
		L5-4	piezómetro	s/í	589.542	7.403.729	
		SOPM-9	piezómetro	40	587.169	7.403.826	
	SQM (2007-2013)	1001	piezómetro	s/í	575.189	7.392.248	
		1028	piezómetro	30	584.432	7.384.000	
		SOPM-7	piezómetro	30	583.567	7.412.049	
		SOPM-12C	piezómetro	30	574.438	7.394.297	
L4-6	piezómetro	s/í	585.966	7.405.471			
	TILOPOZO	MEL (1998-2013)	H	vegas	-	577.873	7.369.420
LA PUNTA-LA BRAVA	MEL (1998-2013)	A	laguna	-	576.677	7.375.496	
		B	laguna	-	577.035	7.375.491	
		C	laguna	-	576.965	7.375.372	
		D	laguna	-	577.465	7.376.054	
		E	laguna	-	577.765	7.376.360	
		F	laguna	-	578.209	7.376.670	
NORTE	Fock (2009)	CUÑA 4	piezómetro	123	594.818	7.406.013	
		CUÑA 5	piezómetro	37	593.338	7.406.136	
		L3-9	piezómetro	5	591.313	7.409.576	
		L3-11	piezómetro	5	591.056	7.409.585	
		L3-12	piezómetro	11	590.856	7.409.584	
		L3-14	piezómetro	11	589.772	7.409.574	
		L4-10	piezómetro	s/í	592.246	7.406.118	
		L5-15	piezómetro	11	590.790	7.403.726	
		L5-G3 Pozo	piezómetro	0	593.160	7.403.838	
		L14-7	piezómetro	5	590.655	7.407.522	
		SQM (2007-2013)	Barros negros	laguna	-	585.803	7.416.976
			Burro Muerto	laguna	-	584.130	7.424.289
			Chaxa	laguna	-	585.209	7.419.653
	L1-4		piezómetro	s/í	588.137	7.416.188	
	L1-5		piezómetro	s/í	584.211	7.415.044	
	L1-6		piezómetro	5	589.606	7.416.219	
	L1-G4		laguna	s/í	585.210	7.414.817	
	L2-4		piezómetro	22,45	591.850	7.414.612	
	L2-5		piezómetro	s/í	588.271	7.414.007	
	L4-10		piezómetro	s/í	592.246	7.406.118	
	L4-12		piezómetro	5	590.333	7.406.059	
	L4-8		piezómetro	5	593.360	7.406.131	
	L4-9		piezómetro	5	592.623	7.406.147	
	L5-3		piezómetro	s/í	593.971	7.403.546	
	L7-3		piezómetro	s/í	591.857	7.422.586	
	L7-G1		piezómetro	s/í	585.706	7.418.825	
	Puilar		laguna	s/í	587.917	7.422.528	
	SOPM-14		piezómetro	80	583.988	7.414.056	
	PEÑE		SQM (2007-2013)	Laguna Interna reglilla	laguna	-	586.999
		Laguna Salada reglilla		laguna	-	586.591	7.382.048
		Laguna Saladita reglilla		laguna	-	587.601	7.380.733
		L10-1		piezómetro	201	591.439	7.380.663
L10-4		piezómetro		5	588.560	7.382.732	

Fuente: elaboración propia

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

## 7.4 Metodología de muestreo y análisis de laboratorio

### 7.4.1 Perfiles de Conductividad y Temperatura

Para contribuir al conocimiento de la profundidad y la dinámica de la interfase salina, la cual se estudia con más detalle en la sección 8.4, se realizaron perfiles de temperatura y conductividad eléctrica con una sonda marca Solinst, Modelo TLC 107, de 150 m de largo.

Es importante mencionar que las lecturas de conductividad de este equipo son de 0 a 80.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  con una exactitud del 5% en la lectura o de 100  $\mu\text{S}$  (cualquiera que sea mayor), y por lo tanto para medidas en aguas salobres o salmueras de mayor conductividad los valores entregados por el equipo no tienen la precisión indicada. La conductividad que se despliega en la pantalla del equipo está automáticamente estandarizada a 25°C. Por otra parte, el sensor de temperatura opera en un rango entre -15°C y +50°C y posee un precisión de  $\pm 0,2^\circ\text{C}$ .

Los perfiles se realizaron en 11 piezómetros, 9 de ellos totalmente ranurados, que son los denominados “C” y el pozo TS-8 (Tabla 7-1). A partir del nivel del agua en el pozo, se hizo descender la sonda, registrándose la lectura de conductividad y temperatura, en intervalos centimétricos a métricos, según la variación de la conductividad. Los intervalos se realizaron entre 20-50 cm en los primeros metros, y en profundidades donde se observaron variaciones bruscas de conductividad. Cuando los valores de conductividad se presentaron relativamente uniformes, las mediciones se efectuaron cada un metro.

### 7.4.2 Parámetros físico-químicos in situ y muestreo en terreno

En el lugar de muestreo se midieron los parámetros físico-químicos de pH, temperatura y conductividad eléctrica, con un equipo multiparámetro Hanna, Modelo HI 9828.

Las lecturas de conductividad del multiparámetro van desde 0 a 200.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (CE real hasta 400 mS/cm) con una precisión de  $\pm 1 \mu\text{S}/\text{cm}$ . La conductividad está automáticamente estandarizada a 25°C. Mientras, el sensor de temperatura opera en un rango entre los -5°C y los +55°C y posee un precisión de  $\pm 0,15^\circ\text{C}$ .

En terreno, también se midió la alcalinidad total (mg/L  $\text{CaCO}_3$ ) utilizando un titulador de alcalinidad modelo HI 84431, marca Hanna.

### 7.4.3 Almacenamiento y traslado de muestras

En la Tabla 7-3 se muestran las características de los envases, los volúmenes de muestra y los preservantes, para los distintos parámetros a analizar en cada uno de los puntos de muestreo.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

**Tabla 7-3 Características de los envases tomados en terreno**

CANTIDAD ENVASE	TIPO DE ENVASE	VOLUMEN REQUERIDO [Litros]	PRESERVACION REQUERIDA	PARAMETRO A MEDIR
2	PAD	1,0	Refrigeración 4°C	Parámetros Generales: pH, Conductividad, Cloruro, Sólidos Totales Disueltos, Sulfatos
1	PAD	250 ml	Adición ácido nítrico hasta pH< 2 y refrigeración 4 °C	Metales Totales: Ca, Mg, Na, K, Ag, Al, As, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Li, Mn, Mo, Ni, Pb, Se, Si, Sr, V, Zn
1 *	PAD	250 ml	Adición ácido nítrico hasta pH< 2, Filtrado en terreno a 0,45 µm y refrigeración 4 °C	Metales Disueltos: Zn, Si, Ag, Li, Sr, Ba, B, As, Ca, K, Mg, Na
1	PAD	0,5	Refrigeración 4 °C	Bromuros
1	PAD	0,125	Refrigeración a 10°C	Deuterio y Oxígeno-18
1	PAD	0,5	Adición de ácido sulfúrico, Refrigeración 4°C	Nutrientes
1 **	Vidrio Esterilizado Transparente	1	Adición de HCl, Refrigeración 4°C	Grasas y Aceites

**Observación:** (\*) In Situ se recolectó 1 L de Agua natural por punto, que luego es filtrado y vertido en este envase.

(\*\*) Sólo se toma para el punto CL-6.

Fuente: elaboración propia

#### 7.4.4 Análisis químico e isotópico de aguas en laboratorio

Se colectaron muestras de agua superficial y subterránea para análisis químico e isotópico, según la norma NCh 411.

Los puntos de agua subterránea somera fueron muestreados utilizando una bomba peristáltica Geotech o un bailer desechable de 1,66” y capacidad de 1 L.

En los pozos profundos, el muestreo se realizó con una motobomba, marca Hyundai, y una bomba Grunfos sumergible, que fue sustituida en noviembre de 2014 por una bomba Waterra Power-Pack PP-1. Durante esta etapa, y para obtener una muestra representativa, los pozos se purgaron entre una y tres veces el volumen de agua contenido en éstos.

Las muestras más salinas, superficiales y subterráneas, cuyos envases estuvieron destinados a análisis de metales disueltos, fueron filtradas en terreno a 0,45 µm con un equipo Merck de 250 ml de capacidad.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

Los parámetros analizados en laboratorio son los que se indican en la Tabla 7-5, en la que además se señalan cuáles de estos elementos forman parte de las normas chilenas de calidad de agua para riego y agua potable, NCh 1333 y NCh 409/1, respectivamente.

Las muestras colectadas fueron analizadas por el laboratorio SGS hasta Febrero de 2014, que cuenta con las certificaciones ISO 9001:2000 corporativo y AS/NZS ISO 14001:2004, y acreditaciones LE057, LE631 que acreditan al laboratorio para ensayos según la LE632 y LE 117 para el área físico-química para aguas.

Desde Marzo hasta Diciembre de 2014, las muestras se analizaron con el laboratorio ALS, que cuenta con acreditación NCh-ISO 17025:2005, bajo los Certificados: N° Certificado LE 223 Área Físico-Química para Suelos y Riles, N° Certificado LE 224 Área Físico-Química para Agua Potable, Fuentes de Captación y Aguas Residuales, convenio INN-SISS, N° Certificado LE 844 Área Química para dispositivos de contaminación atmosférica.

En la Tabla 7-4, se indica los procedimientos analíticos y el código de Standard Methods utilizados por los laboratorios.

Respecto a los análisis isotópicos, estos se realizaron a partir de mayo de 2013. Se colectaron muestras de agua para análisis isotópico de deuterio ( $\delta D$ ) y oxígeno-18 ( $\delta^{18}O$ ). Estos envases fueron enviados para su análisis a la Universidad de Anchorage (Alaska). Los resultados fueron reportados en relación al standard V-SMOW con una precisión de  $\pm 1\%$  para el hidrógeno (deuterio) y de  $\pm 0,1\%$  para el oxígeno.

**Tabla 7-4 Procedimientos analíticos y límites de detección**

Parámetro	Código Método	Analito	Límite de detección	Unidad
pH por método Potenciométrico	4500-H-B	pH	0,1	UpH
Conductividad por método Potenciométrico	2510-B	CE	1	µS/cm
Sólidos Disueltos Totales por Gravimetría	2540-C	STD	10	mg/L
Densidad Específica por Picnometría	-	Den		g/cm <sup>3</sup>
Grasas y Aceites por Método Gravimétrico*	5520-B	-	10	mg/L
Alcalinidad total por Volumetría	2320 B	Alk	0,2	mg/L
Calcio Disuelto por Absorción Atómica	3111-D	Ca	0,01	mg/L
Potasio Disuelto por Absorción Atómica	3111-B	K	0,01	mg/L
Magnesio Disuelto por Absorción Atómica	3111-D	Mg	0,01	mg/L
Sodio Disuelto por Absorción Atómica	3111-B	Na	0,01	mg/L
Cloruro por Cromatografía iónica con supresión química	4110-B	Cl	5	mg/L
Sulfato por Gravimetría con secado de residuos	4500-SO4 D	SO <sub>4</sub>	10	mg/L
Bicarbonato por Volumetría	2320-B	HCO <sub>3</sub>	0,2	mg/L
Nitrato por Espectrofotometría Ultravioleta	4500-NO3-B	NO <sub>3</sub>	0,01	mg/L
Calcio Total por Absorción Atómica	3111-D	Ca	0,01	mg/L
Potasio Total por Absorción Atómica	3111-B	K	0,01	mg/L
Magnesio Total por Absorción Atómica	3111-D	Mg	0,01	mg/L
Sodio Total por Absorción Atómica	3111-B	Na	0,01	mg/L
Fluoruros por Cromatografía iónica con supresión química	4110-B	F	0,5	mg/L
Bromuros por Colorimetría	-	Br	0,5	mg/L
Plata Disuelto por Absorción Atómica	3111-C	Ag	0,01	mg/L
Arsénico Disuelto por Absorción Atómica	3114-B	As	0,01	mg/L
Boro Disuelto por Potenciometría	3120	B	0,01	mg/L
Bario Disuelto por Absorción Atómica	3111-D	Ba	0,01	mg/L
Litio Disuelto por Absorción Atómica	3111-B	Li	0,01	mg/L
Silicio Disuelto por Absorción Atómica	3111-D	Si	0,01	mg/L
Estroncio Disuelto por Absorción Atómica	3111-D	Sr	0,01	mg/L
Zinc Disuelto por Absorción Atómica	3111-C	Zn	0,01	mg/L
Plata Total por Absorción Atómica	3111-C	Ag	0,01	mg/L
Aluminio Total por Absorción Atómica	3111-D	Al	0,05	mg/L
Arsénico Total por Absorción Atómica	3114-B	As	0,01	mg/L
Boro Total por Potenciometría	4500-B	B	0,01	mg/L
Bario Total por Absorción Atómica	3111-D	Ba	0,01	mg/L
Berilio Total por Absorción Atómica	3111-D	Be	0,01	mg/L
Cadmio Total por Espectrofotometría	3111-C	Cd	0,01	mg/L
Cobalto Total por Espectrofotometría	3111-C	Co	0,01	mg/L
Cromo Total por Espectrofotometría	3111-C	Cr	0,01	mg/L
Cobre Total por Espectrofotometría	3111-C	Cu	0,01	mg/L
Hierro Total por Espectrofotometría	3111-C	Fe	0,01	mg/L
Litio Total por Absorción Atómica	3111-B	Li	0,01	mg/L
Manganeso Total por Potenciometría	3111-C	Mn	0,01	mg/L
Molibdeno Total por Espectrofotometría	3111-D	Mo	0,01	mg/L
Niquel Total por Espectrofotometría	3111-C	Ni	0,01	mg/L
Plomo Total por Espectrofotometría	3111-C	Pb	0,01	mg/L
Selenio Total por Absorción Atómica	3114-B	Se	0,01	mg/L
Silicio Total por Absorción Atómica	3111-D	Si	0,01	mg/L
Estroncio Total por Absorción Atómica	3111-D	Sr	0,01	mg/L
Vanadio Total por Absorción Atómica	3111-D	V	0,01	mg/L
Zinc Total por Absorción Atómica	3111-C	Zn	0,01	mg/L

Observación: (\*) Medido solamente en el Punto CL-6

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 7-5 Parámetros analizados en el muestreo de aguas.**

Parámetros		NCh 1333	NCh 409/1			
Parámetros FQ in situ	pH					
	Conductividad					
	Temperatura					
	Alcalinidad total					
	Alcalinidad carbonatada					
Parámetros FQ laboratorio	pH	√	√			
	Conductividad					
	SDT		√			
	Densidad					
	Alcalinidad total					
Elementos Mayoritarios	Disueltos	Calcio				
		Potasio				
		Magnesio				
		Sodio				
		Cloruro	√	√		
		Sulfato	√	√		
		HCO3				
	Totales	NO3		√		
		Calcio				
		Potasio				
		Magnesio		√		
		Sodio				
		Elementos minoritarios	Disueltos	Fluoruros	√	√
				Bromuros		
Plata						
Arsénico						
Boro						
Bario						
Litio						
Silicio						
Estroncio						
Zinc						
Totales	Plata			√		
	Aluminio		√			
	Arsénico		√	√		
	Boro		√			
	Bario		√			
	Berilio		√			
	Cadmio		√	√		
	Cobalto		√			
	Cromo		√	√		
	Cobre		√	√		
	Hierro		√	√		
	Litio		√			
	Manganeso		√	√		
	Molibdeno		√			
	Níquel		√			
Plomo	√		√			
Selenio	√	√				
Silicio						
Estroncio						
Vanadio	√					
Zinc	√	√				

Fuente: Elaboración propia

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

#### 7.4.5 Tratamiento de los datos

##### – Balance iónico

Para todas las muestras se calculó el error de balance mediante la siguiente fórmula donde se consideran los cationes y aniones mayoritarios (Na, Ca, Mg, K, Cl, HCO<sub>3</sub>, SO<sub>4</sub> y, si está analizado, NO<sub>3</sub>), y algunos cationes minoritarios dominantes (Li, B, Sr), en meq/L (Custodio y Llamas, 2001; SEA, 2012):

$$Error (r\%) = \frac{\Sigma cationes - \Sigma aniones}{\Sigma cationes + \Sigma aniones} \times 100$$

Dado que las aguas deben mostrar un equilibrio eléctrico entre las cargas de sus especies disueltas, el error de balance admitido es comúnmente de 5%, en valor absoluto. Sin embargo, en este trabajo, se han tolerado en algunos casos errores de hasta un 7%, particularmente en muestras muy salinas.

#### 7.5 Perfiles de conductividad eléctrica

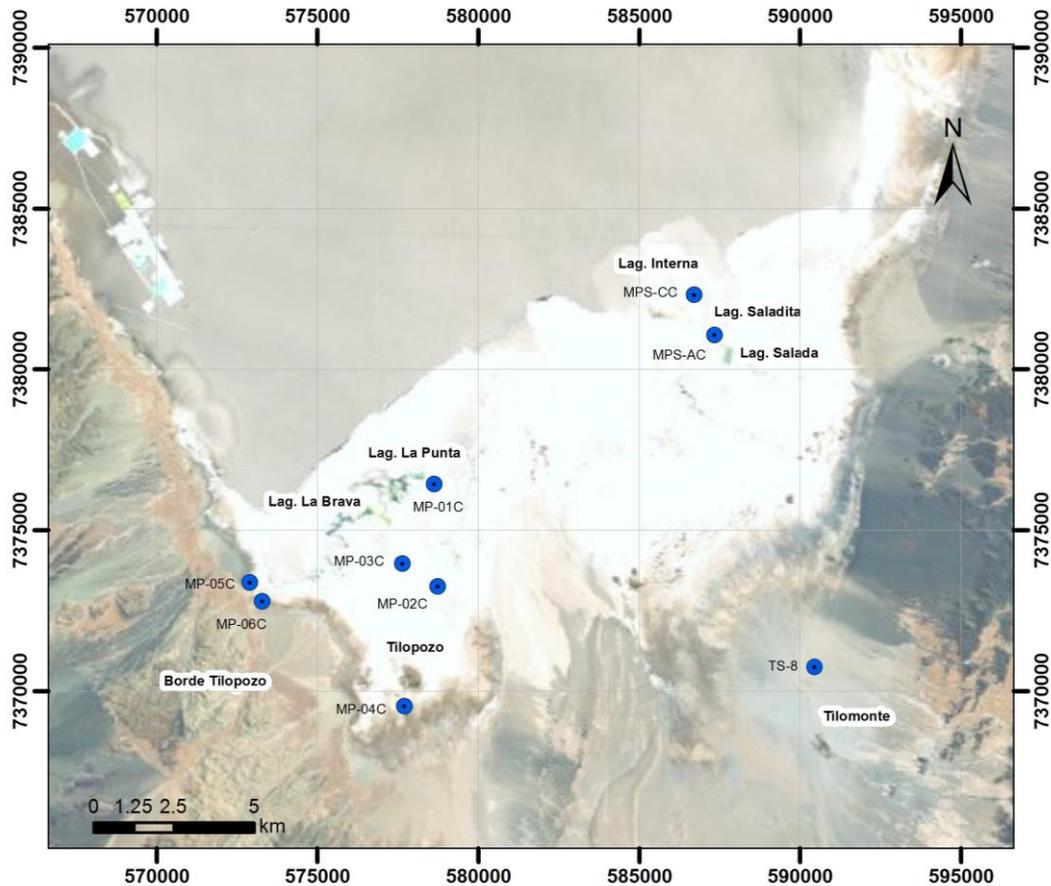
Los perfiles de conductividad se realizaron sistemáticamente todos los meses de preferencia en los piezómetros completamente ranurados, que se denominan “C”, y en áreas sin explotación de aguas subterráneas.

En total, se tiene información representativa de la profundidad de la interfase salina en 9 puntos (Figura 7-3), que involucran los sectores de las lagunas La Punta y La Brava, Tilopozo, sector de las lagunas Salada, Saladita e Interna (Peine) y Tilomonte.

Como se mencionó en la sección 7.4.1 la sonda de conductividad tiene una precisión aceptable entre los 0 y los 80.000 µS/cm, por lo que en los perfiles estos valores se han representado con una línea *verde*. En los pozos donde se reconocen valores mayores a 80.000 µS/cm, estos igualmente se han registrado con el fin de determinar la zona de contacto entre el agua del acuífero y la salmuera, es decir la zona de la interfase salina.

Las campañas se realizaron entre abril 2013 y diciembre 2014, se entregan y analizan a continuación.

**Figura 7-3 Ubicación de los sondeos con perfiles de conductividad.**



**Simbología**

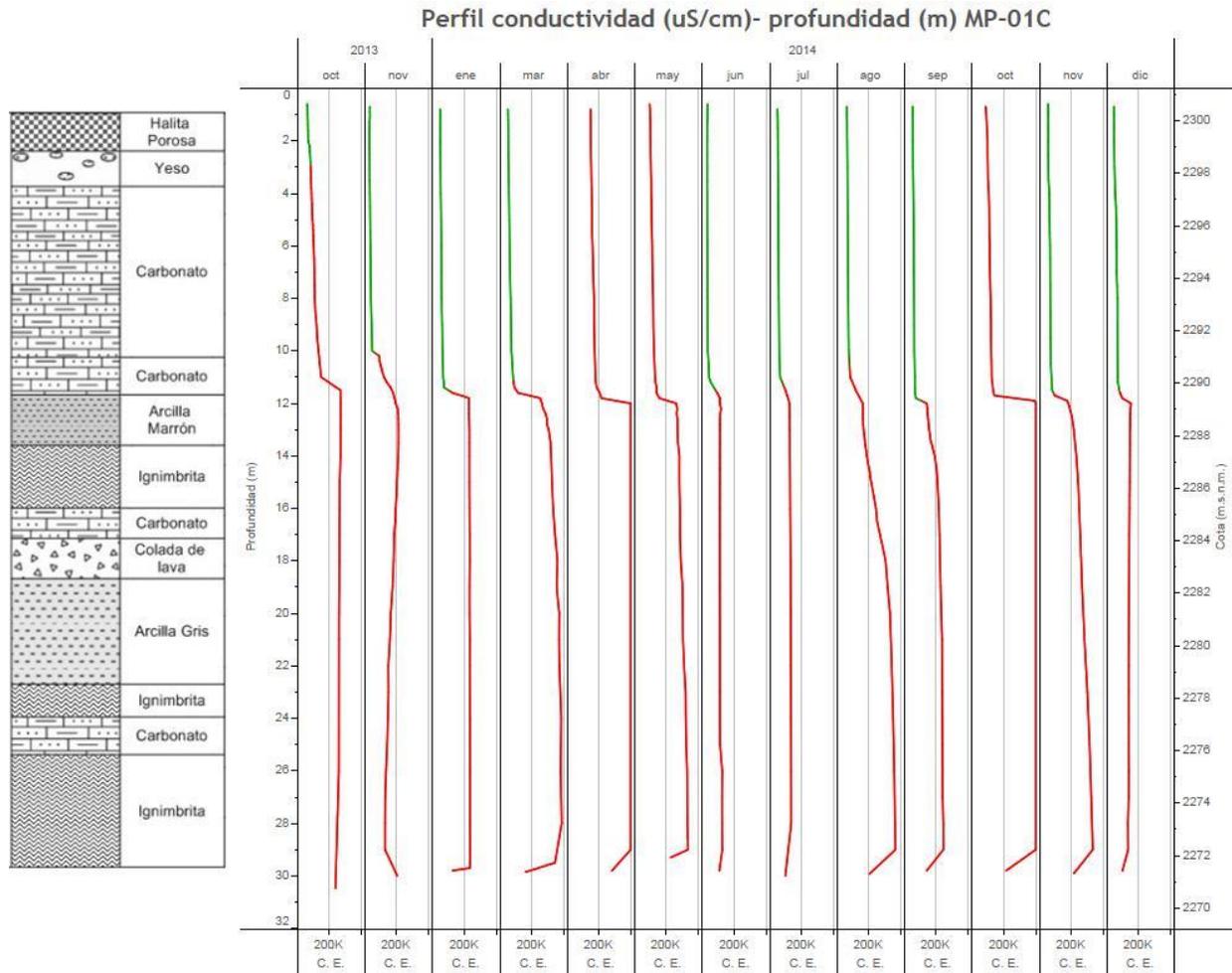
- Sondeos con Perfil de conductividad eléctrica

**7.5.1 Resultados**

En el sector La Punta-La Brava, la Figura 7-4, se presenta la variación de la conductividad en relación a la profundidad en el punto MP-01C, comprendido en el periodo 2013-2014.

En la Figura 7-4 se observa un cambio significativo de las medidas en los primeros 12 metros. En la mayoría de los casos, las aguas presentan valores por debajo de los 80.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , seguido de un aumento en la conductividad con valores superiores a 200.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Esta zona de inflexión se interpreta como una zona de contacto entre las aguas del acuífero y la salmuera. Particularmente, la cota en la cual se encontraría esta interfase salina corresponde a los 2290,2 m.s.n.m. (cota collar – profundidad = 2301,2 m- 12 m).

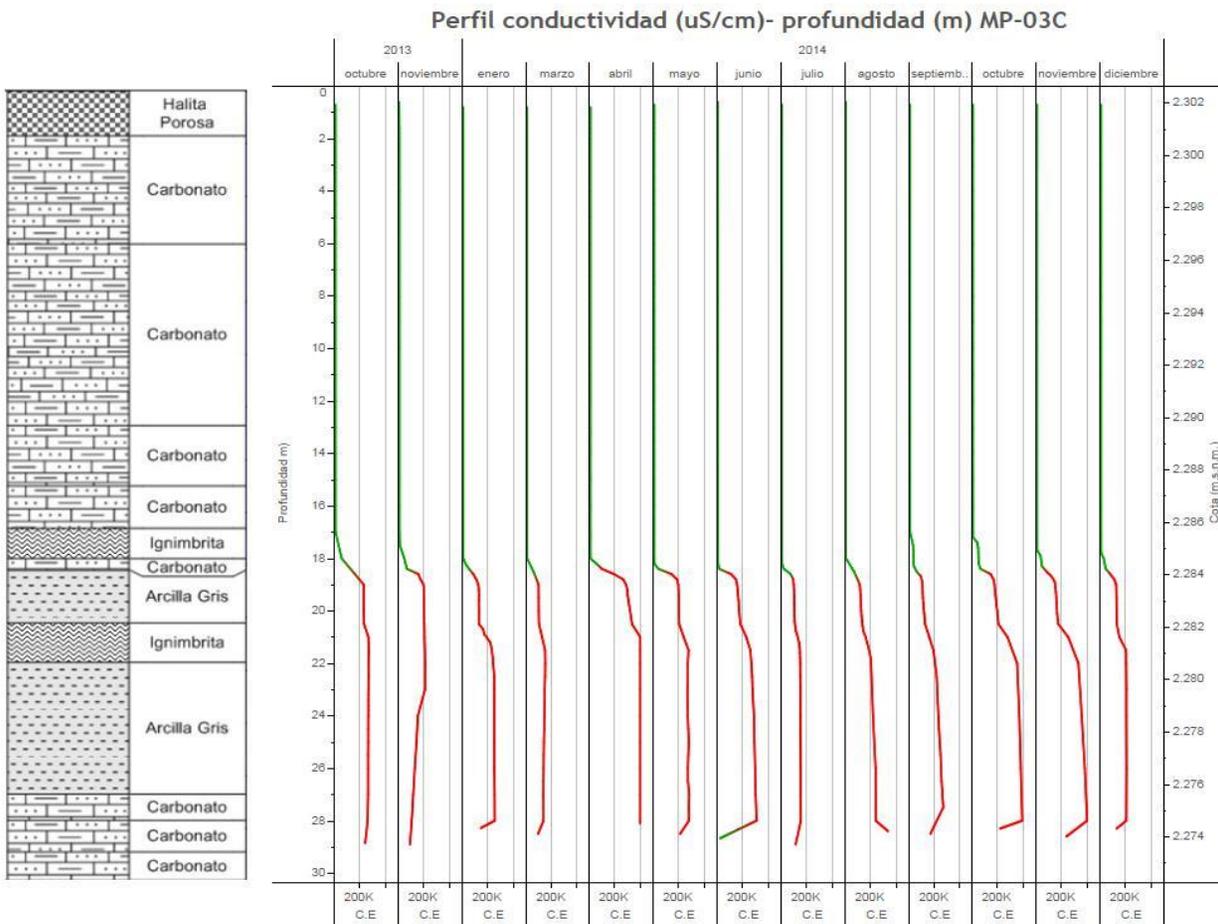
**Figura 7-4 Perfil de Conductividad piezómetro MP-01C, La Punta- La Brava.**



Al sur de las Lagunas La Punta y La Brava, en el sector de Tilopozo (Figura 7-1), la variación de la conductividad en relación a la profundidad está caracterizada por los perfiles C.E de los puntos MP-03C, MP-02C (Figura 7-5) y MP-04C (Figura 7-7), que se alinean en la Zona Marginal del Salar, en dirección norte-sur.

En el punto MP-03C, los valores de conductividad son inferiores a 80.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en los primeros 18 m, seguido de un aumento en la conductividad que supera los 200.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . La cota aproximada donde se produce la inflexión salina y que se interpreta como la posición de la interfase salina se encuentra en torno a los 18 m de profundidad, equivalente a la cota 2.285,6 m.s.n.m. (cota collar – profundidad = 2.303,6 m-18 m).

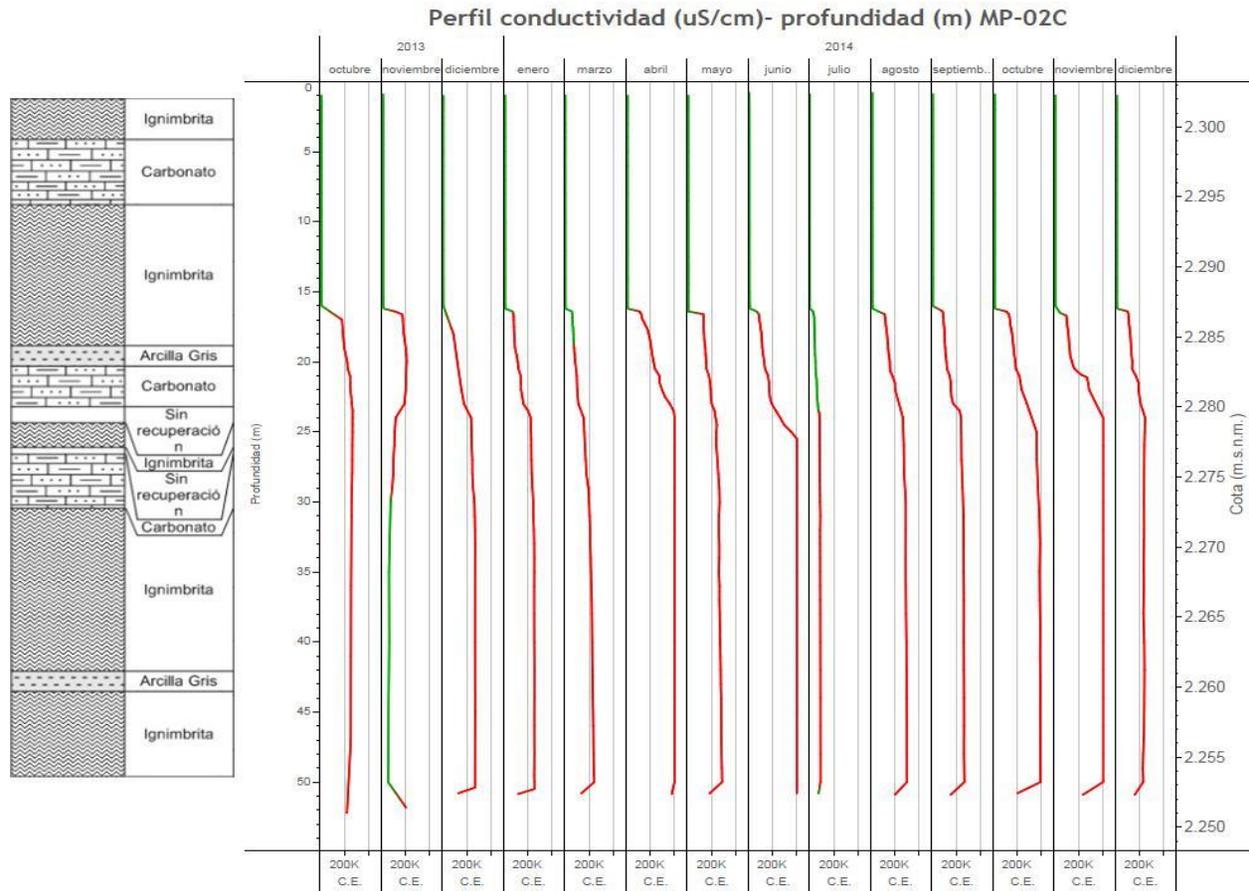
**Figura 7-5 Perfil de Conductividad piezómetro MP-03C, Sector Tilopozo**



Fuente: Elaboración propia

Aguas arriba, en el punto MP-02C (Figura 7-6) los primeros 16 m presentan valores de conductividad son inferiores a 80.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . De manera similar a los otros pozos, la conductividad incrementa superando los 200.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . La cota donde se interpreta la posición de la interfase salina corresponde a 2.287,2 m.s.n.m. (cota collar – profundidad = 2.303,2m- 16m).

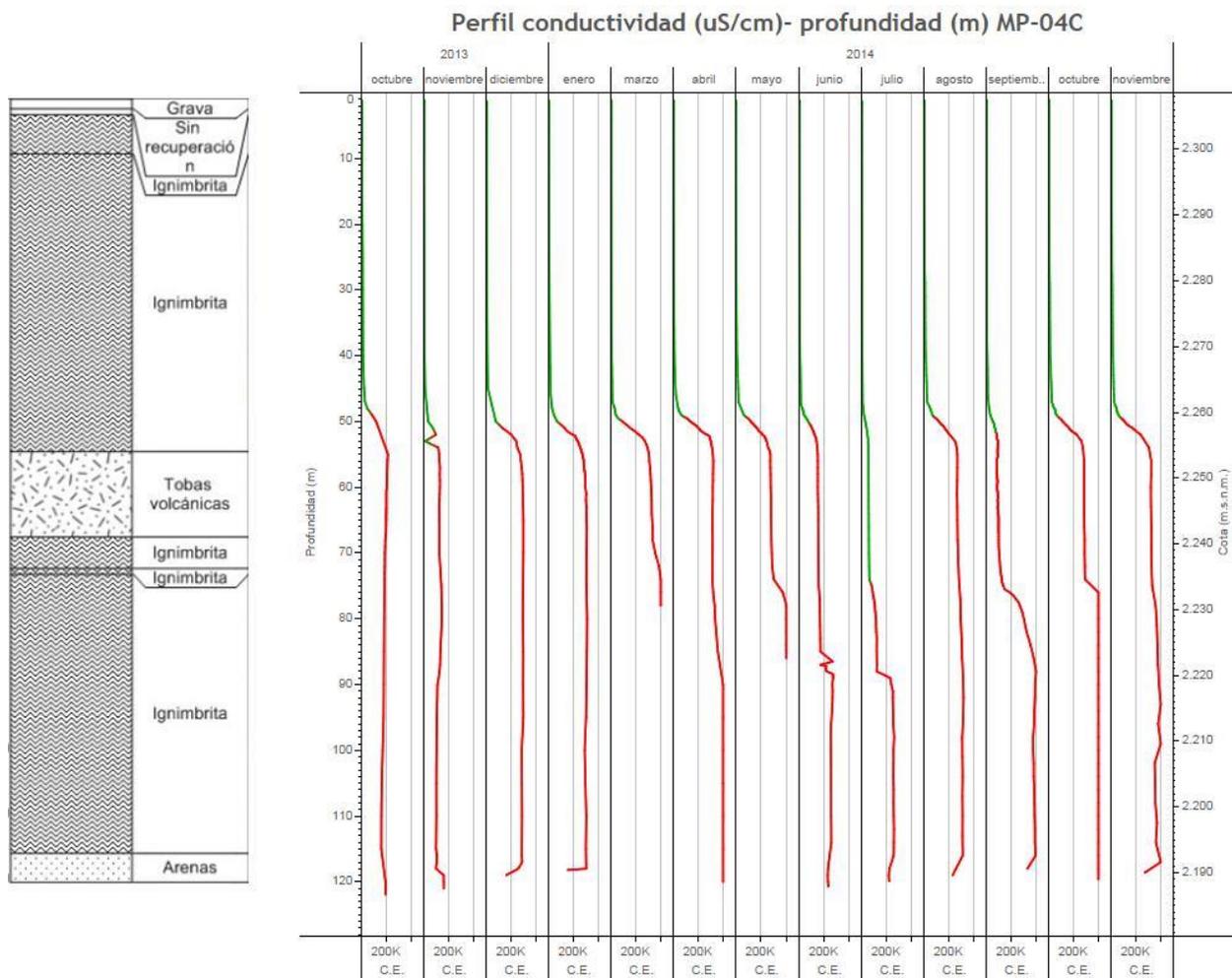
**Figura 7-6 Perfil de Conductividad piezómetro MP-02C, Sector Tilopozo**



Más al sur, cercano a las vegas de Tilopozo, en el piezómetro MP-04C (Figura 7-7), se observan valores de conductividad inferiores a 80.000  $\mu\text{S/cm}$  en los primeros 50 m.

A partir de los 50 m de profundidad, la conductividad incrementa notablemente alcanzando en profundidad valores superiores a 200.000  $\mu\text{S/cm}$ . La cota aproximada donde se interpreta la zona de interfase salina corresponde a 2.262,6 m.s.n.m. (cota collar – profundidad = 2.258,6 m- 50 m).

**Figura 7-7 Perfil de Conductividad piezómetro MP-04C, Sector Tilopozo**



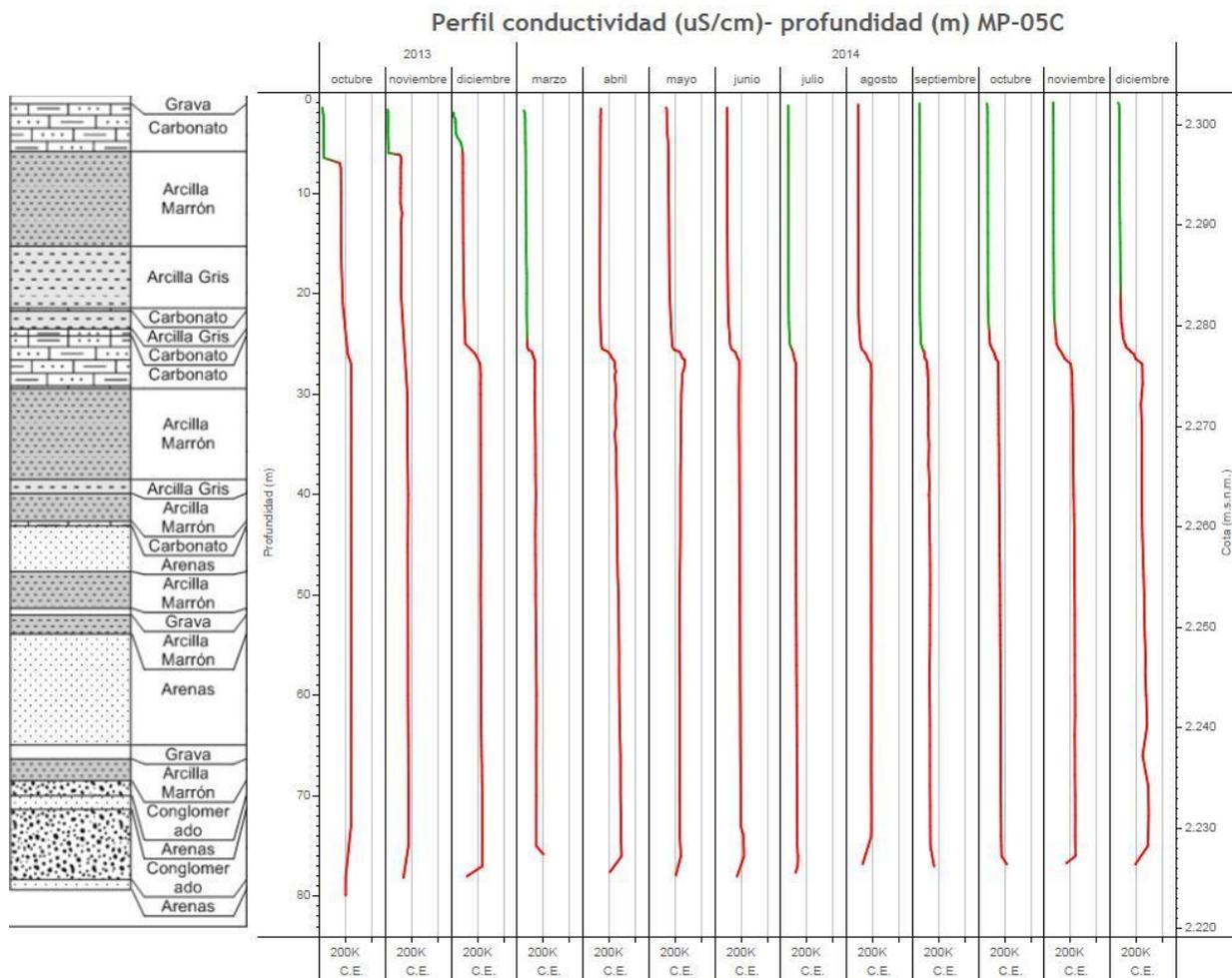
Fuente: Elaboración propia

En el sector borde de Tilopozo, la profundidad de la interfase salina se define por los perfiles C.E. de los puntos MP-05C y MP-06C (Figura 7-8 y Figura 7-9).

En el punto MP-05C, se observa una conductividad de agua salobre en los primeros 25 m, que tiende a ser inferior a 80.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . A partir de estos 25 m de profundidad, la conductividad se mantiene en torno a los 200.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . La cota aproximada donde se encuentra la zona de inflexión salina, cerca de los 25 m, corresponde a 2.278,2 m.s.n.m. (cota collar – profundidad = 2.303,2 m- 25 m).

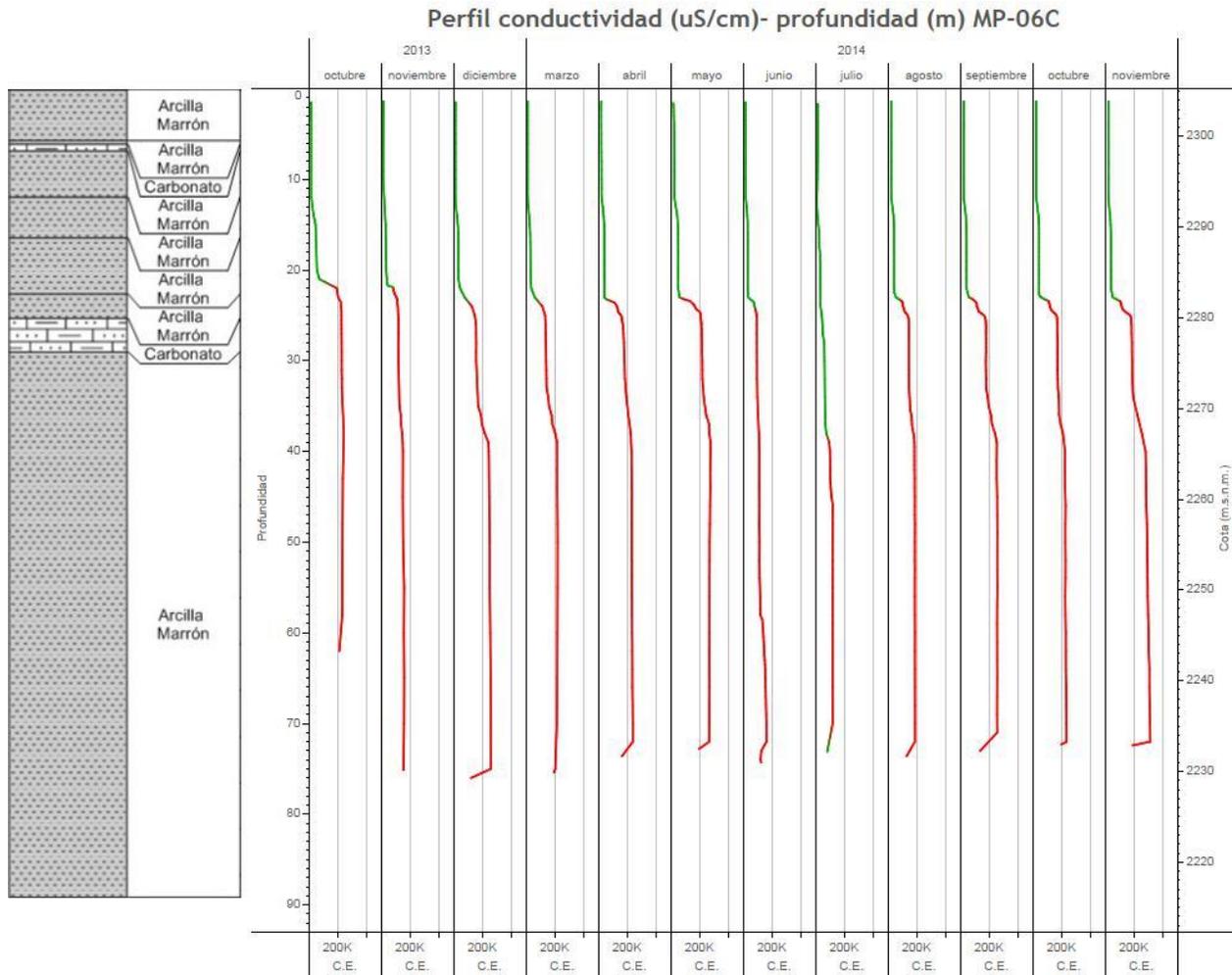
En el punto MP-06C, los primeros 22 m registran valores de conductividad inferiores a 80.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . En profundidad, la conductividad aumenta alcanzando valores de conductividad del orden de 200.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . La cota aproximada donde se interpreta la interfase salina, cerca de los 22 m, corresponde a 2.283,3 m.s.n.m. (cota collar – profundidad = 2.305,3 m- 22 m).

**Figura 7-8 Perfil de Conductividad piezómetro MP-05C, Sector Borde Tilopozo**



Fuente: Elaboración propia

**Figura 7-9 Perfil de Conductividad piezómetro MP-06C, Sector Borde Tilopozo**

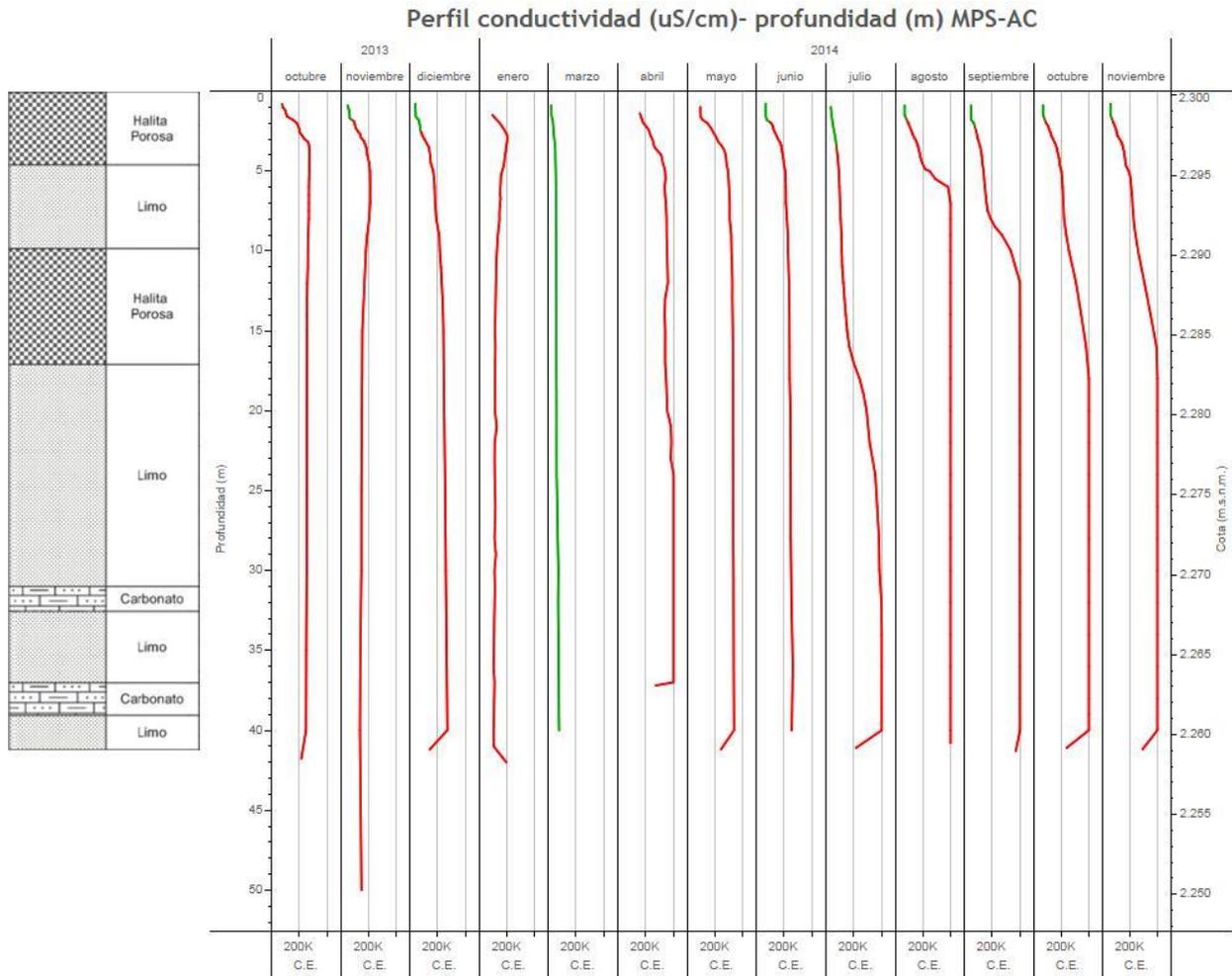


Fuente: Elaboración propia

En el Sistema Peine, representado por las Lagunas Salada, Saladita e Interna, la variación de la conductividad de las aguas subterráneas ha sido caracterizada por los perfiles C.E en los puntos MPS-AC y MPS-CC (Figura 7-10).

El pozo MPS-A, cercano a las lagunas Saladas y Saladita, presenta valores de conductividad constante en los primeros dos metros de la columna de agua, inferior a 80.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , seguido de un aumento gradual en la conductividad, alcanzando rápidamente valores en torno a 200.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . La cota aproximada donde se produciría la zona de inflexión salina está muy cerca de la superficie y corresponde a la cota 2.298,3 m.s.n.m. (cota collar – profundidad = 2.300,3 m- 1,80 m).

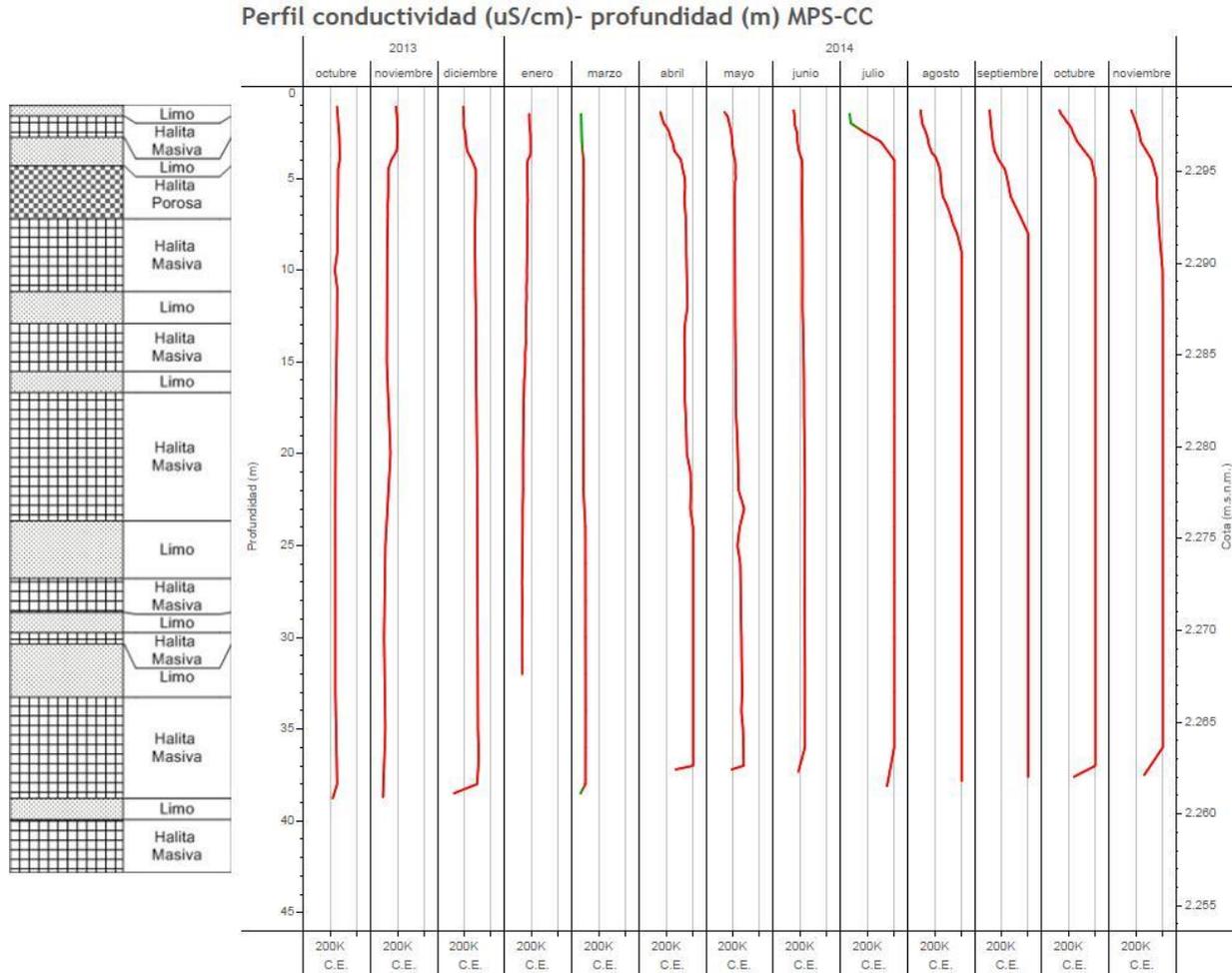
**Figura 7-10 Perfil de Conductividad piezómetro MPS-AC, Sector Peine**



Fuente: Elaboración propia

Próximo a la Laguna Interna, en el piezómetro MPS-C, no se observa una clara estratificación de la columna de agua, por lo que no es posible asignar una cota de inflexión o profundidad de la interfase salina. No obstante, se puede mencionar que en los primeros 2 metros, la conductividad presenta valores inferiores a 80.000  $\mu\text{S/cm}$ , siendo relativamente más estable en profundidad, registrándose valores superiores a 200.000  $\mu\text{S/cm}$ .

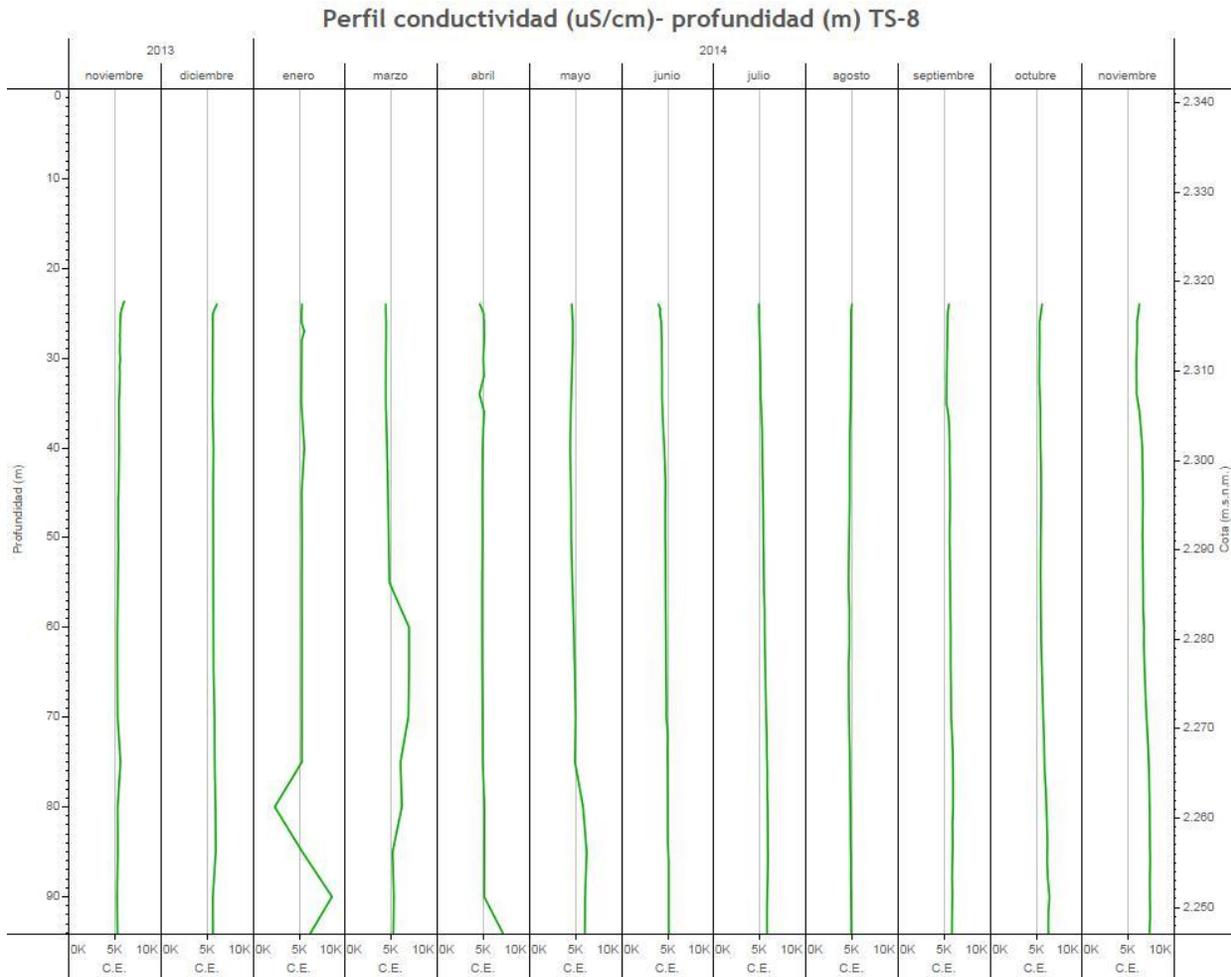
**Figura 7-11 Perfil de Conductividad piezómetro MPS-CC, Sector Peine**



Al sur, unos 5 km del sistema lagunar Peine, en la localidad de Tilomonte, los registros de conductividad eléctrica son caracterizados en el pozo TS-8. A pesar que no se tiene antecedentes del registro estratigráfico del pozo, la información geológica indica que se ubica en una zona de ignimbritas (Figura 3-18, Capítulo Geología).

Los perfiles de la Figura 7-12 muestran una columna de agua de 70 m, con valores de conductividad relativamente constante en profundidad, en torno a los 5.000  $\mu\text{S/cm}$ , hasta la cota 2.246 m.s.n.m.

**Figura 7-12 Perfil de Conductividad piezómetro TS-8, Sector Tilomonte**



Fuente: Elaboración propia

### 7.5.2 Discusión

A partir de la interpretación de los perfiles de conductividad eléctrica, junto con el análisis de los perfiles geofísicos, los muestreos químicos y otras aproximaciones hidrogeológicas, se presenta en el Capítulo 8 de Hidrogeología, punto 8.4.3, un análisis más detallado con los resultados integrados que definen de la posición y profundidad de la interfase salina en todo el borde del Salar.

En esta sección, a partir del análisis de las Figura 7-4 a Figura 7-12, se resumen las siguientes conclusiones generales respecto a la posición de la interfase medida a través de los perfiles de conductividad en pozos:

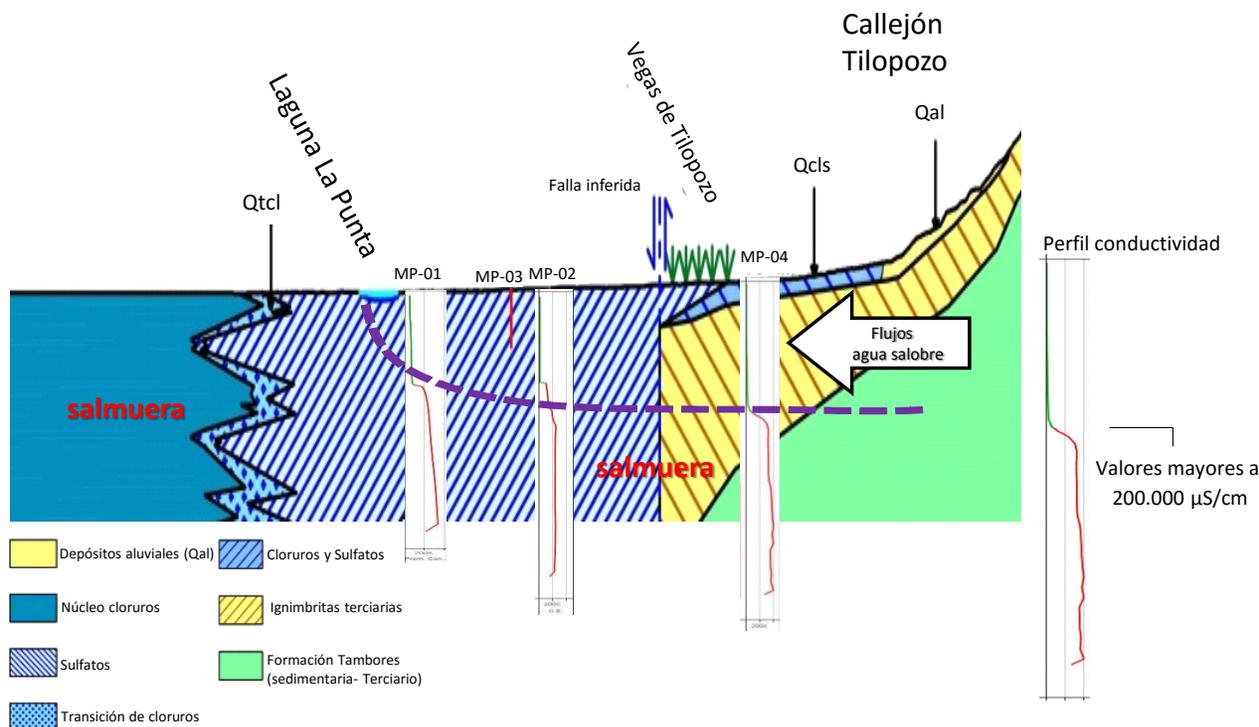
- En el sector de las lagunas La Punta y La Brava, en Tilopozo y borde Tilopozo se observa claramente una estratificación en la columna de agua subterránea (Figura 7-4, Figura 7-7, Figura 7-8, y Figura 7-9).

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

Una columna superior con valores de conductividad inferiores a 80.000  $\mu\text{s}/\text{cm}$  (límite de precisión de la sonda), registrándose en la mayoría de los casos valores superiores a 200.000  $\mu\text{s}/\text{cm}$ .

- Estudios anteriores, llevados a cabo por Geohidrología (2014b) señalan también que en el sector lagunar Peine y Sector Norte, en torno al sistema Soncor y Quelana, existe segmentación en la columna de agua en los pozos, donde se registran perfiles con valores máximos de conductividad entre 200.000  $\mu\text{s}/\text{cm}$  y 220.000  $\mu\text{s}/\text{cm}$ .
- En cada punto de monitoreo (Figura 7-4 a Figura 7-12), la profundidad a la que se detecta la posición de la interfase salina (dónde se miden las inflexiones de conductividad) se mantienen relativamente a la misma cota durante el período de análisis, y sin observar variaciones entre períodos invernales y estivales entre 2013 y 2014. Además tampoco se observó una relación con algún cambio en la litología.
- Comparando la profundidad a la que se mide la posición de la interfase en los pozos MP-04C, MP-02C, MP-03C y MP-01C alineados a lo largo de la dirección del flujo subterráneo del acuífero de agua dulce-salobre (ver superficie freática de la Figura 8.48), se observa que ésta se profundiza hacia el borde sur del Salar, en dirección a Tilopozo. Dicho de otro modo, la columna de agua superior, de menor conductividad, se acuña en dirección a los flujos subterráneos, hacia las lagunas La Punta y La Brava. Tal como se observa en la Figura 7-13.
- Los perfiles de conductividad han servido como antecedente para elaborar la estrategia de muestreo de las aguas subterráneas. De esta manera, las muestras someras sirven para caracterizar los flujos subterráneos menos mineralizados de carácter salobre; mientras que las muestras a mayor profundidad son de interés para representar la columna de agua que se desarrolla bajo la cota de inflexión salina.

**Figura 7-13 Corte transversal esquemático. Sector Tilopozo-La Punta-La Brava**



Fuente: Elaboración propia

## 7.6 Caracterización físico-química de las aguas y la salmuera

En esta sección se presentan la caracterización química de las aguas de las lagunas, cauces, aguas subterráneas y salmueras monitoreadas en el área del Proyecto.

En el Apéndice F: Análisis Físico Químico e Isotópico del agua, se encuentran en tablas todos los resultados de los puntos monitoreados por Rockwood entre 2013 y 2014, llevados a cabo en el marco del presente Proyecto. Estas tablas incluyen los resultados químicos de iones mayoritarios y minoritarios, el porcentaje de error del balance iónico y datos isotópicos de oxígeno-18 y deuterio (<sup>2</sup>H).

Se destaca también que un análisis detallado de la química de las lagunas e integrado con su funcionamiento hidrogeológico se encuentra en el Apéndice I Funcionamiento Hidrogeológico de los Sistemas Lagunares: La Punta–La Brava, Peine, Aguas de Quelana y Soncor.

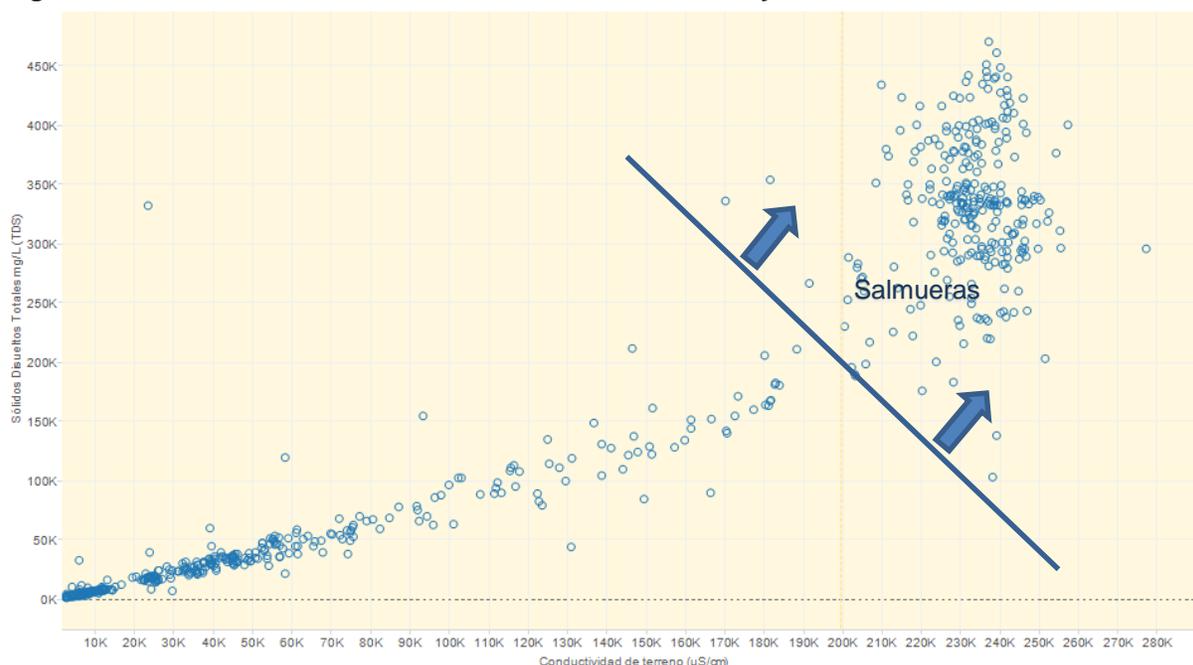
### 7.6.1 Clasificación de las aguas dulces, salobres y salmueras

Los tipos de agua presentes se han caracterizado, según el contenido de sólidos totales disueltos y según los valores de conductividad, con el objetivo de diferenciar o definir lo que se entiende en este estudio por un agua dulce, agua salobre o salmuera. Para ello, se ha utilizado como referencia antecedentes como el de Fetter (2001) y el de SQM-Geohidrología (2013).

Tal como se muestra en la Figura 7-14, que incluye todos los análisis químicos realizados en aguas y salmueras en el marco de este estudio, existe una buena correlación entre los sólidos totales disueltos (TDS) y la conductividad eléctrica (CE), hasta valores en torno a 200.000 uS/cm. El conjunto de puntos presenta una línea de tendencia según la siguiente relación  $TDS=0,95*CE$ .

En las muestras hipersalinas, por sobre 200.000  $\mu S/cm$ , la correlación directa entre ambos parámetros es nula, dado que la conductividad es afectada por la composición específica de iones presentes en el agua (Custodio y Llamas, 2001). En dichos ambientes, si bien es posible determinar dos muestras con la misma salinidad, la conductividad puede ser significativamente diferente, dado que las especies iónicas presentan niveles de conductancia específica diferentes.

**Figura 7-14 Relación contenido de sólidos totales disueltos y conductividad eléctrica 2013-2014**



En la Tabla 7-6, Fetter (2001) caracteriza las aguas dulces por el contenido de sólidos totales disueltos inferior a 1000 mg/L, mientras que SQM-Geohidrología, 2013 indica que en zonas áridas este valor puede llegar hasta 3000 mg/L.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

En el presente estudio, las aguas del Borde Este representan las aguas más diluidas (dulces) de la Cuenca del Salar y que además muestran composiciones isotópicas correspondientes a aguas de recarga no afectadas por procesos posteriores como la evaporación (ver punto 7.7. Caracterización isotópica). Estas muestras, durante el período de monitoreo, entre 2013 y 2014, presentaron valores de TDS inferiores a 3700 mg/L y de conductividades a 4300  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , por lo que, en este estudio se consideraron las concentraciones de 4.200 mg/L y de 4.500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en TDS y C.E., respectivamente como los límites para diferenciar las aguas dulces de las salobres.

En cuanto al límite entre aguas salobres y salmueras, a pesar de que Fetter y SQM-Geohidrología consideran salmueras aquellas muestras con concentraciones de TDS mayores a 100.000 mg/L, en este estudio, considerando los valores medidos en el total de las muestras, su composición isotópica y considerando su localización espacial en la cuenca, se ha definido que serán consideradas salmueras aquellas valores de conductividad mayores a 200.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y/o TDS también con concentraciones mayores a los 200.000 mg/L. Por lo tanto, será posible encontrar alguna muestra clasificada como salmuera que presente una conductividad algo menor a los 200.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  o al revés, una concentración en TDS también menor a 200.000 mg/L.

De esta manera, las aguas salobres y salinas consideradas por Fetter (2001), que SQM-Geohidrología (2013) engloba y define como zona de transición, en este estudio se denominan de manera general como aguas salobres, con un rango de salinidad importante pero que caracteriza la variabilidad que existe en los acuíferos de la Zona Marginal del Salar.

De esta manera, el criterio utilizado para distinguir los tipos de aguas en el sector de estudio, permite una mejor interpretación de la profundidad y extensión de la interfase salina, uno de los elementos fundamentales del modelo hidrogeológico.

**Tabla 7-6 Clasificación de los tipos de aguas en el área de estudio**

Fetter , 2001		Geohidrología-SQM, 2013			SGA-Rockwood (2015)		
Tipo de agua	STD (mg/L)	Tipo de agua	STD (mg/L)	CE $\mu\text{S}/\text{cm}$	Tipo de agua	STD (mg/L)	CE $\mu\text{S}/\text{cm}$
Dulce	0- 1.000	Dulce	0- 3.000	0- 3.700	Dulce	0- 4.200	0- 4.500
Salobre	1.000- 10.000	Zona de Transición	3.000- 100.000	3.700- 124.200	Salobre	4.200- 200.000	4.500- 200.000
Salina	10.000- 100.000						
Salmuera	> 100.000	Salmuera	> 100.000	> 124.200	Salmuera	> 200.000	> 200.000

## 7.6.2 Parámetros físico-químicos y concentraciones químicas

En esta sección se analizan los parámetros físico-químicos de pH, conductividad eléctrica y sólidos totales disueltos (TDS), concentraciones químicas de iones mayoritarios (Ca, Na, K, Mg, Cl,  $\text{SO}_4$  y  $\text{HCO}_3$ ) e iones

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

minoritarios de interés, tales como Arsénico, Boro, Litio y estroncio, de cada una de las muestras de agua y salmuera recolectadas en el marco de este estudio.

### 7.6.2.1 Sector Núcleo del Salar

Los resultados de las salmueras del Núcleo (muestras color azul de la Figura 7-2) dan cuenta de una significativa mineralización con conductividades eléctricas variables con valores promedio cercanos a los 230.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Tabla 7-7). Los valores de pH varían entre 6,3 y 8,7, siendo la mayoría en torno a 7.

Los elementos que presentan las mayores concentraciones son el Sodio y el Cloruro, que en promedio muestran valores en torno a 97.000 mg/L y 190.000 mg/L, respectivamente. Respecto a los elementos minoritarios, sobresalen los contenidos de Litio y Boro (Tabla 7-7). En la mayoría de las muestras, el Litio presenta concentraciones superiores a 970 mg/L, y el Boro de 500 meq/L, que incluso superan al Calcio.

**Tabla 7-7 Estadística de los resultados químicos 2013-2014 en el sector del Núcleo.**

Parámetro	Unidades	Núm. Datos	Promedio	Desviación Estándar	Mínimo	Máximo	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	
C.E.	$\mu\text{S}/\text{cm}$	138	234.125	10.698	170.300	252.500	230.600	236.200	240.200	
pH	U pH		7,14	0,41	6,30	8,70	6,90	7,05	7,20	
Na	mg/L	100	97.401	14.810	32.860	133.669	89.859	97.695	105.234	
K	mg/L		15.922	5.565	2.622	35.833	13.056	16.057	17.930	
Mg	mg/L		7.638	3.084	2.161	23.128	6.115	7.660	8.905	
Ca	mg/L		597	767	286	6.643	405	466	565	
Cl	mg/L		190.857	15.536	67.520	214.687	186.957	192.824	198.211	
SO <sub>4</sub>	mg/L		12.467	4.050	904	23.364	10.114	12.179	15.013	
HCO <sub>3</sub>	mg/L		710	169	81	1367	641	701	795	
Li	mg/L		949	431	8,4	1928	712	971	1271	
B	mg/L		439	204	2,8	780	348	498	587	
As	mg/L		18	140	0,0	1400	0,3	3,0	6,7	
Sr	mg/L		16,5	25,3	0,8	195,0	6,0	10,8	18,2	
rNa/rCl				0,79	0,11	0,45	1,10	0,72	0,78	0,85
rNa/rK				12,4	8,4	2,8	69,8	8,9	10,0	12,5
rCl/rSO <sub>4</sub>			27,0	34,6	10,2	300,8	17,0	20,8	25,7	
rCl/rHCO <sub>3</sub>			517	379	178	4043	409	470	518	
rMg/rCa			26,43	12,83	4,78	60,63	17,41	24,81	33,17	

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

### 7.6.2.2 Sector Lagunas La Punta y La Brava

Incluye el monitoreo de las lagunas con estos mismos nombres y de aquellos pozos, piezómetros y piezómetros someros alrededor de ellas, y otros puntos que permiten describir este sistema, todos ellos marcados en color rojo en la Figura 7-2.

En promedio, las aguas de las lagunas La Punta-La Brava se caracterizan por conductividades del orden de 50.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , con valores de pH en torno a 8. El Sodio y el Cloruro son los componentes principales, con contenidos promedio de 12.000 mg/L y 22.000 mg/L, respectivamente (Tabla 7-8). La presencia de Litio puede variar, pero caracterizado entre 28 mg/L y 313 mg/L, y el Boro entre 24 y 274 mg/L.

Para el caso de las aguas subterráneas, los valores de conductividad son en promedio más altos que las lagunas, cerca 120.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Los valores más bajos de conductividad en torno a 20.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , son atribuibles a los muestreos en el piezómetro más somero (MP-01A); mientras que los valores más altos en conductividad, superiores a 220.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , corresponden a las muestras colectadas en el piezómetro más profundo (MP-01B).

Las muestras del piezómetro más profundo, de 30 m (MP-01B), se caracteriza por valores de conductividad entre 225.000 y 251.500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

En resumen, en el sector de las lagunas La Punta y La Brava, los resultados indican lo siguiente:

- Las aguas de las lagunas presentan concentraciones muy variadas en los elementos cloruro y el sodio, pero siempre menos mineralizados que la salmuera descrita en el núcleo. De hecho, en promedio la salmuera es 4 veces más mineralizada que el agua de las lagunas La Punta y La Brava. Esta diferencia también se refleja en el contenido de litio y boro, que en promedio tienen 116 mg/L y 87 mg/L, respectivamente, siendo los valores más bajo en torno a 25 mg/L.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

**Tabla 7-8 Estadística de los resultados químicos 2013-2014 en el sector La Punta y Brava.**

**Muestras de las lagunas**

Parámetro	Unidades	Núm. Datos	Promedio	Desviación Estándar	Mínimo	Máximo	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
C.E.	μS/cm	59	51.018	31.934	19.490	138.900	29.113	36.185	70.453
pH	U pH		8,28	0,31	7,69	9,20	8,07	8,22	8,50
Na	mg/L	36	11.576	8.859	3.660	35.263	5.271	7.994	15.125
K	mg/L		1.741	1.325	607	6.445	867	1.133	2.285
Mg	mg/L		1.014	626	407	2.433	540	736	1.308
Ca	mg/L		356	174	154	752	208	318	483
Cl	mg/L		22.257	16.367	7.251	61.825	10.137	14.516	30.982
SO4	mg/L		3.670	2.712	1.546	14.455	2.027	2.658	4.322
HCO3	mg/L		495	147	271	864	397	476	554
Li	mg/L		116,1	80,3	28,2	313,5	59,0	75,1	170,3
B	mg/L		87,5	56,2	24,2	274,0	48,5	65,6	121,9
As	mg/L		3,14	2,31	0,36	9,63	1,67	2,25	3,53
Sr	mg/L	7,56	6,63	2,16	39,00	4,35	5,81	8,19	
rNa/rCl			0,80	0,09	0,70	1,04	0,74	0,78	0,85
rNa/rK			11,6	6,0	8,5	46,1	10,2	10,7	11,1
rCl/rSO4		36	8,1	2,5	4,2	12,3	5,7	8,4	10,3
rCl/rHCO3			70,6	33,8	31,0	141,3	44,0	54,8	98,1
rMg/rCa			4,53	0,78	2,98	6,51	4,00	4,64	4,96

En los piezómetros (someros y profundos) más cercanos a las lagunas se distinguen dos grupos de muestra:

- Flujos someros menos mineralizados, representan aguas del acuífero, que se caracterizan en este sector por concentraciones en iones mayoritarios y minoritarios muy similares a las muestras de las lagunas más diluidas. Particularmente, es el caso de las muestras de La Brava Punto C, lo cual indicaría un aporte de las aguas subterráneas a las lagunas en este punto de control.
- Los monitoreos más profundos, son más mineralizados, con tendencia a valores superiores de 200.000 μS/cm, con contenidos en iones mayoritarios y minoritarios muy similares a los determinados en la salmuera del núcleo, lo cual permitiría establecer una correlación entre las aguas del Núcleo y los pozos habilitados en profundidad. Esta correlación se corroborará también con el estudio isotópico, que permitirá identificar la naturaleza y evolución de las aguas.

	<b>ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL          PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL          SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL          SALAR DE ATACAMA</b>	
	<b>ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO          NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA</b>	

**Tabla 7-9 Estadística de los resultados químicos 2013-2014 en pozos. Sector La Punta y Brava.**

*Piezómetros someros*

Parámetro	Unidades	Núm. Datos	Promedio	Desviación Estándar	Mínimo	Máximo	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
C.E.	μS/cm	19	37.734	27.648	20.400	101.100	23.240	24.890	26.145
pH	U pH		7,56	0,23	7,29	8,1	7,36	7,52	7,7
Na	mg/L	16	5.917	4.153	3.860	16.954	3.968	4.352	4.915
K	mg/L		954	958	29	4.031	614	674	744
Mg	mg/L		507	438	293	1.852	319	346	374
Ca	mg/L		247	163	192	856	200	204	210
Cl	mg/L		11.803	8.686	7.349	35.971	8.243	8.402	9.736
SO4	mg/L		1.521	2.439	453	10.652	864	946	1.042
HCO3	mg/L		423	46	332	482	398	432	458
Li	mg/L		59,6	42,8	23,8	185,0	45,0	48,2	51,0
B	mg/L		50,3	32,7	21,1	131,4	32,2	39,5	48,5
As	mg/L		1,78	4,31	0,00	17,90	0,64	0,67	0,94
Sr	mg/L		9,13	10,55	3,54	46,90	4,98	5,61	6,94
rNa/rCl			0,78	0,10	0,68	0,99	0,71	0,75	0,83
rNa/rK			32,9	89,2	7,1	367,3	10,6	10,7	11,1
rCl/rSO4			15,0	9,4	4,0	45,8	11,1	13,0	13,8
rCl/rHCO3			49,9	41,1	29,5	164,7	31,2	36,1	39,4
rMg/rCa			3,34	2,00	2,28	10,58	2,57	2,67	3,07

*Piezómetros profundos*

Parámetro	Unidades	Núm. Datos	Promedio	Desviación Estándar	Mínimo	Máximo	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
C.E.	μS/cm	15	224.193	42.618	74.190	251.500	227.950	237.200	239.700
pH	U pH		6,62	0,51	6,10	7,70	6,27	6,39	6,85
Na	mg/L	11	80.731	20.625	37.866	100.000	80.860	86.900	94.030
K	mg/L		13.654	2.606	7.357	18.019	12.948	14.000	14.550
Mg	mg/L		5.951	1.755	1.929	8.167	5.810	6.550	6.790
Ca	mg/L		603	81	478	809	572	590	620
Cl	mg/L		172.872	38.483	81.429	207.301	181.053	186.620	192.529
SO4	mg/L		8.943	2.058	4.561	11.302	8.881	9.786	9.930
HCO3	mg/L		426	43	312	469	417	427	451
Li	mg/L		965,2	207,8	492,0	1180,0	842,2	1040,0	1100,0
B	mg/L		575,4	167,6	204,0	788,0	541,5	601,1	687,5
As	mg/L		11,55	11,75	0,00	35,00	1,72	10,00	13,33
Sr	mg/L		13,80	5,33	7,26	27,00	11,20	14,00	15,00
rNa/rCl			0,72	0,06	0,59	0,78	0,68	0,72	0,76
rNa/rK			10,0	2,0	5,9	12,9	9,0	10,8	11,0
rCl/rSO4			26,2	1,8	23,3	28,8	25,1	26,5	27,3
rCl/rHCO3			711,5	200,9	298,3	1072,9	700,4	738,5	775,7
rMg/rCa									

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

### 7.6.2.3 Sector Tilopozo

Incluye todos los puntos de agua subterránea ubicados en el sector sur del Salar, en el área de la costra sulfatada-carbonatada, y que recibe recarga de aguas subterráneas del acuífero de Monturaqui.

El Sector Tilopozo está caracterizado por todos aquellos puntos que se ubican dentro de la superficie con costra sulfatada-carbonatada, y que se indican en color naranja en la Figura 7-2.

Del conjunto de muestras estudiadas es posible distinguir a grandes rasgos dos grupos de muestra: un grupo menos mineralizado, donde la conductividad mínima es de 4000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ; y un segundo grupo donde las conductividades pueden alcanzar valores en torno a 257.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Tabla 7-10):

- Flujos someros menos mineralizados, están representados por los piezómetros MP-02A, MP-03A y MP-04A, que representan aguas del acuífero de carácter salobre. Estos presentan valores de conductividad promedio de 12.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y contenidos de cloruro inferiores a 27.000 mg/L.
- Monitoreos más profundos se caracterizan por conductividades entre 200.000 y 255.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , con contenidos de cloruro mayor a 140.000 mg/L, y con contenidos de Litio y Boro similares a los analizados en el sector del Núcleo. Esto permitiría establecer una correspondencia entre las aguas del Núcleo y los pozos habilitados en profundidad. Esta correlación se corroborará también con el estudio isotópico, que permitirá identificar la naturaleza y evolución de las aguas.

	<b>ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL          PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL          SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL          SALAR DE ATACAMA</b>	
	<b>ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO          NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA</b>	

**Tabla 7-10 Estadística de los resultados químicos 2013-2014 en el sector de Tilopozo**

*Piezómetros someros*

Parámetro	Unidades	Núm. Datos	Promedio	Desviación Estándar	Mínimo	Máximo	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
C.E.	μS/cm	94	11.678	9.727	4.003	54.100	7.836	8.973	11.875
pH	U pH		7,67	0,30	6,80	8,20	7,50	7,75	7,90
Na	mg/L	69	1.932	1.860	536	12.894	1.183	1.470	1.940
K	mg/L		268	193	75	1.009	190	222	276
Mg	mg/L		222	174	80	1.230	128	207	246
Ca	mg/L		160	52	96	374	130	146	173
Cl	mg/L		3.383	3.370	895	26.063	2.186	2.660	3.447
SO4	mg/L		1.057	971	45	4.982	504	914	1.145
HCO3	mg/L		388	83	205	522	335	403	453
Li	mg/L		14	8	3,8	54	11	14	17
B	mg/L		19	15	4,1	130	13	17	21
As	mg/L		0,90	1,36	0,07	11,00	0,34	0,60	1,08
Sr	mg/L		3,42	3,94	0,50	27,00	1,59	1,86	3,80
rNa/rCl		69	0,88	0,12	0,65	1,34	0,81	0,87	0,92
rNa/rK			12,2	3,9	4,1	33,3	10,2	11,7	13,0
rCl/rSO4			5,5	6,4	2,0	55,6	3,5	4,1	5,5
rCl/rHCO3			16	13	3,4	90	9	11	20
rMg/rCa			2,31	1,20	0,77	6,35	1,25	2,36	2,88

*Piezómetros profundos*

Parámetro	Unidades	Núm. Datos	Promedio	Desviación Estándar	Mínimo	Máximo	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
C.E.	μS/cm	45	217.403	45.883	26.100	257.300	207.000	232.800	239.300
pH	U pH		6,54	0,45	6,04	7,58	6,22	6,30	6,86
Na	mg/L	34	79.724	22.008	5.820	119.141	75.077	84.395	92.448
K	mg/L		13.847	4.280	974	19.555	11.426	15.550	16.775
Mg	mg/L		5.282	2.178	444	12.495	4.038	5.475	6.358
Ca	mg/L		669	284	165	1.400	490	649	757
Cl	mg/L		161.149	42.871	12.023	201.884	149.228	176.515	184.202
SO4	mg/L		9.186	2.734	1.190	13.564	8.303	8.906	11.554
HCO3	mg/L		377	228	168	1565	253	365	395
Li	mg/L		898	449	0,5	1380	700	944	1278
B	mg/L		599	238	65,0	984	461	672	759
As	mg/L		5,99	7,34	0,01	32,00	0,15	6,67	6,67
Sr	mg/L		18,14	18,39	0,17	88,00	6,25	13,80	15,00
rNa/rCl		34	0,77	0,08	0,66	0,97	0,71	0,74	0,80
rNa/rK			10,1	2,7	7,0	22,9	8,8	9,5	10,7
rCl/rSO4			24,1	5,3	13,7	34,2	20,3	22,3	28,8
rCl/rHCO3			879	390	52,4	1887	666	818	1179
rMg/rCa			17,14	20,76	3,00	124,58	8,44	12,95	16,23

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

#### 7.6.2.4 Sector Borde Tilopozo

A diferencia del anterior, los puntos en el borde occidental de Tilopozo (muestras en color amarillo en la Figura 7-2), incluye a todos aquellos pozos ubicados fuera de la costra sulfatada-carbonatada, que se desarrollan sobre depósitos aluviales. En este sector, es posible distinguir dos grupos de muestra: un grupo menos mineralizado, donde la conductividad mínima es de 2400  $\mu\text{S/cm}$ ; y un segundo grupo donde las conductividades pueden alcanzar valores en torno a 277.000  $\mu\text{S/cm}$  (Tabla 7-10):

- Flujos subterráneos someros, se muestrearon en calicatas y en los primeros metros de los piezómetros MP-05A, MP-6A (a los pies del Cordón de Lila) y puntualmente en el pozo TE-8 (en Callejón de Tilopozo). El punto MP-06A y TE-8 se caracterizan por valores de conductividad entre 2.400 y 10.000  $\mu\text{S/cm}$ , con contenidos en cloruro entre 151 y 2500 mg/L. Cabe señalar que el valor de conductividad más bajo de este sector, equivalente a 151mg/L en cloruro, se encuentra en el punto TE-8, sector Callejón de Tilopozo. Las muestras más salinas se registraron el piezómetro MP-05A, con conductividades del orden de 45.000  $\mu\text{S/cm}$ . Las calicatas, si bien presentaron valores en torno a 10.000  $\mu\text{S/cm}$ , se midieron valores por sobre 200.000  $\mu\text{S/cm}$ , entre los meses de junio y octubre.
- Muestras de agua más profundas, se recolectaron en los piezómetro MP-06B, TP-2 y TP-3 se caracterizan por conductividades entre 200.000 y 277.000  $\mu\text{S/cm}$ , con contenidos en cloruro superiores a 100.000 mg/L, y contenidos en Litio y Boro similares a los pozos profundos analizados en el sector de Tilopozo y Núcleo. Esta semejanza se analizará también con el contenido isotópico, con el fin de identificar la naturaleza y evolución de las aguas.

	<b>ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA</b>	
	<b>ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA</b>	

**Tabla 7-11 Estadística de los resultados químicos 2013-2014 de pozos. Sector Borde de Tilopozo**  
*Piezómetros someros*

Parámetro	Unidades	Núm. Datos	Promedio	Desviación Estándar	Mínimo	Máximo	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
C.E.	μS/cm	58	57.118	89.803	2.403	277.300	3.838	7.103	46.130
pH	U pH		7,29	0,60	5,90	8,40	7,10	7,40	7,70
Na	mg/L	36	18.866	32.709	230	102.660	607	1.947	8.216
K	mg/L		3.563	6.328	25	20.295	71	310	1.618
Mg	mg/L		1.393	2.296	54	6.666	83	164	765
Ca	mg/L		286	231	83	868	152	187	244
Cl	mg/L		38.574	66.909	151	187.480	872	3.225	18.021
SO4	mg/L		2.931	4.202	387	14.488	421	669	2.095
HCO3	mg/L		434	79	274	610	381	442	480
Li	mg/L		191,68	324,77	0,93	1037,00	3,72	16,95	112,25
B	mg/L		135,02	223,84	6,66	676,00	9,67	15,60	81,23
As	mg/L		0,57	0,41	0,12	1,72	0,31	0,42	0,67
Sr	mg/L		5,97	7,01	0,91	30,00	2,05	2,90	7,92
rNa/rCl			0,95	0,33	0,67	2,41	0,73	0,84	1,02
rNa/rK			11,4	3,1	7,0	18,3	8,9	10,5	13,8
rCl/rSO4		36	9,6	8,4	0,5	33,1	2,9	6,0	15,2
rCl/rHCO3			203	375	0,4	1153	3,2	10,0	76
rMg/rCa			4,70	5,26	0,67	17,17	0,91	1,47	6,55

*Piezómetros Profundos*

Parámetro	Unidades	Núm. Datos	Promedio	Desviación Estándar	Mínimo	Máximo	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
C.E.	μS/cm	17	202.666	56.770	16.630	243.800	203.100	218.500	231.400
pH	U pH		6,74	0,46	6,25	7,90	6,38	6,69	6,90
Na	mg/L	11	67.988	24.423	17.470	96.488	54.950	71.411	85.163
K	mg/L		13.659	5.229	1.630	18.254	11.050	16.002	17.788
Mg	mg/L		6.919	2.203	4.170	10.822	4.965	6.417	8.418
Ca	mg/L		385	47	276	450	363	401	412
Cl	mg/L		145.376	46.281	54.152	198.805	111.184	172.454	178.688
SO4	mg/L		11.365	5.015	3.663	16.983	8.224	10.646	16.144
HCO3	mg/L		427	39	332	468	408	436	452
Li	mg/L		903,92	319,55	447,00	1410,00	689,00	846,00	1196,00
B	mg/L		529,52	231,96	57,30	751,00	480,50	545,80	716,80
As	mg/L		4,02	3,06	0,04	6,67	1,26	6,67	6,67
Sr	mg/L		3,45	1,94	1,50	8,50	2,35	2,75	3,95
rNa/rCl			0,71	0,10	0,50	0,85	0,65	0,71	0,78
rNa/rK			15,9	27,7	1,9	99,0	7,7	8,2	8,8
rCl/rSO4		11	20,7	14,1	11,4	60,9	14,4	15,4	19,2
rCl/rHCO3			588	184	201,8	833	480,4	633,2	716
rMg/rCa			30,27	10,42	16,34	44,09	19,68	34,66	38,36

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

### 7.6.2.5 Sector Lagunar Peine

Este sector incluye el monitoreo de las lagunas denominadas Salada, Saladita e Interna, así como pozos, piezómetros y piezómetros someros alrededor de ellas, y otros puntos que permitan la caracterización de este sistema. Estos puntos se representaron en color rosado en la Figura 7-2.

En promedio, las aguas de las lagunas de Peine se caracterizan por conductividades del orden de 50.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , entre 28.000 y 100.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , con valores de pH en torno a 8. El Sodio y el Cloruro son los componentes principales, con contenidos promedio de 10.000 mg/L y 20.000 mg/L, respectivamente (Tabla 7-12). La presencia de Litio puede variar, pero se caracteriza por contener en promedio 89 mg/L, y el Boro entre 55 mg/L.

**Tabla 7-12 Estadística de los resultados químicos 2013-2014 en el sector lagunar Peine**

*Muestras de las lagunas*

Parámetro	Unidades	Núm. Datos	Promedio	Desviación Estándar	Mínimo	Máximo	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	
C.E.	$\mu\text{S}/\text{cm}$	57	51.239	15.114	28.820	95.970	39.600	46.110	57.995	
pH	U pH		8,18	0,25	7,30	8,70	8,00	8,17	8,30	
Na	mg/L	38	10.177	4.385	5.843	25.224	7.060	8.350	12.278	
K	mg/L		1.538	544	912	3.160	1.128	1.369	1.891	
Mg	mg/L		1.037	396	601	2.066	724	878	1.211	
Ca	mg/L		786	260	419	1.557	601	660	910	
Cl	mg/L		20.632	7.223	13.526	42.731	15.522	16.608	24.504	
SO <sub>4</sub>	mg/L		2.654	1.084	301	5.964	1.895	2.305	3.365	
HCO <sub>3</sub>	mg/L		260	36	159	330	238	263	279	
Li	mg/L		89,15	39,05	19,40	211,00	73,75	80,55	114,10	
B	mg/L		55,85	31,07	20,10	186,00	38,15	47,95	63,68	
As	mg/L		2,08	2,76	0,25	15,10	0,68	1,33	1,79	
Sr	mg/L		14,69	12,20	5,04	54,00	6,27	9,67	17,98	
rNa/rCl				0,75	0,09	0,57	0,97	0,69	0,72	0,82
rNa/rK				11,1	1,5	7,1	14,9	10,5	10,9	11,8
rCl/rSO <sub>4</sub>			11,9	8,5	8,4	62,1	9,2	10,5	11,9	
rCl/rHCO <sub>3</sub>			139	53,9	81,2	288	97,2	123	175	
rMg/rCa			2,18	0,56	1,73	4,66	1,92	2,07	2,22	

Para el caso de los pozos, los valores de conductividad varían entre 55.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y 242.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , siendo este rango más alto que el de las lagunas. Los valores más bajos de conductividad en torno a 55.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , son atribuibles a los muestreos en el piezómetro más somero (MPS-AA); mientras que los valores más altos en conductividad, superiores a 200.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , corresponden a las muestras colectadas en los piezómetros más profundos (MPS-CB y MPS-AB).

	<b>ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL          PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL          SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL          SALAR DE ATACAMA</b>	
	<b>ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO          NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA</b>	

**Tabla 7-13 Estadística de los resultados químicos 2013-2014 de pozos. Sector Peine**

*Piezómetros someros*

Parámetro	Unidades	Núm. Datos	Promedio	Desviación Estándar	Mínimo	Máximo	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	
C.E.	μS/cm	15	65.864	14.007	55.300	111.600	57.620	61.330	68.885	
pH	U pH		7,94	0,22	7,57	8,40	7,85	7,90	7,99	
Na	mg/L	9	14.083	6.416	9.610	26.462	10.300	10.500	13.670	
K	mg/L		2.024	498	1.650	3.210	1.680	1.880	2.168	
Mg	mg/L		1.154	348	527	1.890	1.093	1.110	1.215	
Ca	mg/L		1.252	410	205	1.570	1.300	1.320	1.442	
Cl	mg/L		26.419	10.320	18.313	50.652	21.287	22.158	24.620	
SO4	mg/L		5.512	2.872	2.226	10.364	3.960	4.484	6.058	
HCO3	mg/L		202	125	122	515	135	155	211	
Li	mg/L		140	41	95,3	244	127	130	137	
B	mg/L		78	31	56	160	65	70	73	
As	mg/L		2,02	1,95	0,56	6,67	0,94	1,33	2,25	
Sr	mg/L		14,17	6,46	5,20	28,10	11,57	14,80	15,30	
rNa/rCl				0,82	0,16	0,65	1,15	0,73	0,75	0,87
rNa/rK				11,7	4,1	8,1	22,1	10,4	10,5	10,8
rCl/rSO4			9	7,5	3,2	3,2	13,1	5,2	7,0	8,7
rCl/rHCO3			261	95	71,7	412	223	258	302	
rMg/rCa			1,77	0,95	1,25	4,23	1,34	1,38	1,63	

*Piezómetros profundos*

Parámetro	Unidades	Núm. Datos	Promedio	Desviación Estándar	Mínimo	Máximo	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	
C.E.	μS/cm	30	232.437	6.540	213.200	241.800	228.875	233.800	236.600	
pH	U pH		6,88	0,39	6,50	8,20	6,64	6,78	6,90	
Na	mg/L	24	88.596	8.821	76.545	106.186	81.366	88.450	93.192	
K	mg/L		17.422	3.570	12.581	23.168	14.652	16.674	19.875	
Mg	mg/L		7.550	1.685	2.649	9.416	7.357	7.900	8.480	
Ca	mg/L		587	323	192	1.741	383	446	765	
Cl	mg/L		186.368	12.717	160.364	206.808	177.818	186.518	195.624	
SO4	mg/L		11.076	3.047	5.332	15.299	8.565	10.741	14.305	
HCO3	mg/L		566	77	432	715	510	566	610	
Li	mg/L		1069	420	0,5	1710	823	1085	1448	
B	mg/L		589	97	373	740	509	589	655	
As	mg/L		4,20	3,80	0,00	13,33	0,07	6,67	6,67	
Sr	mg/L		12,22	13,12	0,00	48,00	3,68	6,69	14,55	
rNa/rCl				0,74	0,07	0,65	0,91	0,67	0,71	0,78
rNa/rK				8,9	1,7	6,7	13,2	7,3	9,3	10,0
rCl/rSO4			24	24,3	6,6	16,6	45,3	18,6	23,4	27,6
rCl/rHCO3			574	73	458,0	735	523	573	625	
rMg/rCa			25,31	10,28	7,54	39,12	16,14	20,84	35,72	

En síntesis, en el sector de las lagunas del sector Peine, los resultados indican lo siguiente:

- Las aguas de las lagunas presentan concentraciones muy variadas en los elementos cloruro y el sodio, pero siempre menos mineralizados que la salmuera descrita en el Núcleo. De hecho, en promedio la salmuera es 4 veces más mineralizada que el agua de las lagunas de Peine, similar a lo descrito en La

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

Punta y La Brava. Litio y boro también son elementos presentes en estas aguas, con concentraciones promedio de 89 mg/L y 55 mg/L, respectivamente.

En los piezómetros más cercanos a las lagunas se distinguen dos grupos de agua:

- Flujos someros menos mineralizados, representan aguas del acuífero, que se caracterizan en este sector por concentraciones en iones mayoritarios y minoritarios muy similares a las muestras de las lagunas, inferiores a 112.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y con contenidos en cloruro inferiores a 51.000 mg/L.
- Los monitoreos más profundos, son más mineralizados, con tendencia a valores superiores de 200.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , con contenidos en iones mayoritarios y minoritarios muy similares a los determinados en la salmuera del núcleo, lo cual permitiría establecer una correlación entre las aguas del núcleo y los pozos habilitados en profundidad. Esta correlación se corroborará también con el estudio isotópico, que permitirá identificar la naturaleza y evolución de las aguas.

#### 7.6.2.6 Sector Tilomonte

Incluye todos los afloramientos y puntos de agua subterránea ubicados en el sector sureste del Salar, entorno a la localidad de Tilomonte, y que se encuentran indicados en color verde claro en la Figura 7-2.

En promedio, las aguas del sector de Tilomonte se caracterizan por conductividades bajas del orden de 6000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , concentraciones en cloruro inferiores a 3200 mg/L y valores de pH de 8,5. El contenido de cloruro es mayor al de sodio, siendo casi el doble en concentración.

De los iones minoritarios, Litio y Boro están presentes con concentraciones promedio de 5 y 8 mg/L, respectivamente (ver Tabla 7-14), comparativamente más bajas que las muestreadas en los piezómetros someros.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

**Tabla 7-14 Estadística de los resultados químicos 2013-2014 en el sector de Tilomonte**

Parámetro	Unidades	Núm. Datos	Promedio	Desviación Estándar	Mínimo	Máximo	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	
C.E.	μS/cm	45	6.003	625	5.584	9.745	5.807	5.882	5.995	
pH	U pH		8,48	0,37	7,40	9,10	8,29	8,50	8,70	
Na	mg/L	29	850	153	667	1.459	742	824	880	
K	mg/L		67	21	52	165	57	63	68	
Mg	mg/L		120	20	83	172	106	119	132	
Ca	mg/L		207	86	108	470	125	231	261	
Cl	mg/L		1.803	337	1.361	3.157	1.587	1.779	1.960	
SO4	mg/L		376	320	3,3	930	17	539	634	
HCO3	mg/L		131	105	10	420	30	166	207	
Li	mg/L		5,38	21,12	0,46	115,0	1,01	1,14	1,54	
B	mg/L		8,58	2,33	4,10	14,50	7,40	8,18	9,90	
As	mg/L		0,13	0,25	0,00	1,33	0,02	0,07	0,13	
Sr	mg/L		3,12	1,73	1,13	7,00	2,19	2,39	3,90	
rNa/rCl				0,73	0,08	0,58	0,95	0,68	0,72	0,76
rNa/rK				22,1	2,5	15,0	26,9	20,9	21,8	23,8
rCl/rSO4			140	246	3,1	871	3,4	4,6	163	
rCl/rHCO3			73,9	85,0	10,7	363,0	13,5	16,4	114,8	
rMg/rCa			1,07	0,32	0,60	1,62	0,81	0,90	1,36	

#### 7.6.2.7 Sector Borde Este

Incluye todos los afloramientos de aguas superficiales ubicados en el sector oriental del área de estudio, donde se evidencian secuencias de lavas volcánicas y depósitos de relleno aluvial. Este sector incluye principalmente el monitoreo de escurrimientos y vertientes en las quebradas de Camar y Peine, y se encuentran marcados en color verde oscuro en la Figura 7-2.

En cuanto a la conductividad, las aguas del Borde Este presentan valores de conductividad entre 2400 y 5000 μS/cm, con concentraciones de cloruro entre 205 mg/L y 1080 mg/L. El pH en promedio se encuentra en torno a 8. Dentro de los elementos minoritarios, Litio y Boro están presentes con concentraciones promedio similares a lo observado en otras aguas poco mineralizadas, como por ejemplo del sector de Borde Tilopozo.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

**Tabla 7-15 Estadística de los resultados químicos 2013-2014 en el sector de Borde Este**

Parámetro	Unidades	Núm. Datos	Promedio	Desviación Estándar	Mínimo	Máximo	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
C.E.	μS/cm	43	3.355	784	2.408	4.945	2.579	3.587	4.092
pH	U pH		7,91	0,32	7,40	8,80	7,66	7,90	8,13
Na	mg/L	30	373	99	183	543	287	384	448
K	mg/L		22	8,0	0,3	44	18	22	26
Mg	mg/L		104	31	26	149	77	117	127
Ca	mg/L		190	79	68	314	128	144	271
Cl	mg/L		549	332	205	1.078	256	341	892
SO4	mg/L		675	104	271	811	675	696	730
HCO3	mg/L		404	224	124	840	151	508	585
Li	mg/L		0,68	0,34	0,28	2,22	0,47	0,62	0,71
B	mg/L		7,26	3,19	0,90	18,60	5,20	7,23	8,41
As	mg/L		0,68	2,40	0,05	13,33	0,07	0,14	0,45
Sr	mg/L	2,26	1,75	0,52	6,40	0,75	1,80	2,46	
rNa/rCl		30	1,36	0,64	0,61	3,03	0,84	1,26	1,76
rNa/rK			137	591	15	3266	25	30	32
rCl/rSO4			1,1	0,6	0,5	2,1	0,5	0,9	1,6
rCl/rHCO3			4,9	5,1	0,5	13,8	0,8	1,2	9,6
rMg/rCa			1,17	0,77	0,35	3,58	0,46	1,47	1,58

#### 7.6.2.8 Sector Lagunas del Norte

Incluye las lagunas que se desarrollan en el sector norte del Salar, denominadas Aguas de Quelana, y sistema Soncor (lagunas Chaxa y Barros Negros), piezómetros y pozos, escurrimientos superficiales y vertientes que permitan su caracterización. En la Figura 7-2, estos puntos se han identificado en color gris.

Los resultados químicos indican que las aguas de las lagunas al norte del Salar, Sistema Soncor y Quelana, son aguas muy mineralizadas con valores de conductividad que varían entre 93.000 y 250.000 μS/cm, asociado a concentraciones de cloruro entre 19.000 y 192.000 mg/L. Los valores de pH son variables pero en torno a 7,7. Los contenidos de Litio y Boro promedio, 615 mg/L y 384 mg/L, respectivamente, son relativamente más altos que lo analizado en los otros sistemas lagunares del margen sur del Salar.

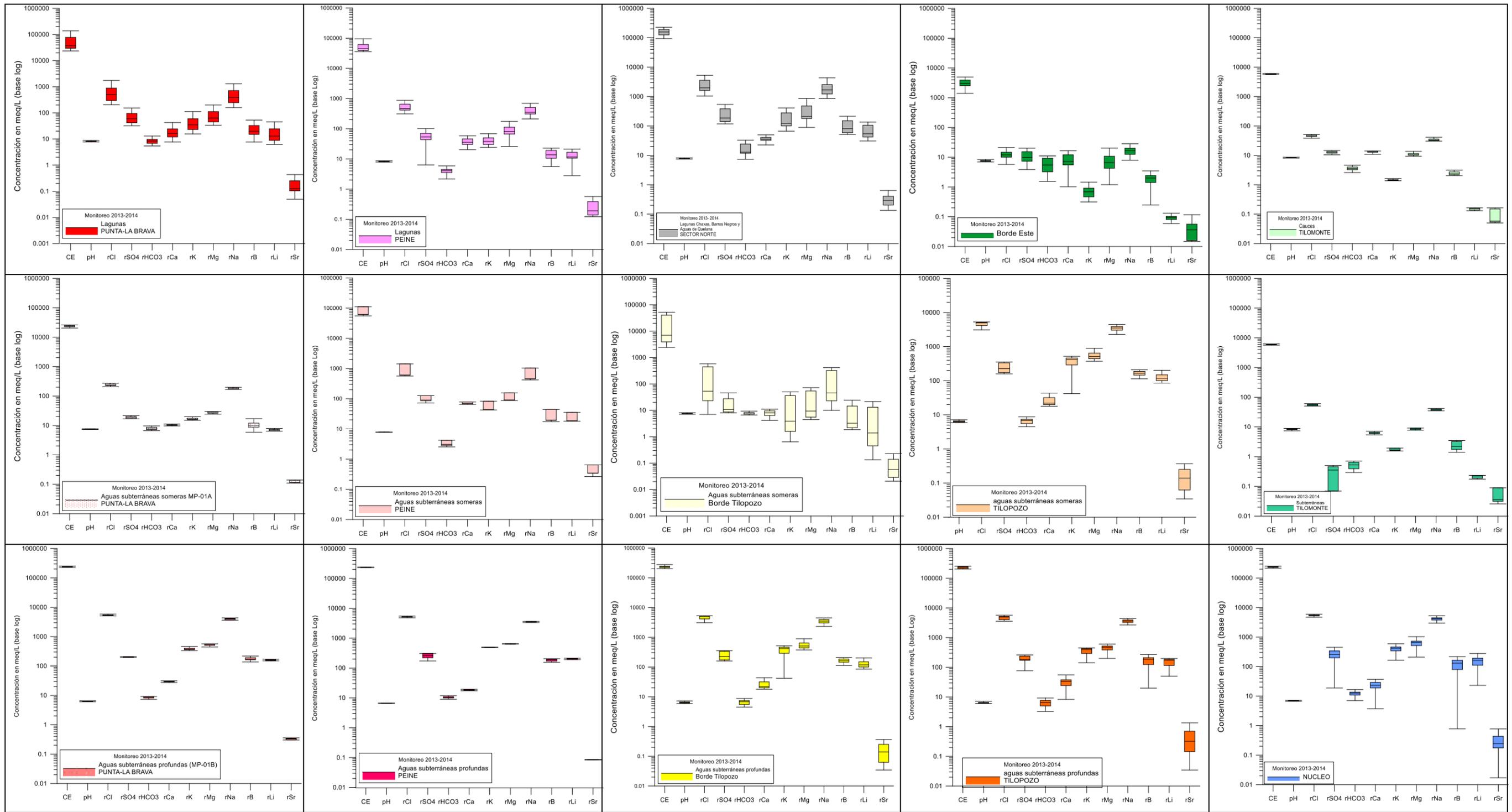
	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

**Tabla 7-16 Estadística de los resultados químicos 2013-2014 en el sector Norte**

Parámetro	Unidades	Núm. Datos	Promedio	Desviación Estándar	Mínimo	Máximo	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
C.E.	μS/cm	53	164.148	44.350	93.470	249.700	128.875	154.550	198.325
pH	U pH		7,72	0,36	6,62	8,70	7,57	7,76	7,90
Na	mg/L	35	48.172	26.632	10.040	100.464	28.250	38.900	64.518
K	mg/L		8.421	6.666	2.583	29.587	4.115	5.300	11.131
Mg	mg/L		4.830	5.626	965	31.952	2.213	2.870	4.780
Ca	mg/L		716	230	182	1.301	639	710	827
Cl	mg/L		94.974	51.739	19.169	191.999	55.517	70.455	146.353
SO4	mg/L		13.253	8.598	5.639	45.873	7.659	9.934	15.633
HCO3	mg/L		991	829	387	5020	592	738	1001
Li	mg/L		615	737	115	4343	282	374	671
B	mg/L		384	288	107	1593	193	294	495
As	mg/L		3,71	1,81	0,95	8,80	3,16	3,33	4,09
Sr	mg/L	16,36	12,45	2,70	61,00	8,61	12,90	17,95	
rNa/rCl		35	0,79	0,11	0,43	1,02	0,73	0,76	0,83
rNa/rK			11,4	4,3	2,2	30,6	10,6	11,6	12,3
rCl/rSO4			10,3	3,4	2,0	19,2	8,7	9,3	11,3
rCl/rHCO3			193	105	34	493	138	164	227
rMg/rCa			19,97	49,09	1,79	288,99	4,76	5,33	14,41

A modo de resumen, en la Figura 7-15 se representan gráficamente los análisis estadísticos, mediante diagramas de cajas o de bigotes, con el fin de visualizar los datos analizados, realizar comparaciones entre los sectores y según tipos de muestras estudiadas. Los parámetros que se seleccionaron para este análisis fueron los cationes y aniones mayoritarios, además de Litio, Boro y Estroncio, que se encuentran presentes en cantidades significativas en las muestras descritas.

Figura 7-15 Diagramas de caja de la concentración química de las aguas monitoreadas entre 2013-2014.



Fuente: Elaboración propia

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

### 7.6.3 Evolución temporal de concentraciones químicas

En el Apéndice F. Análisis físico-químico e isotópico del agua, se presenta la variación de las concentraciones y valores físico-químicos de todos los puntos de monitoreo de las aguas subterráneas y superficiales monitoreadas en cada sector de estudio, entre 2013 y 2014.

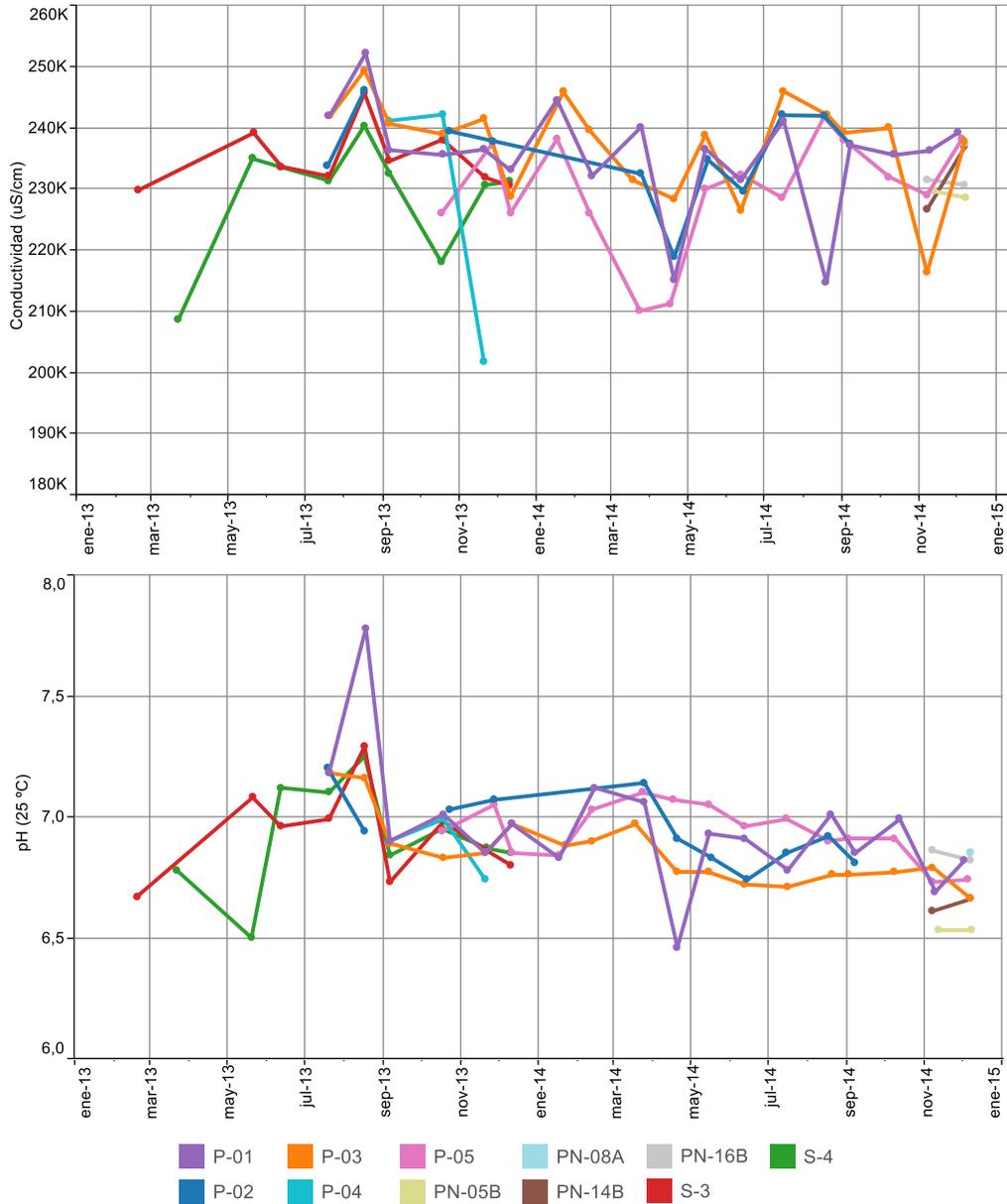
#### 7.6.3.1 Sector del Núcleo del Salar

Durante el período de monitoreo 2013-2014, los pozos construidos en el área del Núcleo entre 30 m y 50 m (CI-21, CL-37, PN-05B, PN-08A, PN-14B, PN-16B) y 100 m de profundidad (P-05), presentan valores de conductividad (CE) variables, todos ellos entre 200.000 y 250.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . En la Figura 7-16 se muestra la variación temporal de la CE y pH para algunos pozos del Núcleo.

Los valores de conductividad no muestran ninguna tendencia clara y los aumentos y descensos que se observan no presentan una clara relación con las condiciones climáticas de tipo altiplánicas, las que se detallan en el Capítulo 6 de Hidrología.

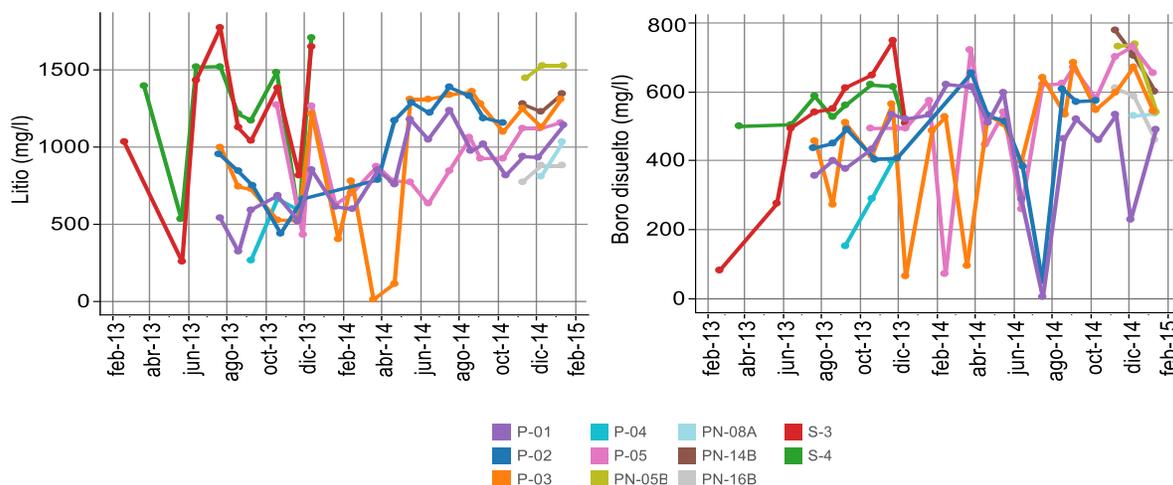
Los valores de pH muestran un comportamiento distinto a la conductividad, ya que entre agosto 2013 y febrero 2014 la salmuera presentó valores más alcalinos, en torno a 8, los que posteriormente han estado en torno a 7. Durante el período más alcalino, también se observa un aumento generalizado en la concentración de Sodio de todos los pozos monitoreados en este sector (ver gráficos Apéndice F). Las concentraciones de los demás iones mayoritarios, tales como Calcio, Potasio y Magnesio, en general presentan poca oscilación en sus concentraciones, a partir de marzo 2014.

**Figura 7-16 Variación temporal de la conductividad (arriba) y pH (abajo) en pozos del Núcleo del Salar. Período 2013-2014.**



Respecto a las concentraciones iones minoritarios presentan variaciones notables hasta mediados de marzo de 2014, pero siempre dentro un rango. En el caso del Litio, las salmueras presentan un aumento gradual en sus concentraciones, casi al doble, a fines de 2014. El comportamiento del Boro es variable, pero sin observar una clara relación estacional. En algunos casos, se observa un incipiente incremento en Boro, como por ejemplo en los pozos P-03 y P-05, a fines del 2014.

**Figura 7-17 Variación temporal de Litio (izq.) y Boro (der.) en pozos del Núcleo del Salar. Período 2013-2014.**



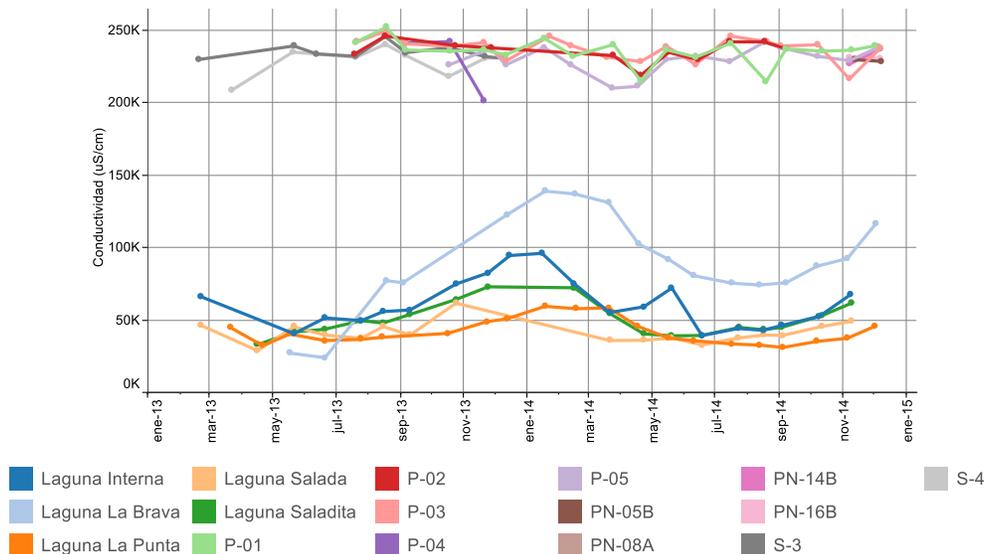
### 7.6.3.2 Sectores de las lagunas La Punta-La Brava, Peine y Norte del Salar

En la Figura 7-18 se presenta la variación de la conductividad mensual para el período 2013-2014. En la gráfica además se incluye, a modo de comparación, los valores de conductividad de la salmuera del Núcleo.

Tal como se observa en la Figura 7-18, se presentan diferentes comportamientos en las concentraciones de la salmuera (Núcleo) contrastado con los valores de conductividad medidos en las lagunas del sector sur de la Zona Marginal, representados por el sistema La Punta y La Brava, y el Sistema Peine (lagunas Salada, Saladita e Interna).

En el sector sur de la Zona Marginal, las lagunas tienden a aumentar la conductividad en los últimos meses de cada año (período estival), prolongándose hasta mediados de marzo, a diferencia de los pozos del Núcleo que se mantienen en un rango más estable, entre 200.000 y 250.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Esto también se observa durante el período invernal, donde las lagunas tienden a disminuir en conductividad, alcanzando un valor mínimo de 40.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (aproximadamente). En cambio los pozos del Núcleo, presentan un comportamiento distinto, más estable en ese periodo.

**Figura 7-18 Comparación valores de conductividad entre la salmuera del Núcleo y las lagunas del sector sur Salar. Período 2013-2014.**

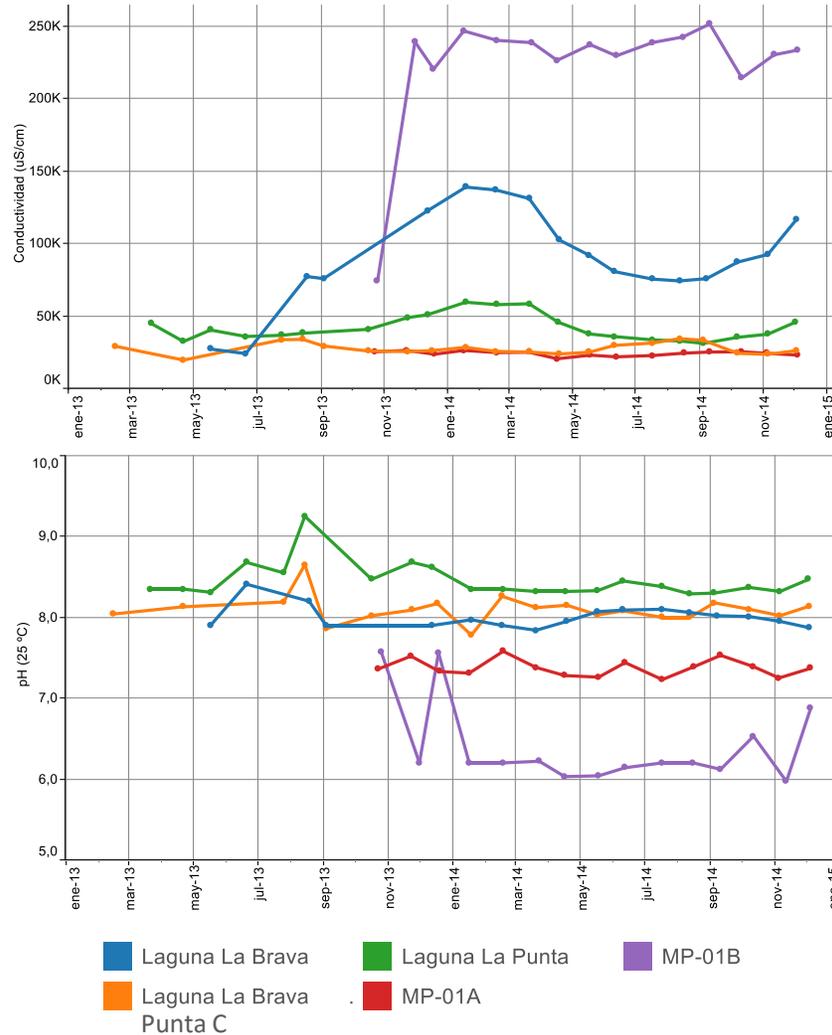


Más en detalle, en el sector de la laguna La Brava Punto C se reconocen las aguas superficiales más diluidas del sector (Figura 7-19). En este sector se presentan valores históricos similares de conductividad, en torno a 25.0000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , cuyos valores son afines a las muestras del piezómetro somero MP-01A. Esto se interpreta como un aporte de aguas subterráneas salobres hacia la superficie de la laguna La Brava Punto C. Durante este proceso, el pH también es modificado, incrementándose desde valores de 7,5 a 8, aproximadamente (Figura 7-19). Este incremento puede tener relación con procesos disolución/precipitación de especies carbonatadas ( $\text{CO}_3$  y  $\text{HCO}_3^-$ ) al modificarse las condiciones físico-químicas del agua subterránea una vez que éstas llegan a la superficie.

La Laguna La Brava, en tanto, se observa más mineralizada y con incrementos en la conductividad más significativos durante el periodo estival, que lo observado en la Laguna La Punta, lo cual refleja su distancia a la fuente de alimentación y la influencia de las condiciones climáticas de la región.

En contraste con las aguas de las lagunas La Punta y La Brava, las muestras del piezómetro más profundo, de 30m, (MP-01B) presenta rangos de conductividad de una salmuera. Asimismo se aprecia que no existe una clara relación con la variación estacional, que también se observó en los pozos del Núcleo. Esto permite inferir una correlación entre la salmuera del Núcleo y los piezómetros más profundos en este sector.

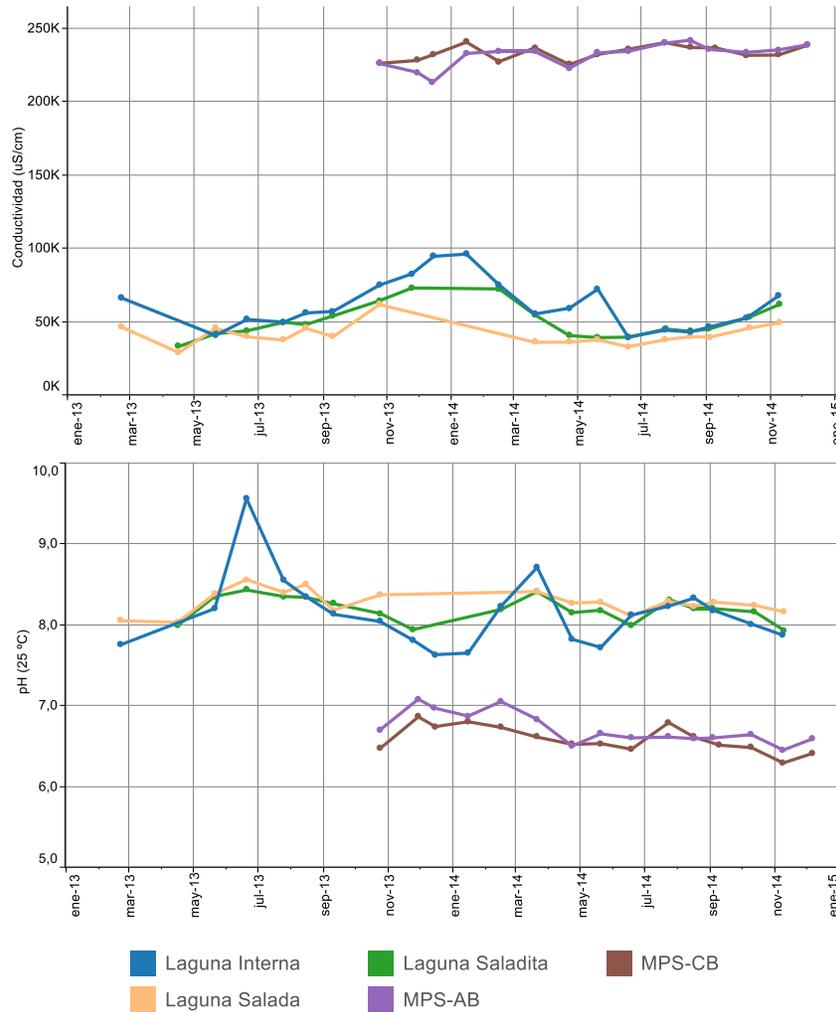
**Figura 7-19 Variación temporal de conductividad y pH de pozos y lagunas del sector sur del Salar:  
La Punta-La Brava. Período 2013-2014.**



En el sector de Peine, la conductividad de las aguas de las lagunas Salada, Saladita e Interna, presenta un comportamiento estacional, la cual tiende a ser más alta durante los meses estivales, particularmente en las muestras de la laguna Interna, que alcanza valores de conductividad hasta 100.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

Las muestras de los piezómetros profundos (MPS-AB y MPS-CB), construidos en la Zona Marginal entre 30 y 40 m de profundidad, presentan valores de conductividad relativamente constantes en el tiempo y entre 200.000 y 250.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Esto implica que las muestras de los piezómetros no guardan relación con los valores de conductividad ni con el patrón de comportamiento estacional de las lagunas. De hecho, este comportamiento es muy similar a lo observado en los pozos del Núcleo, lo cual permite deducir una correlación entre las muestras del Núcleo y los piezómetros más profundos del sector de Peine.

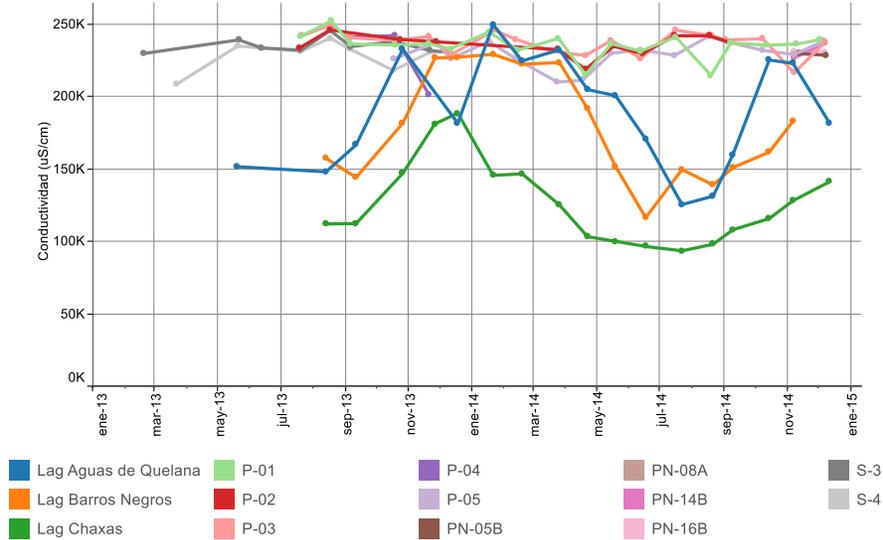
**Figura 7-20 Variación temporal de Conductividad y pH de pozos y lagunas del sector sur del Salar: Sector Peine. Período 2013-2014.**



En el sector Norte de la Zona Marginal del Salar, las lagunas del sistema Soncor y Quelana presentan un comportamiento similar a la de otras lagunas de la Cuenca, es decir un incremento en la mineralización asociado a los meses de verano (Figura 7-21). No obstante, los valores de conductividad tienden a ser más elevados que los registrados en las lagunas del margen sur del Salar.

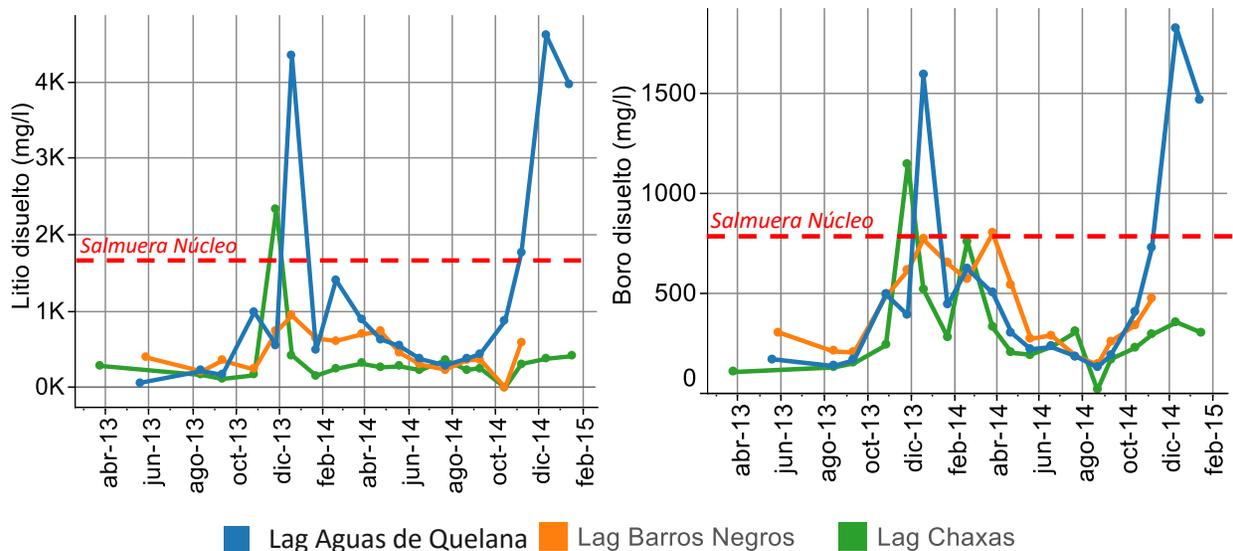
En comparación con los pozos del Núcleo, las lagunas presentan un comportamiento diferente, aunque la conductividad de sus aguas durante el período estival, llega a tener valores similares a los medidos en los pozos del Núcleo. Es decir, que las lagunas del sector Norte pueden llegar a registrar valores de hasta 250.000 µS/cm.

**Figura 7-21 Comparación valores de conductividad entre la salmuera del núcleo y las lagunas del sector norte de la cuenca del Salar. Período 2013-2014.**



Asociado al incremento en la conductividad, las lagunas también presentan variaciones en las concentraciones de sus iones minoritarios. En la Figura 7-22 se presenta la evolución temporal de las concentraciones de Litio y Boro. En las gráficas, las concentraciones de estos componentes tienden a aumentar durante los meses estivales, superando incluso las concentraciones máximas analizadas en la salmuera del Núcleo (línea roja segmentada).

**Figura 7-22 Concentraciones de Litio y Boro en lagunas del sector Norte**

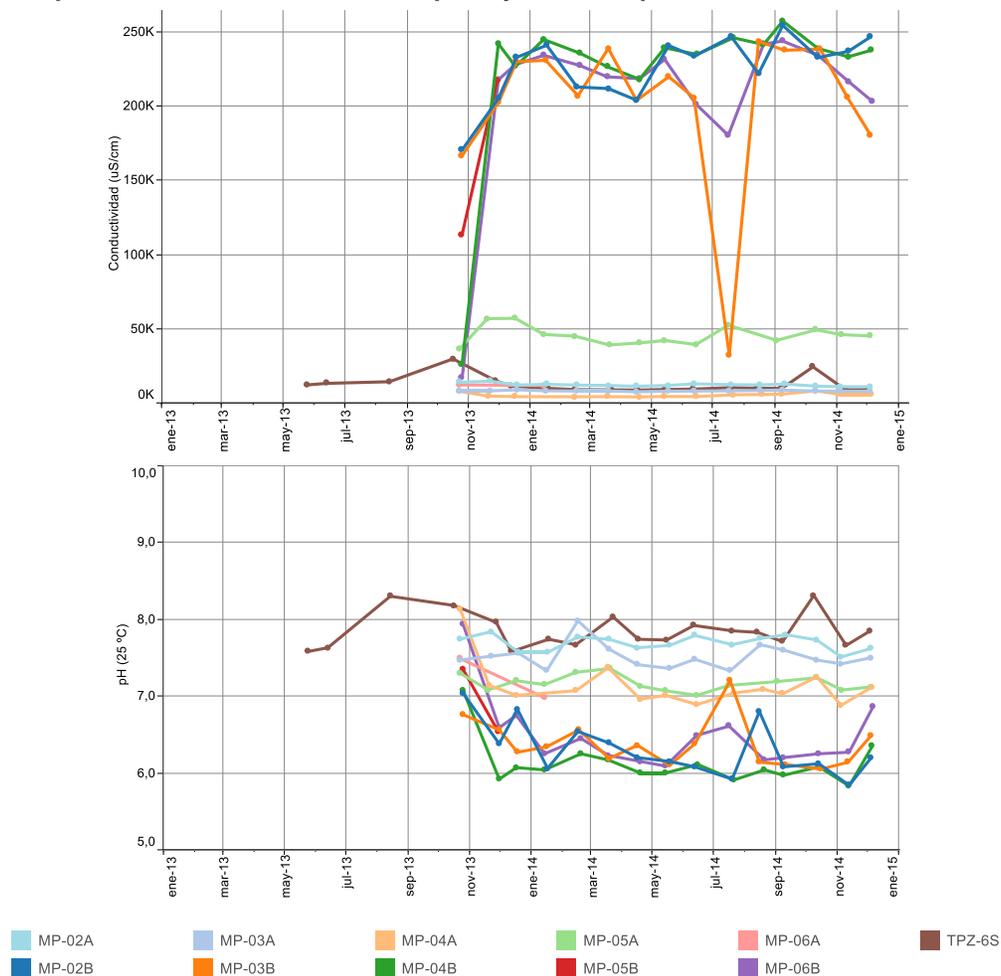


### 7.6.3.3 Sector Tilopozo y Borde Tilopozo

Los puntos monitoreados en el sector de Tilopozo y Borde Tilopozo, están representados por pozos someros “A”(inferiores a 42 metros) y por pozos profundos “B” (mayores a 60 metros), construidos tanto en la Zona Marginal, donde se desarrolla la costra carbonatada-sulfatada, como fuera de ésta, en la zona de los depósitos aluviales.

Las muestras en pozos someros, ubicados en la zona de la costra y en los depósitos aluviales, presentan valores de conductividad inferiores a 50.000  $\mu\text{S/cm}$ , con oscilaciones mensuales mínimas (Figura 7-23).

**Figura 7-23 Variación temporal de conductividad (arriba) y pH (abajo) de pozos someros y profundos en el sector de Tilopozo y Borde Tilopozo. Período 2013-2014.**



En tanto, los pozos más profundos presentan un comportamiento más oscilatorio, sin una relación estacional, y con valores de conductividad mucho más altos que la de los piezómetros someros. En la

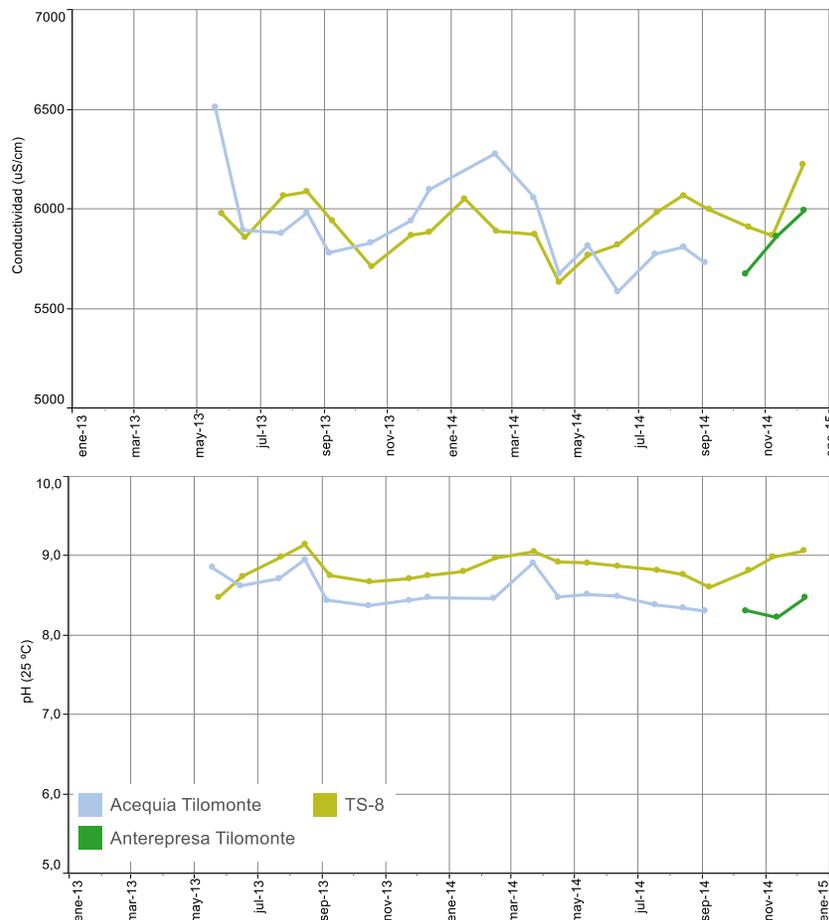
mayoría de las muestras, se registran valores por sobre 200.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , similar a lo determinado en los pozos del Núcleo, lo cual sugiere una correlación entre la salmuera del Núcleo y los pozos más profundos del sector de Tilopozo y Borde Tilopozo.

#### 7.6.3.4 Sector Tilomonte

Los puntos monitoreados en el sector de Tilomonte se dividen en muestras de agua superficial (Vertiente/Acequia Tilomonte y Antepresa Tilomonte) y aguas subterráneas de pozo (TS-8). En la Figura 7-24 se grafica la evolución temporal de los valores de conductividad del estos puntos.

Las aguas superficiales de cauce y la del pozo presentan valores de conductividad similares, dentro del rango 5500 y 6500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . En ambos casos, los valores más altos de conductividad tienden a registrarse en los meses estivales. Aunque en las aguas del pozo, también se evidencian incrementos a finales del período invernal, durante el período agosto-septiembre.

**Figura 7-24 Variación temporal de conductividad y pH de aguas superficiales y de pozo en el sector de Tilomonte. Período 2013-2014.**

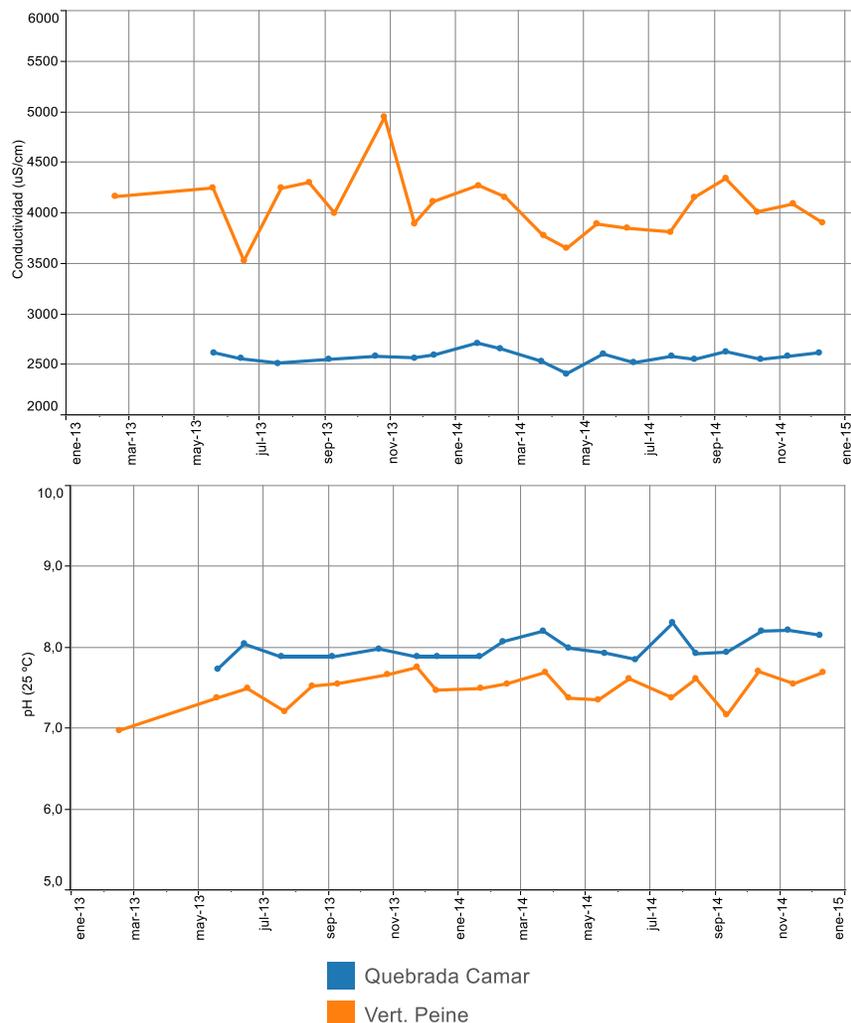


### 7.6.3.5 Sector Borde Este

Los puntos monitoreados en el sector Borde Este durante el período 2013-2014, están dados por la vertiente Peine (sector sur) y Quebrada Camar (sector nororiental).

Las aguas de Quebrada Camar (línea azul en la Figura 7-25) se mantienen en torno a 2500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , sin una clara relación con las variaciones estacionales. En tanto, las aguas de la vertiente Peine muestran una variación mensual más notoria. Además, las aguas son más mineralizadas, entre 3500 y 5000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , registrándose los valores más altos en los meses de primavera (septiembre-octubre). Respecto al pH, la Quebrada Camar tiende a ser más básica, en torno a 8, respecto a la Vertiente Peine durante el período de monitoreo.

**Figura 7-25 Variación temporal de conductividad y pH entre aguas del Borde Este. Período 2013-2014.**



	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

#### 7.6.4 Composiciones químicas y distribución espacial

En el Apéndice F. Análisis físico-químico e isotópico del agua, se presenta la variación de las concentraciones y valores físico-químicos de las aguas subterráneas y superficiales monitoreadas en cada sector de estudio, entre 2013 y 2014.

Para describir la composición química se han utilizado diagramas de Piper permiten clasificar las aguas según las concentraciones químicas relativas de los aniones ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ) y cationes ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{Mg}^{+2}$ ), expresadas en porcentaje para cada muestra. Mientras que los diagramas de Stiff utilizan las concentraciones relativas en miliequivalentes/Litro (meq/L) de los mismos. Además, estos se sitúan sobre un mapa para mostrar la distribución geográfica de la composición química de las aguas.

Los diagramas anteriores han sido complementados con un análisis de relaciones iónicas para entender las reacciones físico-químicas que modifican la composición química de las aguas, según sea su dirección de flujo, desde la zona de recarga hasta el punto de monitoreo. Estas modificaciones pueden estar asociadas a procesos de óxido-reacción, evaporación, disolución/precipitación, o mezcla (Custodio y Llamas, 2001).

En el proceso de disolución y precipitación, la composición química de las aguas varía según la solubilidad de los minerales presentes en el acuífero y la capacidad del agua para disolver (agua subsaturada) o precipitarlos (agua saturada). Por lo que este proceso tiene estrecha relación con la geología del sector. Las principales relaciones iónicas, en concentraciones meq/L, que se presentan en este informe son  $r\text{Na}/\text{Cl}$ ,  $r\text{Ca}/\text{SO}_4$  y  $r\text{Cl}/\text{HCO}_3$ .

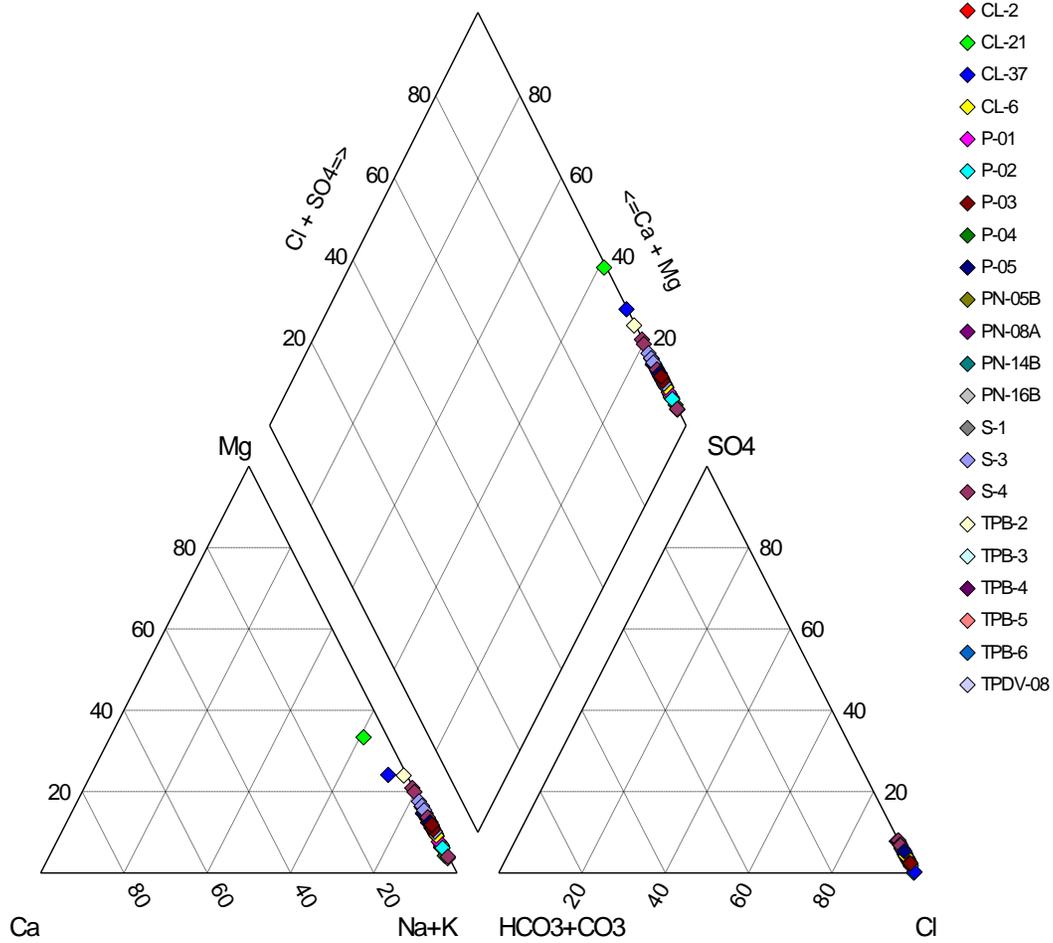
Cabe recalcar que la simbología que se observa en los diagramas de Piper tiene relación con el tipo de agua muestreada, es decir, un rombo ( $\diamond$ ) para salmueras, un círculo ( $\circ$ ) para cauces, un triángulo ( $\blacktriangle$ ) para agua de lagunas, y un cuadrado ( $\square$ ) para aguas subterráneas salobres.

A continuación se describen las composiciones químicas y su distribución espacial en los ocho sectores de estudio: sector del Núcleo del Salar, lagunas La Punta y La Brava, Peine, sector de Tilomonte, Tilopozo y borde de Tilopozo, Borde Este y lagunas del sector nororiental del Salar.

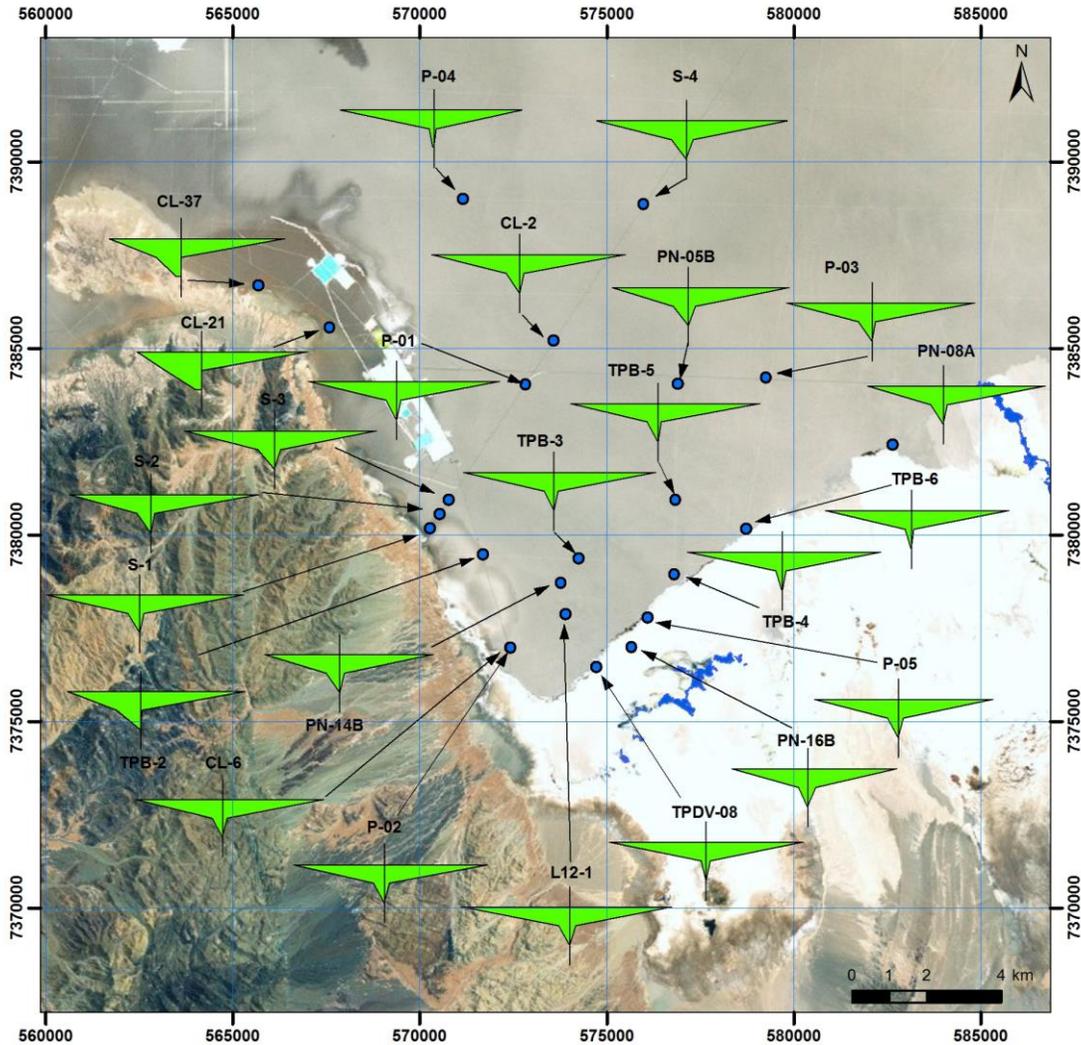
##### 7.6.4.1 Sector del Núcleo

En el diagrama de Piper (Figura 7-26) se observa la composición química de 23 muestras distribuidas en la zona del Núcleo de halita del Salar. Todas las aguas de los pozos son del tipo cloruradas sódicas con contenidos variables de Sodio, Potasio y Magnesio.

**Figura 7-26 Diagrama de Piper de muestras en el sector del Núcleo. Período 2013-2014**

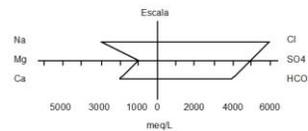


**Figura 7-27 Diagramas de Stiff Sector Núcleo**



**Leyenda**

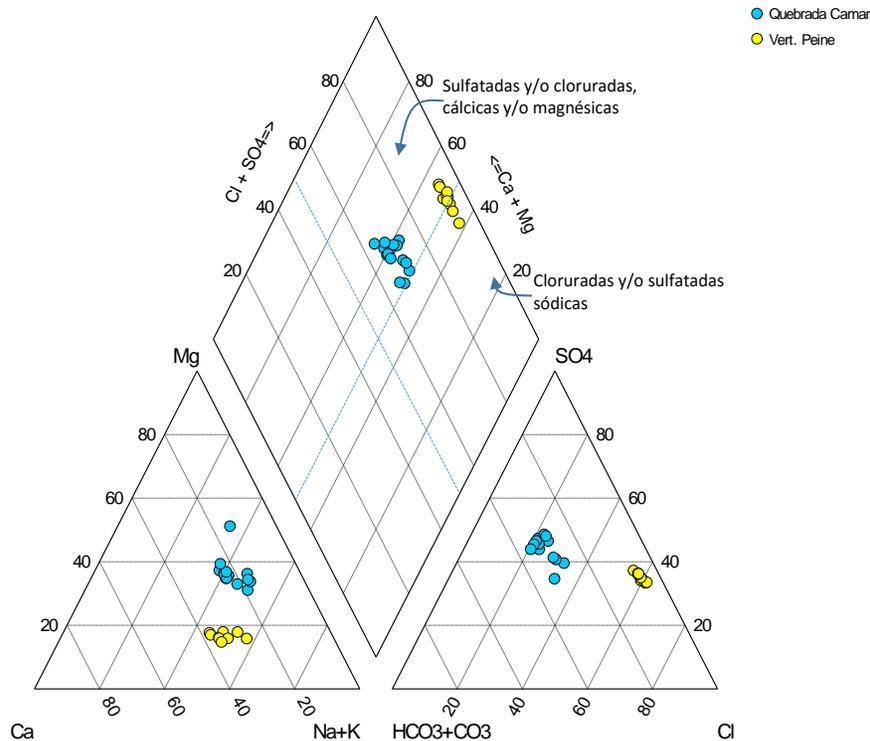
- Pozos
- Laguna
- ▲ Clorurada - Sódica



### 7.6.4.2 Sector Borde Este

Las aguas del sector Borde Este, representadas por la Quebrada Camar y vertiente Peine, son principalmente del tipo sulfatadas y/o cloruradas sódicas (Figura 7-28). La particular diferencia entre estos dos grupos de aguas, es que Quebrada Camar se ubica más próximo al centro activo del Volcán Lascar, el cual representaría una notoria fuente de sulfato para el sistema acuífero en el sector norte de la Cuenca.

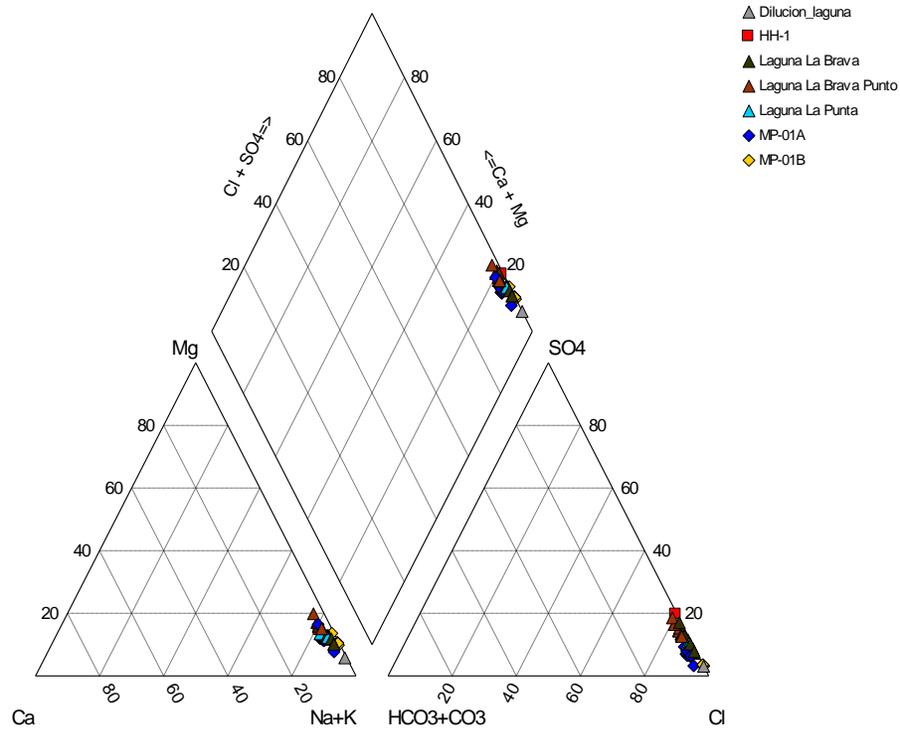
**Figura 7-28 Diagrama de Piper de los puntos monitoreados en el sector Borde Este**



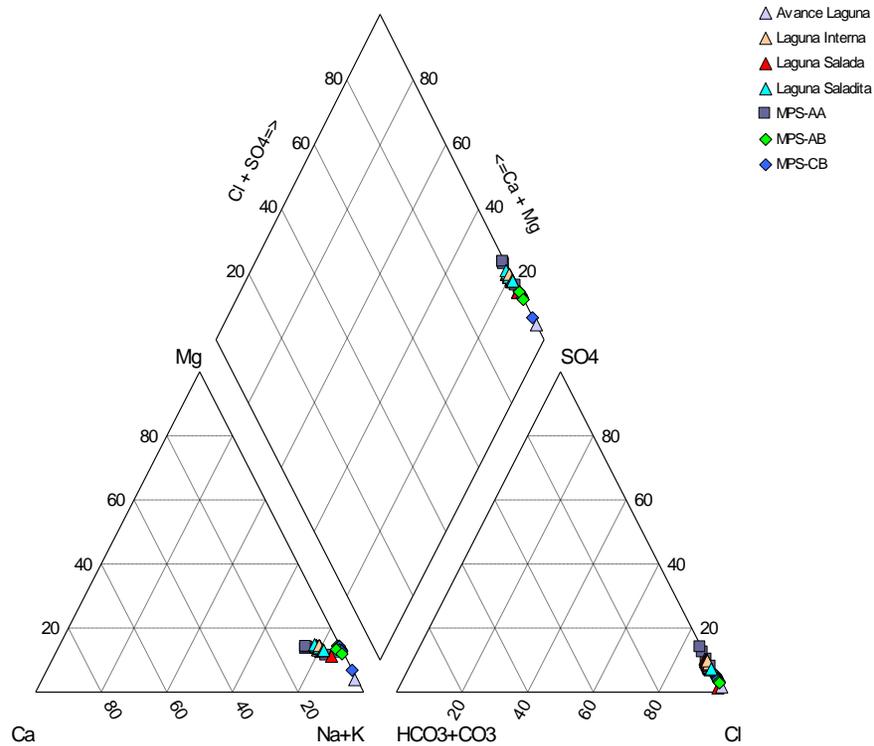
### 7.6.4.3 Sector de las lagunas La Punta-La Brava y de Peine

En el diagrama de Piper (Figura 7-29 y Figura 7-30) es posible observar que las aguas de las lagunas La Punta y La Brava y del Sector Peine (Salada, Saladita e Interna) son del tipo cloruradas-sódicas, con mayores contenidos en cloruros y Sodio. Estas aguas, si bien, son de la misma composición que las salmueras del Núcleo, los valores de conductividad eléctrica son inferiores, menores a 50.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

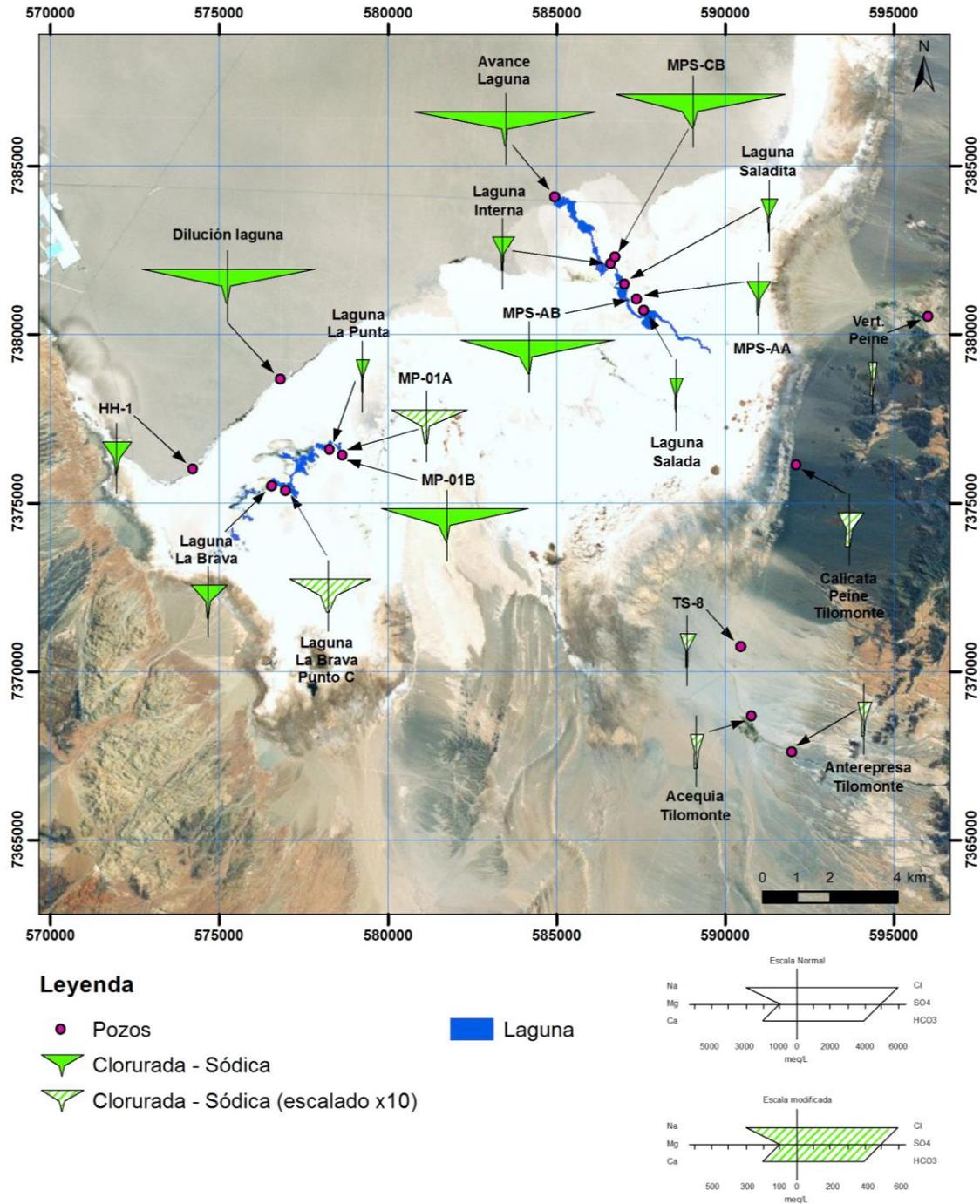
**Figura 7-29 Diagrama de Piper de los puntos monitoreados en el sector Punta-La Brava**



**Figura 7-30 Diagrama de Piper de los puntos monitoreados en el sector Peine**



**Figura 7-31 Diagramas de Stiff muestras de la zona marginal sur de la cuenca**



	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

En la Figura 7-32 se presenta, en escala logarítmica, la relación entre cloruro y sodio (en meq/L) con datos obtenidos entre Marzo 2013 y Septiembre 2014 para las aguas de aporte ubicadas al Este de la Zona Marginal (vertiente Peine y Tilomonte), aguas subterráneas someras y profundas y de las lagunas.

La relación cloruro: sodio permite evaluar i) proceso de disolución/precipitación de sales de halita y ii) procesos de cambio de bases; esto dado que el ión cloruro no se oxida ni se reduce, considerándose como “conservativo” (Custodio y Llamas, 2001).

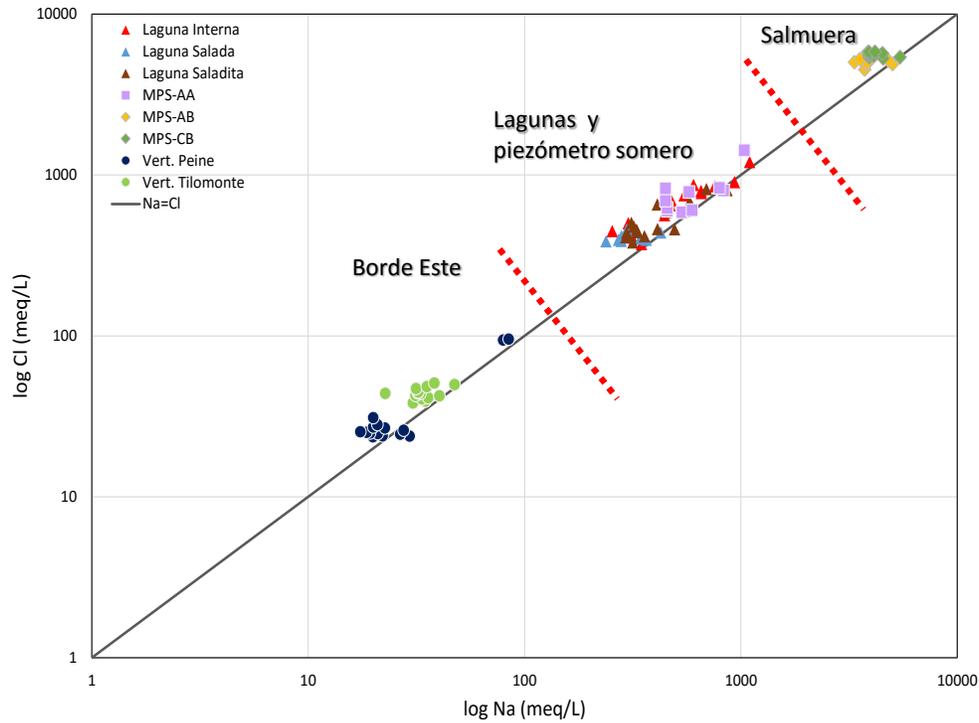
En este sentido, en la Figura 7-32 se ha trazado la recta de disolución/precipitación de halita, que está representada por la relación 1:1 entre cloruro y sodio ( $Cl=Na$ ). En esta gráfica además se puede distinguir tres grupos de muestras: (1) las aguas más diluidas de la vertiente de Peine y Tilomonte; (2) las aguas salinas de las lagunas y del piezómetro somero MPS-AA; y (3) las salmueras de los piezómetros profundos MPS-AB y MPS-CB.

Como se observa, la mayoría de las muestras se alinean por sobre esta recta de equimolaridad, con predominio de cloruro en relación al Sodio, lo cual indicaría que la disolución de sales de halita no ha sido el proceso predominante o único en el sector, pudiendo entonces referirnos a procesos de intercambio de bases, así como también a la posible disolución de otras sales presentes en el Salar, tales como el cloruro de Potasio y cloruro de Litio (Moraga et al., 1974).

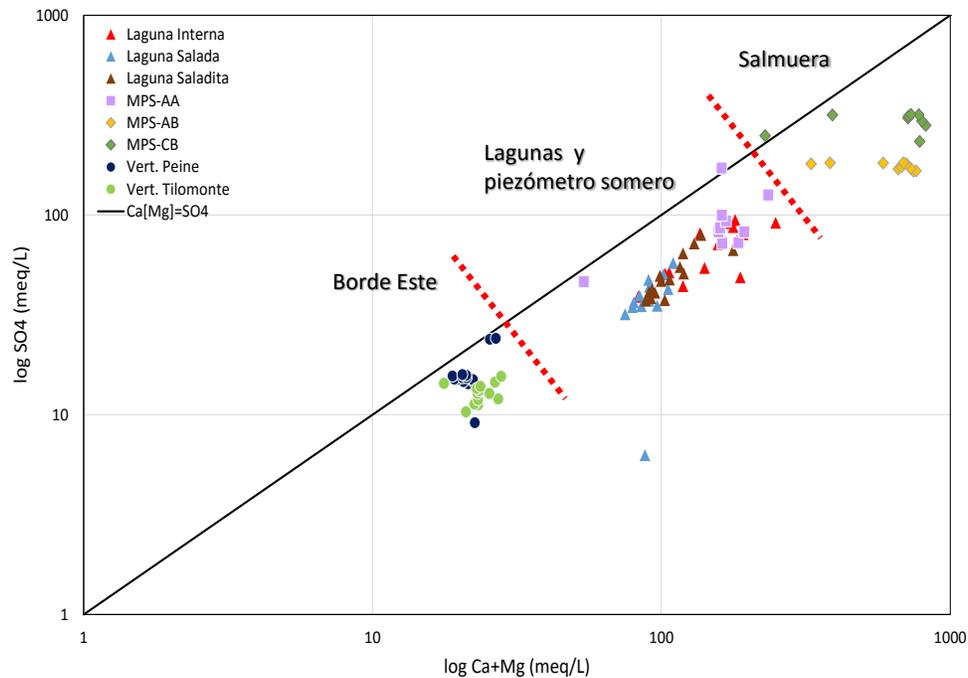
Considerando que las aguas muestreadas se ubican en una zona de costra sulfatada-clorurada (Moraga et al., 1974), es de esperar una posible relación con disolución de minerales sulfatados, tales como yeso/anhidrita. En la Figura 7-33, se presenta en escala logarítmica la relación entre sulfato y Calcio+Magnesio (en meq/L) de las aguas de aporte de las vertientes; de los piezómetros someros y profundos; y de las lagunas muestreadas entre Marzo 2013 y Septiembre 2014. La recta representa disolución/precipitación de minerales sulfatados-cálcicos a magnésicos (yeso), la cual está dada por la relación equimolar 1:1 entre  $Ca(Mg)$  y  $SO_4$ .

En este gráfico se puede distinguir tres grupos de muestras: (1) las aguas más diluidas de las vertientes ubicadas al Este de la Zona Marginal (2) las aguas salinas de las lagunas y del piezómetro somero MPS-AA, y (3) las salmueras de los piezómetros profundos MPS-AB y MPS-CB. En particular, las salmueras tienden a presentar un mayor contenido en  $Ca+Mg$ , en relación a las aguas más diluidas.

**Figura 7-32 Relación Cl versus Na, en las aguas de aporte y de las lagunas del sector Peine**



**Figura 7-33 Relación SO4 versus Ca+Mg, en las aguas de aporte y de las lagunas del sector Peine**

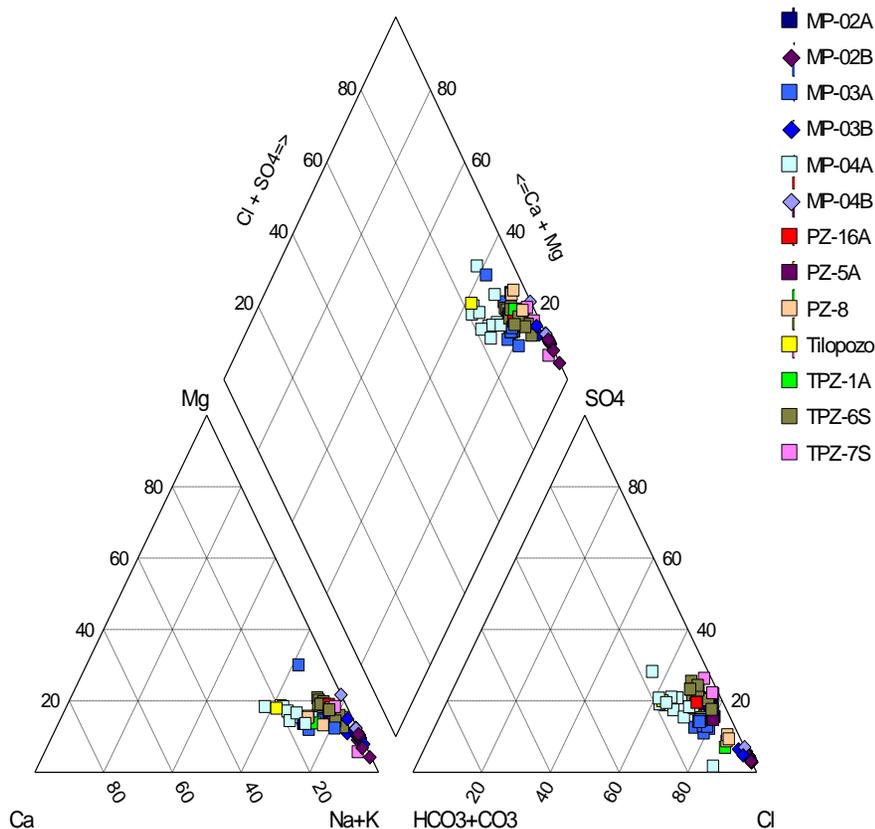


Fuente: Elaboración propia

#### 7.6.4.4 Sector Tilopozo, Borde Tilopozo y Tilomonte

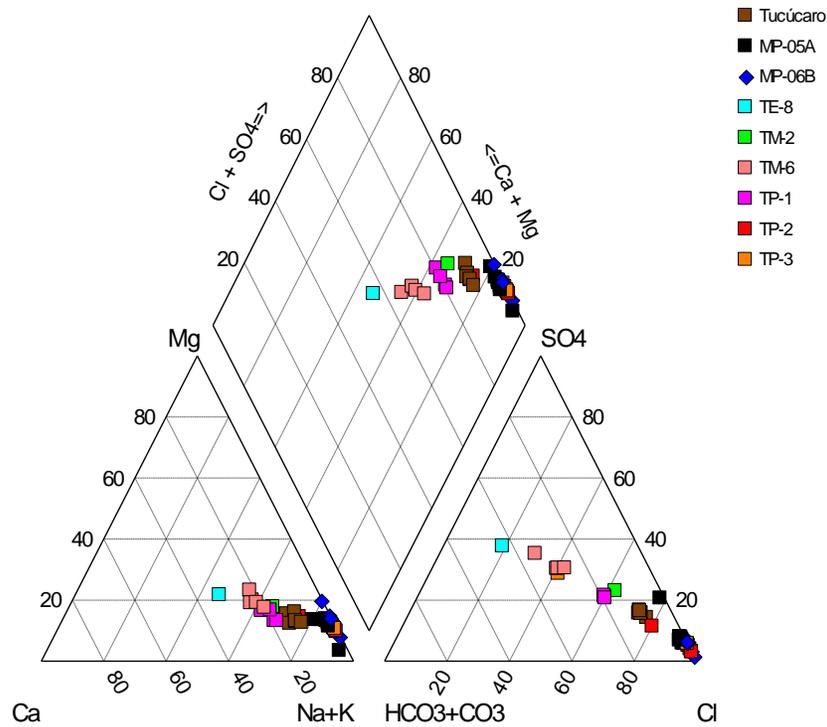
En el diagrama de Piper (Figura 7-34, Figura 7-35 y Figura 7-36) se representan las aguas del sector de Tilopozo, Borde de Tilopozo y Tilomonte, cuyos puntos de monitoreo se ubican en los sectores donde predominan depósitos aluviales. En los diagramas, se aprecia que las aguas en su mayoría son del tipo cloruradas-sódicas, con mayores contenidos en magnesio en los piezómetros del Borde de Tilopozo. Excepcionalmente, también se identifican aguas subterráneas del tipo bicarbonatadas sódicas, restringidas al sector de Callejón de Tilopozo.

**Figura 7-34 Diagrama de Piper de los puntos monitoreados en el sector Tilopozo**

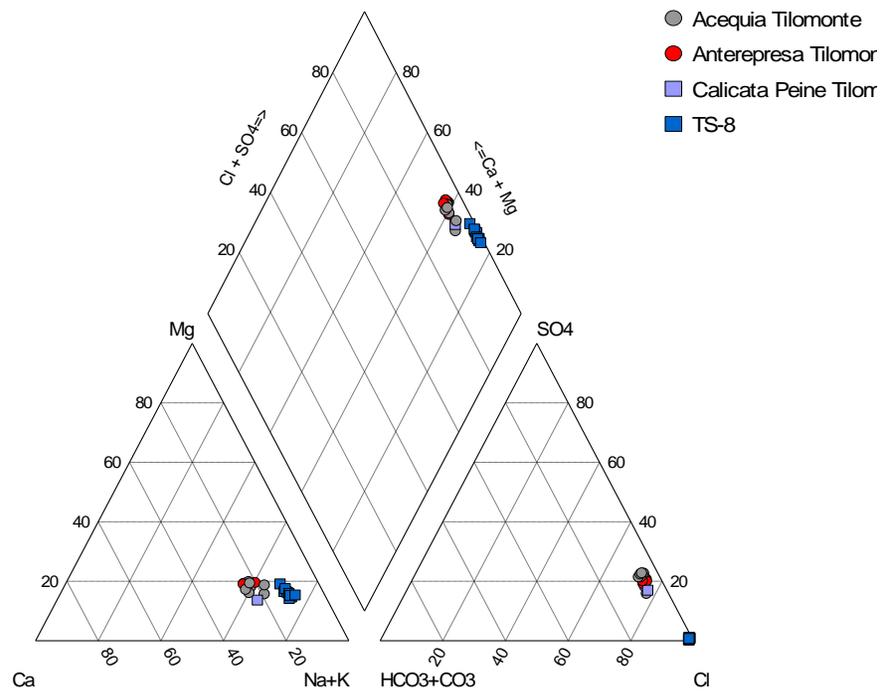


Más en detalle, en la Figura 7-35, el pozo TE-8 representa la muestra más diluida obtenida durante el monitoreo, con valores un conductividad de 2517  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y de cloruro de 151 mg/L. Estas aguas evolucionan, gradiente abajo, a aguas más cada vez más salinas, y con mayores concentraciones en cloruro y sodio.

**Figura 7-35 Diagrama de Piper de los puntos monitoreados en el sector Borde Tilopo**

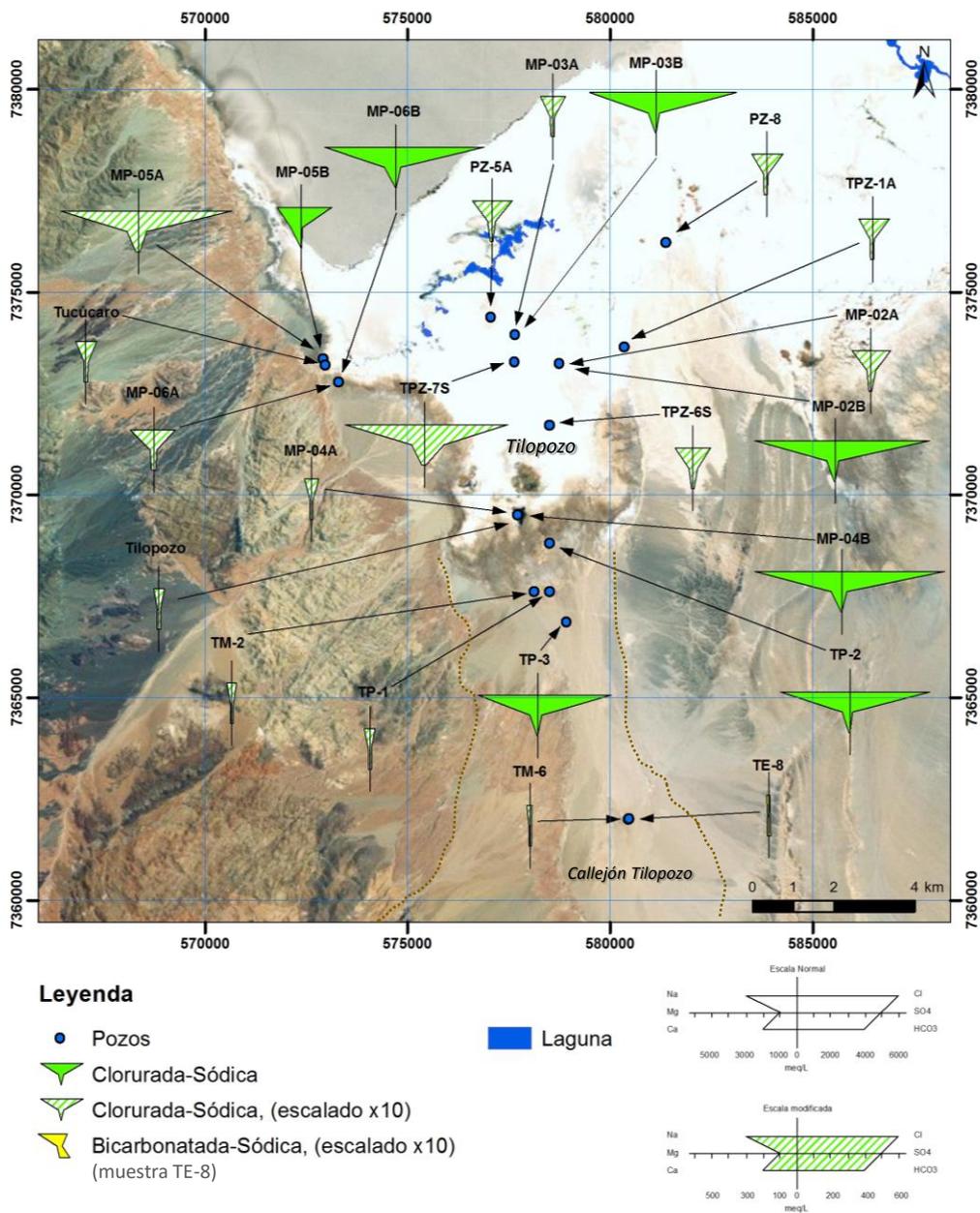


**Figura 7-36 Diagrama de Piper de los puntos monitoreados en el sector Tilomonte**



La distribución espacial de estas muestras se aprecia en la Figura 7-37. En esta, se representa mediante diagramas de Stiff la distribución espacial de la composición química de los puntos monitoreados entre 2013-2014. Los diagramas reflejan los iones mayoritarios predominantes de los piezómetros instalados en los depósitos aluviales del sector Borde Tilopozo, entre Tucúcaro y Callejón Tilopozo, y los puntos agua abajo de la Zona Marginal en el sector de Tilopozo.

**Figura 7-37 Diagramas de Stiff Sector Tilopozo y Borde Tilopozo**

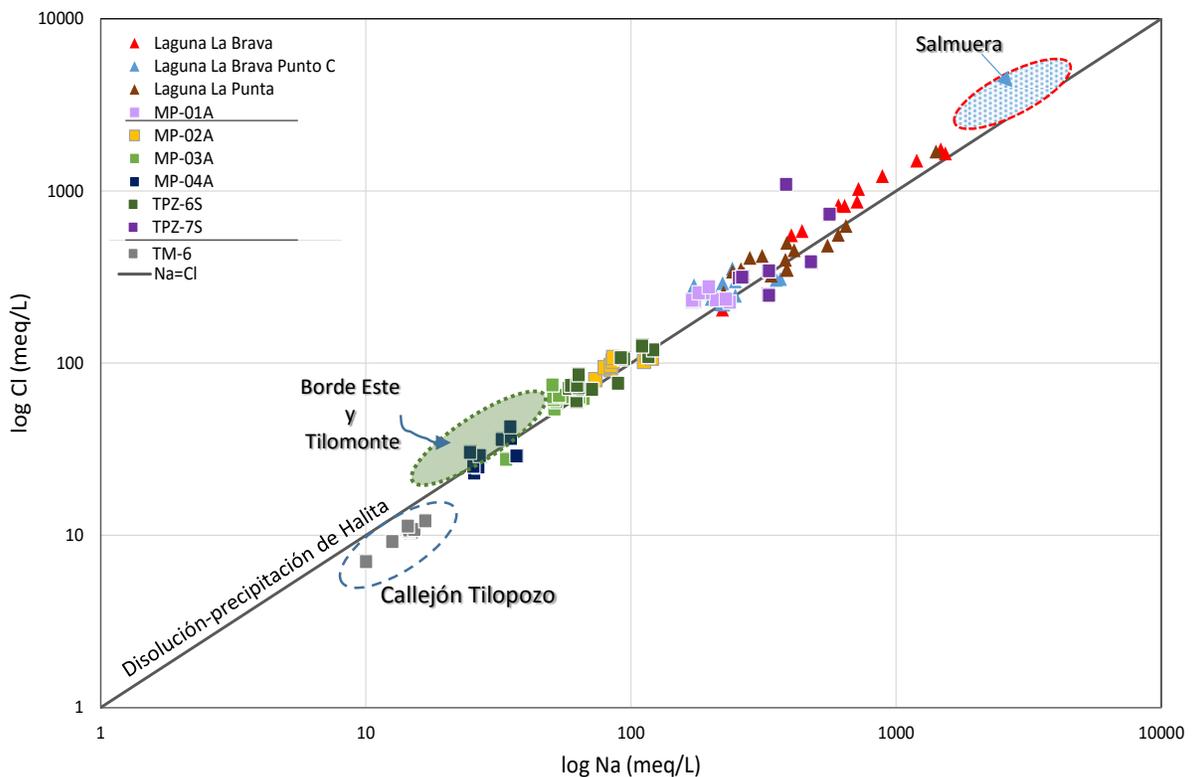


Fuente: Elaboración propia

En la Figura 7-38, se representa la relación sodio:cloruro (Na-Cl) de las muestras de las lagunas La Punta y La Brava (triángulos) y las aguas de los piezómetros someros (MP-XA) y calicatas (TPZ) de los sectores Callejón Tilopozo (Borde Tilopozo), Tilopozo y del sector La Punta-La Brava (cuadrados). De la gráfica, se puede apreciar que la mayoría de las muestras se alinean a lo largo de la recta de equimolaridad. Las muestras que se ubican sobre la recta indican que el origen de cloruro y sodio tendría relación con procesos de disolución/precipitación de sales cloruradas sódicas como la Halita. Los puntos que se ubican por sobre la recta, sugieren aportes de otras fuentes minerales.

En esta Figura 7-38, sobresalen además las muestras del pozo TM-06, correspondiente a las aguas más diluidas del sector. Estas se ubican por debajo de la recta de equimolaridad, con predominio de sodio en relación al cloruro. El principal aporte de sodio en las zonas más altas de la cuenca tendría relación con la geología volcánica del sector, asociada a la alteración de plagioclasas sódicas y calco-sódicas. Como referencia, se señala el campo de la salmuera, la que se ubica el extremo opuesto del gráfico, cuya relación rNa/Cl promedio es de 0,8.

**Figura 7-38 Concentración Na vs Cl sectores La Punta-La Brava y Tilopozo**

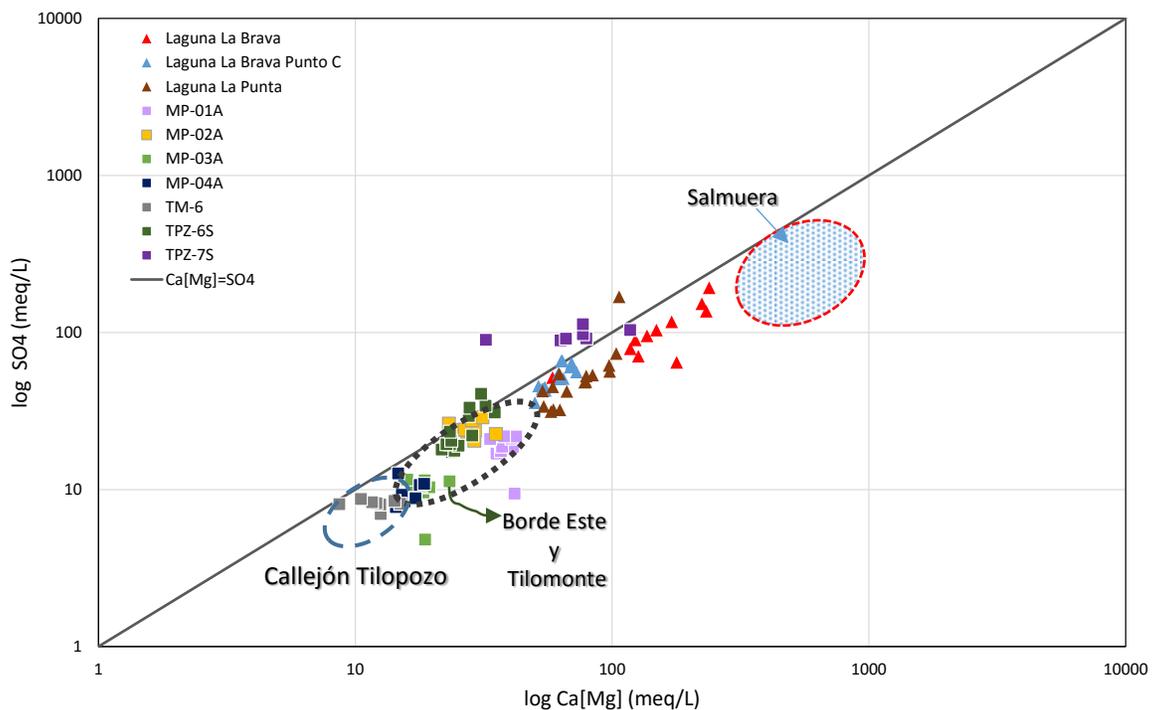


Fuente: Elaboración propia

En la Figura 7-39 se representa, en función logarítmica, la relación Sulfato y Calcio+Magnesio (en meq/L) de las aguas de las lagunas La Punta y La Brava (triángulos) y las aguas de los piezómetros someros (MP-XA) y calicatas (TPZ) de los sectores Callejón Tilopozo (Borde Tilopozo), Tilopozo y del sector La Punta-La Brava (cuadrados). La recta representa la relación equimolar 1:1 entre Ca(Mg) y SO<sub>4</sub>, la cual permite evaluar procesos de disolución/precipitación de minerales sulfatados-cálcicos a magnésicos.

En esta Figura 7-39, se puede apreciar que la mayoría de las muestras se alinean por debajo de la recta de equimolaridad Ca(Mg):SO<sub>4</sub>, o de disolución/precipitación de carbonato cálcico. Esto indica un predominio de Calcio y/o Magnesio en relación al contenido en cloruro, lo cual implica que si bien el proceso de disolución de yeso/anhidrita contribuiría a la presencia de calcio-magnesio en el sector, éste no sería el dominante. Otras fuentes de calcio al sistema hídrico, pueden estar relacionadas a la disolución de otros minerales como sulfatos (yeso) y boratos (ulexita).

**Figura 7-39 Concentración Ca+Mg vs SO<sub>4</sub> sectores La Punta-La Brava y Tilopozo**



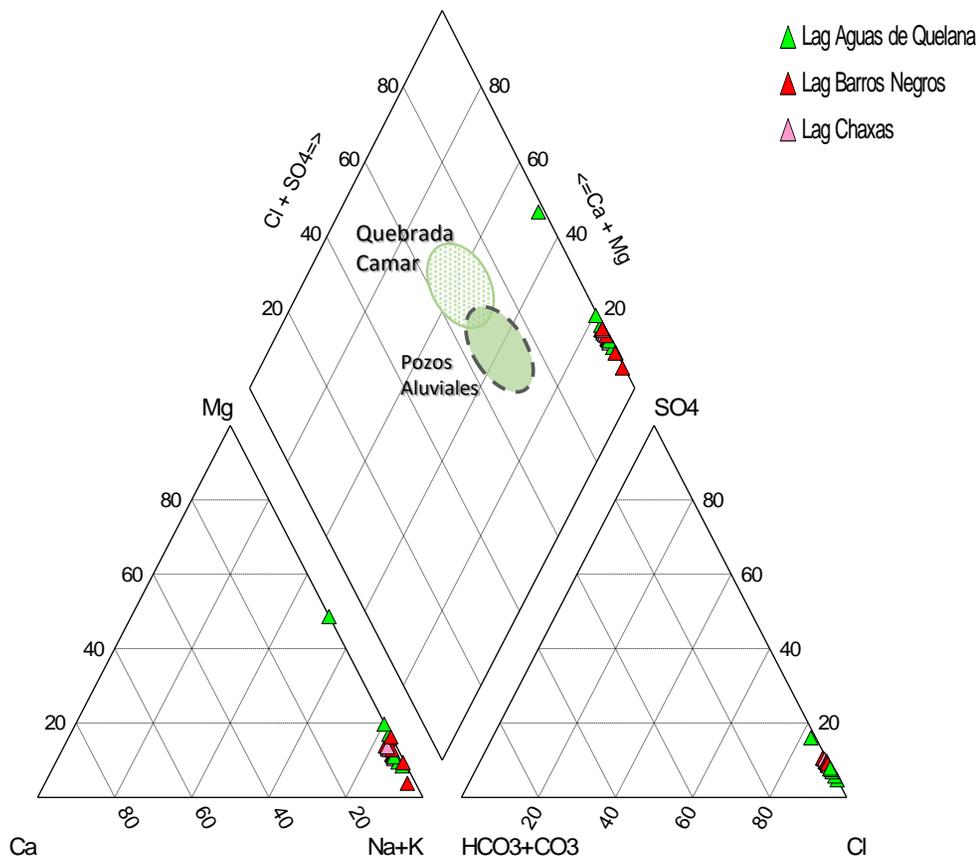
Fuente: Elaboración propia

#### 7.6.4.5 Sector lagunar del Norte

En el sector nororiental de la cuenca, en la Zona Marginal, se desarrollan las lagunas de Chaxa y Barros Negros (Sistema Soncor), y la laguna Aguas de Quelana. Un análisis en conjunto de las muestras indica que las aguas superficiales son principalmente clorurada-sódica (Figura 7-40), seguido de con concentraciones promedio significativas de calcio, sulfato y bicarbonato.

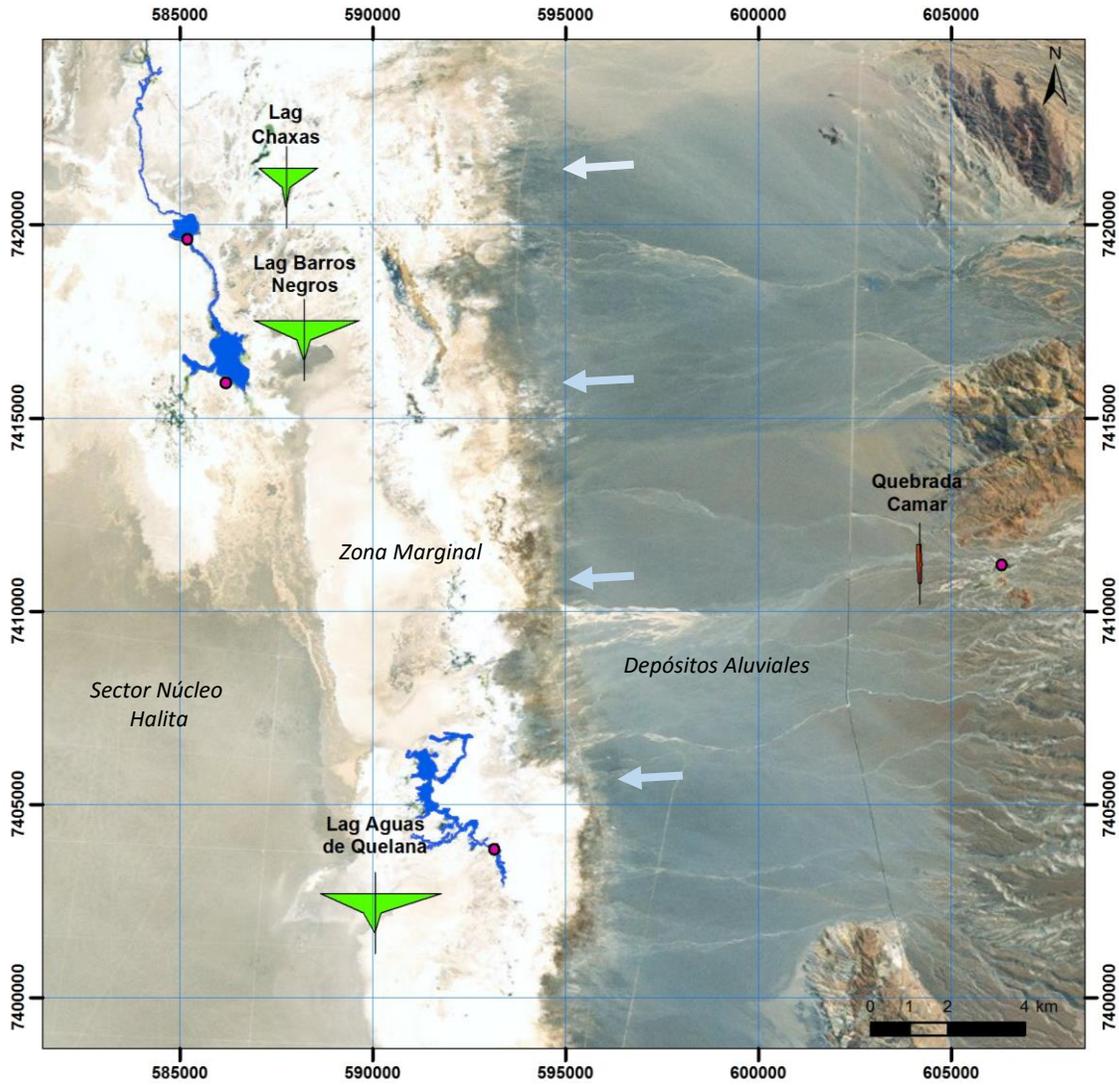
De acuerdo a la superficie freática (Figura 8.48), los flujos subterráneos se mueven desde el Este hacia el Núcleo del Salar, cuyas aguas de aporte a las lagunas están más enriquecidas en sulfato y sodio, como las caracterizadas en Quebrada Camar.

**Figura 7-40 Diagrama de Piper de los puntos monitoreados en el sector Norte**



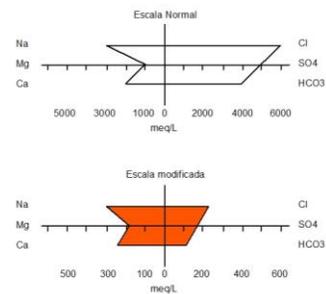
Nota: La fuente de los Pozos en Depósitos Aluviales es de Fock (2009).

**Figura 7-41 Diagramas de Stiff sector Norte. Sistema Soncor y Aguas de Quelana**



**Leyenda**

- Pozos
- Laguna
- ▼ Clorurada - Sódica
- ▶ Sulfatada - Sódica (escalada x10)
- ← Flujos subterráneos



	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

### 7.6.5 Discusión

Del estudio de la caracterización físico-química y de la distribución de sus concentraciones, se ha podido identificar un acuífero, cuyos flujos subterráneos varían desde agua dulce a salobre, desde el Borde Este hacia la Zona Marginal, donde se desarrolla la costra de sulfato-cloruro.

La composición química de las aguas dulces, con valores de conductividad en torno a 2500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , tiende a ser sulfatada y/o clorurada cálcica, aunque es posible reconocer aguas bicarbonatadas-sódicas en el sector de Callejón de Tilopozo, al sur del Sector de Tilopozo. Estas últimas se distinguen además por bajos contenidos de cloruro, de 151 mg/L, en comparación con aguas del Borde Este, cuyas concentraciones más bajas han sido de 205 mg/L y 979 mg/L en Quebrada Camar y Vertiente Peine, respectivamente.

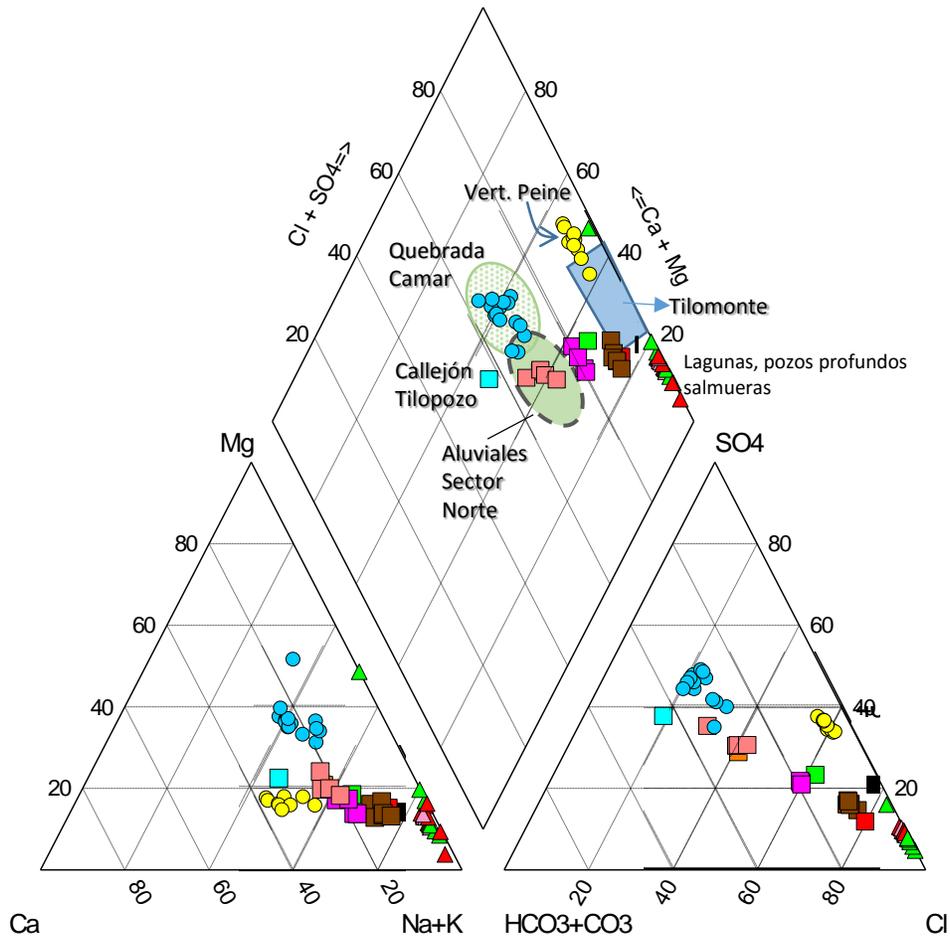
Junto con el aumento en el contenido de iones disueltos hacia el sector del Núcleo, a excepción del bicarbonato y calcio, las concentraciones de cloruro y sodio tienden a ser dominantes en los pozos de la Zona Marginal. Esto se refleja, en el incremento de la relación  $\text{rCl}/\text{HCO}_3$  en dirección al sector del Núcleo, lo que también fue observado en el sector Norte de la Cuenca (Fock, 2009), en el área de las lagunas del Sistema Soncor y Aguas de Quelana. Un incremento en la relación puede estar asociado a (i) procesos de disolución de sales cloruradas, tales como halita ( $\text{NaCl}$ ), silvita ( $\text{KCl}$ ), comúnmente presentes en los Salares del norte de Chile (McCartney, 2001) ii) precipitación de carbonatos (como calcita,  $\text{CaCO}_3$ ). Estos flujos subterráneos, varían en conductividad, incrementando desde 5.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  a 30.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , hacia el margen de las lagunas. Junto con esto, también se observa una disminución progresiva del espesor de la columna de agua salobre.

En la Zona Marginal, las aguas de los piezómetros habilitados en profundidad, si bien son de composición clorurado-sódicas, similar a los flujos más someros, las muestras son mucho más mineralizadas, 6 veces en magnitud a la de las aguas salobres. Las aguas más salinas superan en la mayoría de los casos, valores de conductividad de 200.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , por lo que en profundidad existiría una zona de interfase salina, entre el agua salobre y estas aguas hipersalinas, que de acuerdo a los rangos de conductividad se ajusta bien al de una salmuera. Esto es de interés, ya que los perfiles de conductividad, mostraron además, que a medida que los piezómetros se alejan del sector del Núcleo, la zona de interfase salina, también se profundiza. La interacción entre los dos tipos de aguas, salina (salobre) y salmuera, se desarrolla de forma similar a la de un acuífero costero, donde la relación entre ambos tipos de agua, está dada por un contraste de densidades (Salas *et al.*, 2010).

Por otra parte, en el sector de La Punta-La Brava y Peine, las lagunas alcanzan valores de hasta 140.0000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , en los meses estivales. En comparación, las lagunas del sector Norte, son mucho más mineralizadas, de hecho eventualmente las aguas superficiales alcanzan valores de una salmuera. Esto es un efecto estacional, asociado a los meses estivales, y que sólo se refleja en Aguas de Quelana y Barros Negros. Mientras que las aguas de la Laguna Chaxa, no superan los 190.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

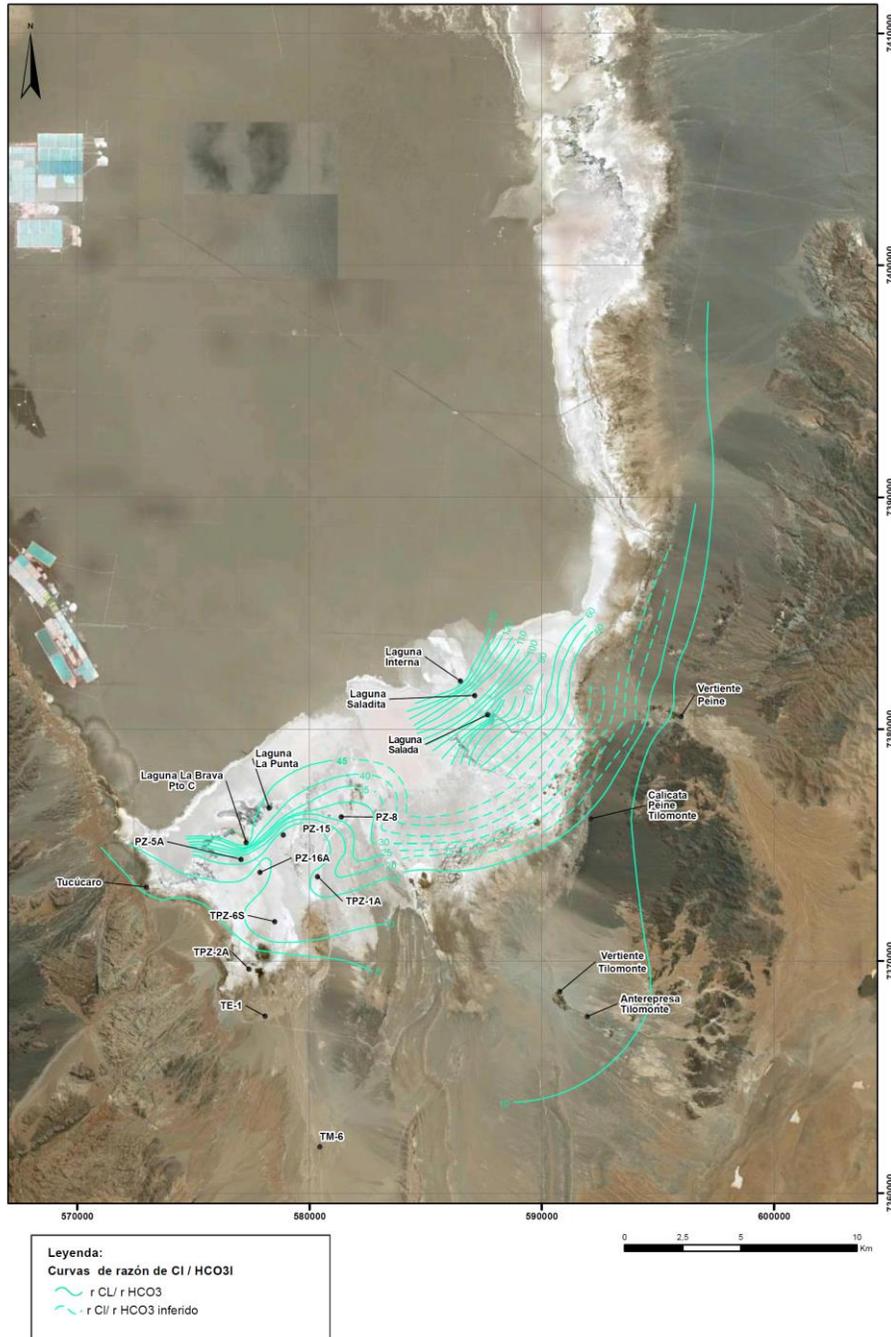
En general, las lagunas de la Zona Marginal serían alimentadas por flujos subterráneos salobres, determinado por la topografía del sector, la cual influiría para que el agua salina proveniente del acuífero del Borde Este ascienda hasta llegar a aflorar e inundar amplios sectores de la zona marginal del Salar (Salas *et al.*, 2010), proceso que también se evidenciaría en los sectores de la Punta-La Brava y Peine.

**Figura 7-42 Diagrama Piper compilado de los puntos monitoreados**



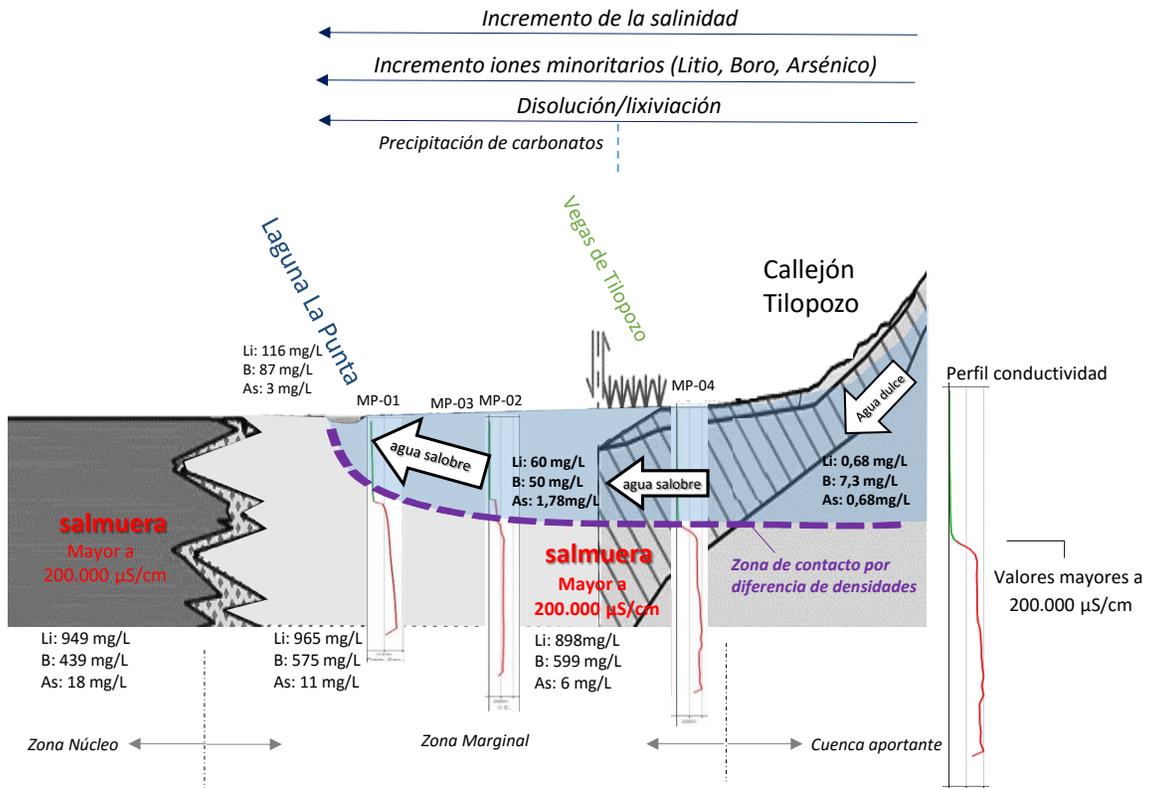
Fuente: Elaboración propia

**Figura 7-43 Mapa de isolíneas de la relación  $r_{Cl}/HCO_3$**



Fuente: Elaboración propia

**Figura 7-44 Perfil esquemático hidroquímico**



Fuente: Elaboraci3n propia

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

## 7.7 Caracterización isotópica de las aguas y la salmuera

En esta sección se presentan la caracterización isotópica de las aguas de las lagunas, cauces, aguas subterráneas y salmueras monitoreadas en el área del Proyecto. En el Apéndice F. Análisis físico-químico e isotópico del agua, se presentan en tablas, junto los datos químicos, los resultados por campaña de las composiciones isotópicas de las aguas ( $\delta D$ ,  $\delta^{18}O$ ) muestreadas en 2013 y 2014.

La relevancia que tienen los análisis isotópicos de oxígeno-18 y deuterio es que permiten conocer el origen, la ubicación de las fuentes de recarga y las condiciones climáticas, o los procesos que han modificado la composición del agua desde que ésta se recargó, es decir las reacciones agua-roca, la mezcla de distintas aguas y la precipitación-disolución (Custodio y Llamas, 2001).

Los datos isotópicos de oxígeno-18 y deuterio son referidos al estándar promedio de agua de mar, que en inglés se traduce como “Viena Standard Mean Water Ocean” (V-SMOW) y cuyo valor de  $\delta^{18}O$  y  $\delta D$  (ó  $\delta^2H$ ) es igual a 0‰.

Los contenidos isotópicos son comparados con la recta meteórica mundial ( $\delta^2H = 8 \cdot \delta^{18}O + 10$ ), la cual representa el contenido isotópico promedio de la lluvia y nieve a escala global. Los datos también son analizados según la recta meteórica sin exceso de deuterio ( $d = 8 \cdot \delta^{18}O - \delta^2H$ ), que representaría la composición máxima que adquieren las aguas subterráneas en zonas áridas, la cual se alcanza antes de recargar el acuífero, según sean los efectos de evaporación en la zona no saturada (Aravena, 1995).

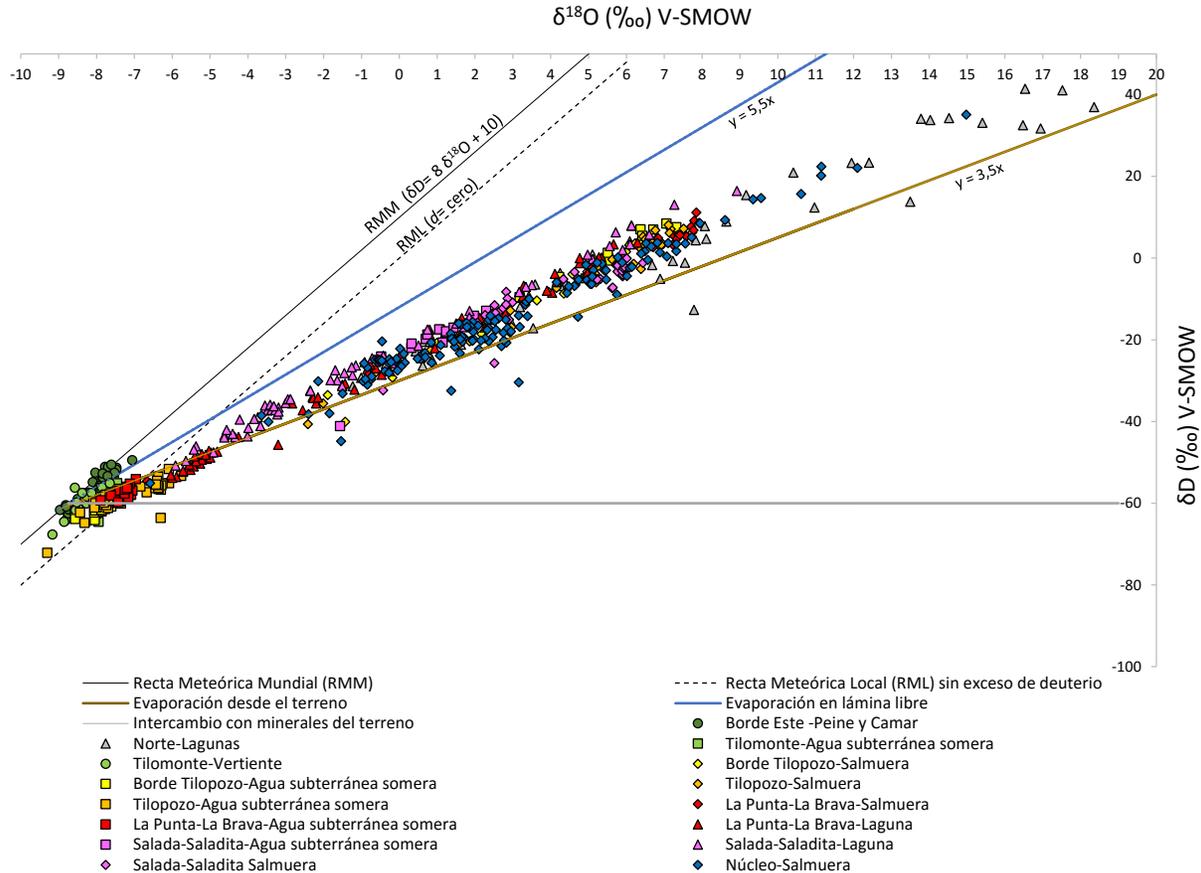
Otras rectas, que se utilizan como referencia en este estudio, sirven para mostrar la variación de la composición isotópica relacionado a (i) procesos de evaporación, en lámina libre y desde el terreno, y por (ii) intercambio del oxígeno con los minerales del terreno (a altas temperatura), que es el caso de las aguas geotermales.

### 7.7.1 Resultados

En la Figura 7-45 se representan todos los resultados de las composiciones isotópicas de los sectores que fueron monitoreados en el marco de este Proyecto.

Al igual que en los análisis presentados anteriormente, las muestras se han agrupado por sectores, las que se encuentran en distinto color. Mientras que los tipos de agua se diferencian con símbolos según sean lagunas (triángulo), salmueras (rombo), aguas subterráneas dulces a salobres (cuadrado), vertientes y escurrimientos superficiales (círculo).

**Figura 7-45 Composición isotópica  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta\text{D}$  de las aguas monitoreadas en Salar**



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 7-45, se observa que todas las muestras se agrupan por debajo de la recta meteórica mundial (RMM). Sin embargo, es posible distinguir, a grandes rasgos, dos grupos que se describen a continuación:

i) *Grupo de aguas alineadas a la recta meteórica*

- Las aguas del Borde Este, (*círculo verde oscuro*) representadas por las muestras de Quebrada Camar y vertiente Peine, se observan bien agrupadas y distribuidas justo por debajo de la recta meteórica mundial, con valores entre  $-50\text{‰}$  y  $-60\text{‰}$  en  $^2\text{H}\delta$  y entre  $-7\text{‰}$  y  $-8,5\text{‰}$  en  $\delta^{18}\text{O}$ .
- Las aguas del sector de Tilomonte, (*círculo verde claro*) representadas por muestras de pozo y vertientes, se caracterizan por agruparse entre la recta meteórica mundial y la recta meteórica sin exceso de deuterio. Esto indica que las precipitaciones que recargaron el acuífero, fueron afectadas ligeramente por evaporación en el subsuelo, durante la percolación por la zona no saturada. Este proceso sería más efectivo en periodos con menor intensidad de recarga (Mook, 2000).

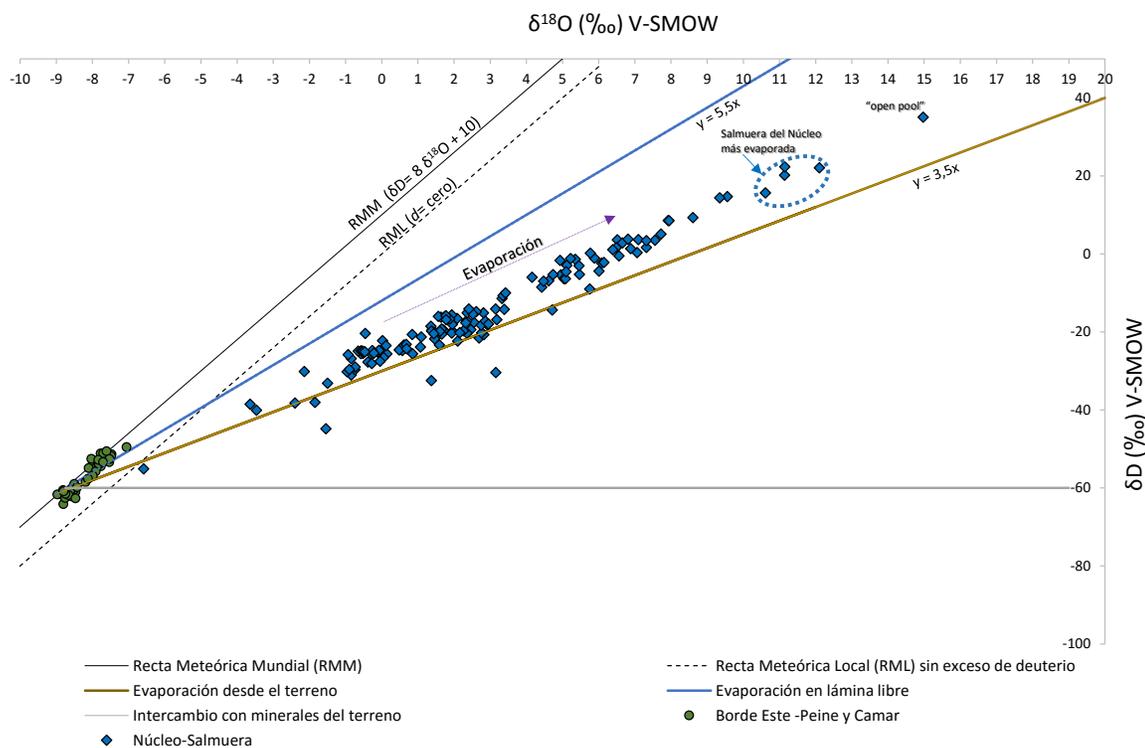
ii) Grupo de aguas con tendencia a la recta de evaporación

- Las salmueras del Núcleo (rombos azules), presentan composiciones entre  $-40$  y  $+20\text{‰}$  en  $\delta D$  y entre  $-3.5$  y  $+12\text{‰}$  de  $\delta^{18}O$ , excepcionalmente de hasta  $+15\text{‰}$  en  $\delta^{18}O$  (Figura 7-45), pero que tiene relación con muestras superficiales, denominadas “open pool” que aparecen eventualmente, en los meses de invierno, en el borde del Núcleo del Salár.

Los contenidos más enriquecidos en  $\delta D$  y  $\delta^{18}O$  se encontraron el pozo P-05, que es el pozo más profundo (100 metros) de la red de monitoreo y cercano al borde con la Zona Marginal Sur. Las muestras menos enriquecidas se identificaron hacia el interior del Núcleo y a menor profundidad, entre 30 y 60 m. Esto sugiere que la composición isotópica se enriquecería en profundidad, como resultado del proceso de evaporación. Esto es coherente con el tipo de depósito, ya que la evaporación es un proceso, por lo que no se tendrá una muestra de salmuera con una composición química e isotópica final, sino más bien, una distribución de sus contenidos según sea la fase de evaporación.

Por otra parte, estudios inéditos (Munk and Hynek, 2012) con clorofluocarbonos (gases atmosféricos de origen antrópico) han sido utilizados como trazadores para determinar la edad de la recarga de las aguas subterráneas. Este estudio señala que la salmuera presenta concentraciones muy bajas en este compuesto, lo cual implica que la salmuera no presenta aporte de aguas recientes.

**Figura 7-46 Composición isotópica  $\delta^{18}O$  y  $\delta D$  de la salmuera del Núcleo**



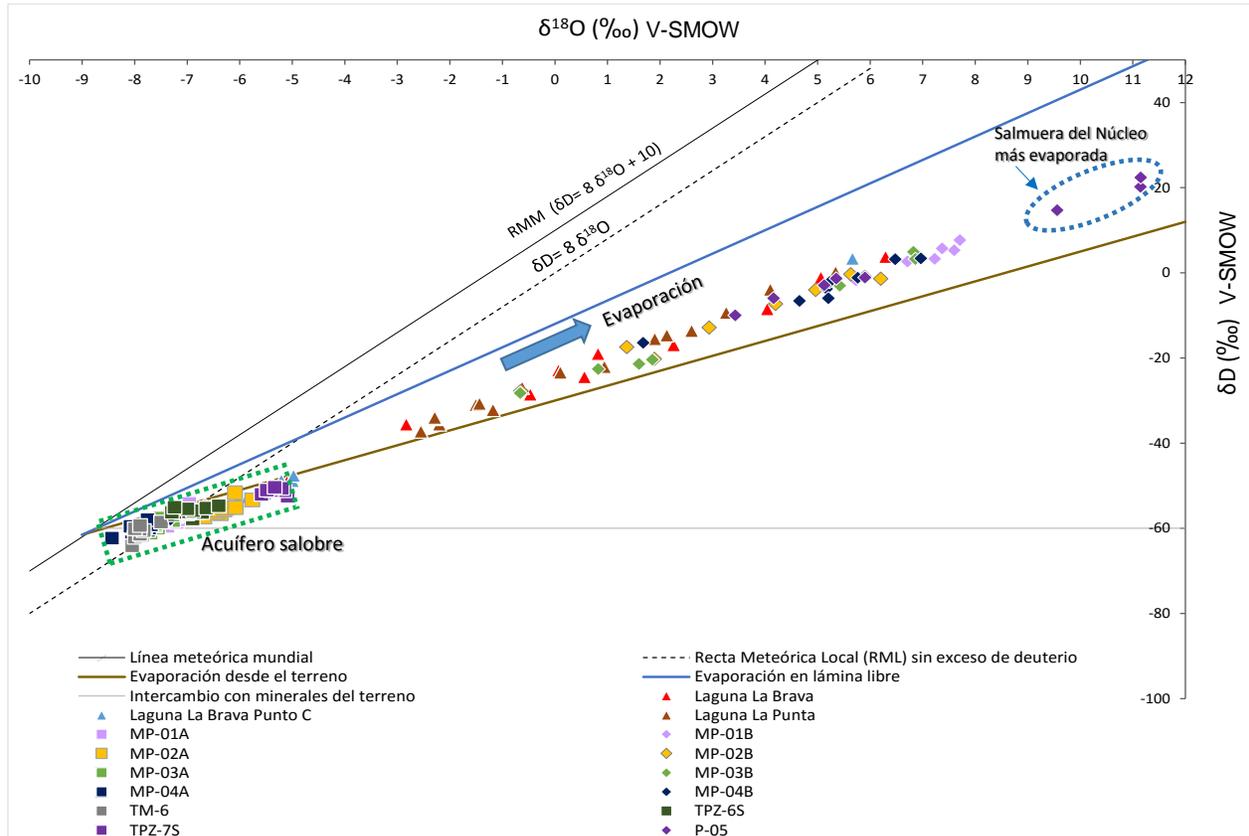
Fuente: Elaboración propia

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

- En el sector Borde Tilopozo (amarillo), también es posible distinguir dos grupos de muestras, correspondientes a los piezómetros someros y los más profundos (Figura 7-45).
  - Respecto a los *piezómetros someros*, las aguas reflejan una recarga local, dentro de las cuales destaca la muestra más diluida, de carácter dulce, determinada en el sector de Callejón Tilopozo. Esta corresponde a la muestra del pozo TE-8, con concentraciones en cloruro de 151 mg/L y contenido isotópico de  $-7,8\text{‰}$   $\delta^{18}\text{O}$  y  $-61,4\text{‰}$   $\delta\text{D}$ . Estudios inéditos con clorofluocarbonos en este sector (Munk and Hynek, 2012) señalan que estas aguas han sido recargadas en los últimos 50 años.

Otras muestras del Borde Tilopozo, cerca del contacto con la Zona Marginal, y que tienden a ser más mineralizadas y de carácter salobre, presentan enriquecimiento en  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta\text{D}$  producto de que las aguas de recarga fueron afectadas por evaporación durante su tránsito en la zona no saturada.
- Los piezómetros profundos, se distribuyen hacia el extremo derecho de la gráfica, y sugieren que la composición isotópica presenta un fuerte fraccionamiento isotópico producto de procesos de evaporación, muy similar a la de una salmuera de Núcleo.
- En el sector Tilopozo es posible distinguir dos grupos de muestras, los piezómetros someros y los profundos (Figura 7-47).
  - Los piezómetros someros se alinean según la recta de pendiente 3,4; que indica fraccionamiento isotópico por procesos de evaporación en el terreno, particularmente en el caso del agua subterránea que se encuentre cerca de la superficie. Por otra parte, el fraccionamiento isotópico se puede deber en algún grado a mezcla con aguas más salinas.
  - Los piezómetros profundos, se distribuyen hacia el extremo derecho de la gráfica, y sugieren que la composición isotópica presenta un fuerte fraccionamiento isotópico producto de procesos de evaporación, muy similar a la de una salmuera de Núcleo.

**Figura 7-47 Resultados Análisis Deuterio vs Oxígeno-18, sector La Punta-La Brava y Tilopozo  
(Febrero 2013- Diciembre 2014)**



Fuente: Elaboración propia

- En el sector de las Lagunas La Punta y La Brava se deben distinguir dos tipos de aguas, las aguas superficiales de las lagunas y las muestras de los piezómetros.

En la Figura 7-47, la composición isotópica de las lagunas se distribuye ampliamente dentro del área de las rectas de evaporación. La composición isotópica más alta generada por el efecto de evaporación en superficie se encuentra en torno a +5‰ en  $\delta^2\text{H}$  y +6,5‰ en  $\delta^{18}\text{O}$ .

También cabe destacar que las lagunas La Brava y La Punta, presentan una diferencia isotópica notable dentro de un mismo período. En el caso de La Brava Punto C, los contenidos isotópicos son más ligeros que los analizados en la laguna La Punta. Esto implicaría que las aguas superficiales del extremo norte de este sistema lagunar contiene aguas que han estado más expuestas a la evaporación superficial, lo cual significa que este sistema corresponde a una mezcla entre los aportes de flujos subterráneas y el agua más evaporada que es almacenada en el sistema lagunar (Munk and Hynek, 2012).

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

Las muestras de agua del pozo somero y profundo registran valores más acotados. Las aguas subterráneas someras presentan contenidos entre -50‰ y -60‰ en  $\delta^2\text{H}$  y entre -6‰ y -7‰ en  $\delta^{18}\text{O}$ ; mientras las aguas más profundas varían entre -10‰ y 0‰ en  $\delta^2\text{H}$  y entre +6‰ y +8‰ en  $\delta^{18}\text{O}$ . Estas últimas incluso tienen una composición isotópica más enriquecida que las muestras de las lagunas La Punta y La Brava.

Las aguas de los pozos más profundos además de presentar contenidos isotópicos más enriquecidos en oxígeno y deuterio, también presentan valores de conductividad más alta, mayor a 200.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , lo cual es consistente con las características de la salmuera, anteriormente descrita en el sector del Núcleo.

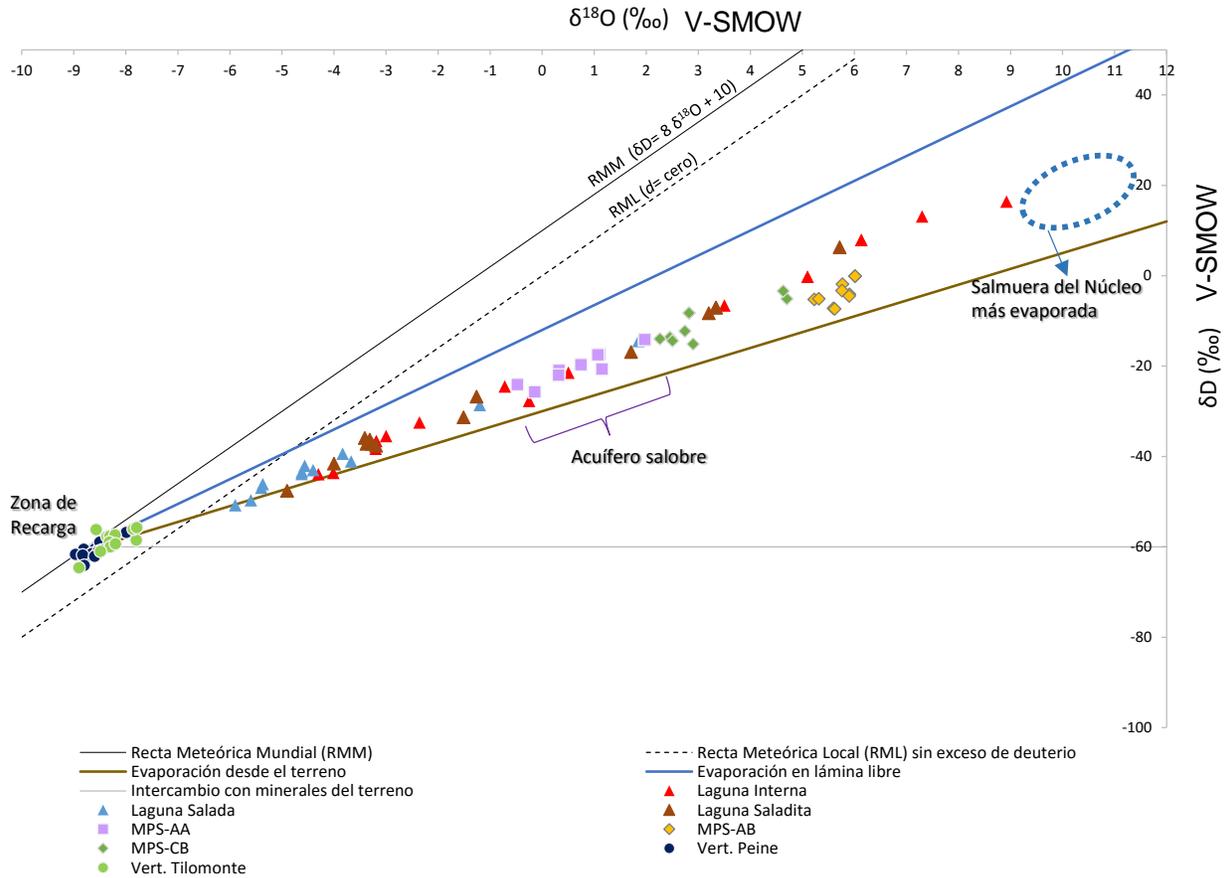
- En el sector de las lagunas Salada, Saladita e Interna (Sistema Peine), Figura 7-48, se aprecian dos tipos de aguas: las aguas superficiales de las lagunas y las muestras de los piezómetros someros (*cuadrados*) y profundos (*rombos*).

La composición isotópica de las lagunas (Figura 7-48) se distribuye ampliamente dentro del área de las rectas de evaporación. Las aguas presentan un enriquecimiento isotópico gradual, desde la Laguna Salada, Laguna Saladita, hacia la Laguna Interna.

Las muestras más salinas, correspondientes a la de la Laguna Interna, las que se aproximan a contenidos isotópicos de salmuera más evaporada del sector del Núcleo. Esto sugiere que las aguas superficiales, según sea su permanencia en el embalse lagunar, presentarán un enriquecimiento isotópico que quedará registrado en la medida que las aguas sean expuestas a la evaporación.

Por otra parte, las muestras de agua de los pozos somero y profundo registran valores más acotados. Las aguas subterráneas someras presentan contenidos entre -30‰ y -20‰ en  $\delta^2\text{H}$  y entre -1‰ y +2‰ en  $\delta^{18}\text{O}$ ; mientras las aguas más profundas entre -10‰ y 0‰ en  $\delta^2\text{H}$  y entre +5‰ y +6‰ en  $\delta^{18}\text{O}$ . En este caso, se registraron muestras de lagunas, incluso, con contenidos isotópicos más enriquecidos que las aguas del acuífero.

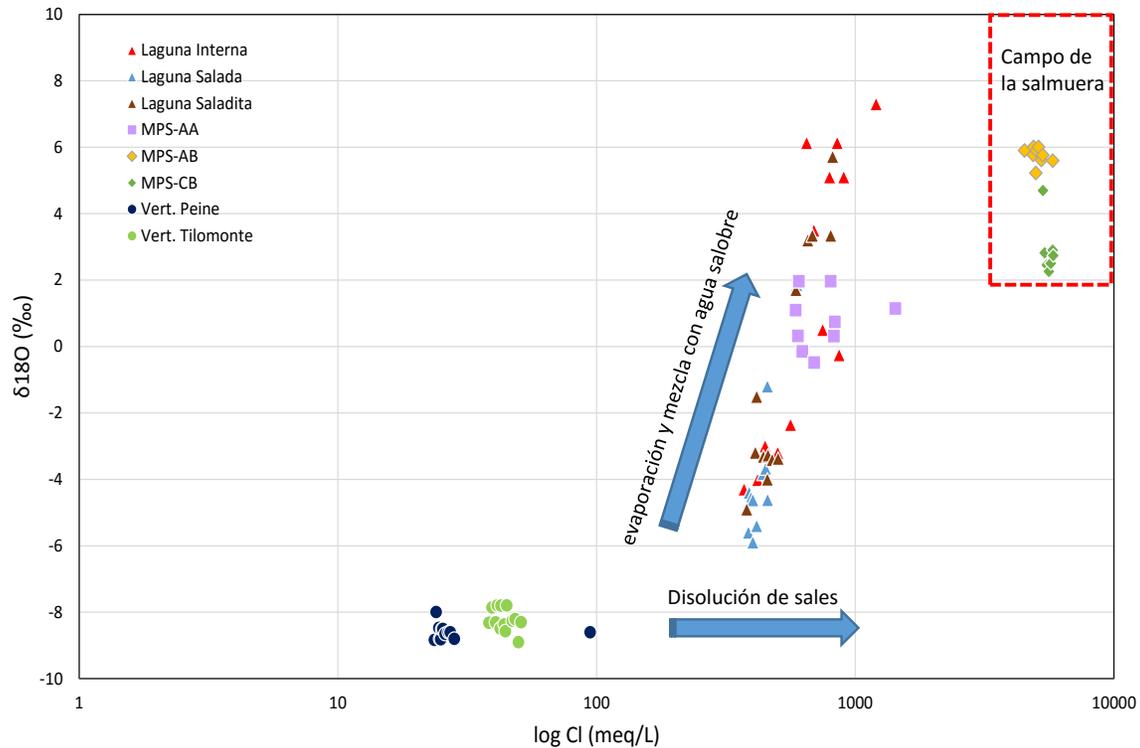
**Figura 7-48 Gráfico Deuterio vs Oxígeno-18, sector Peine**



Fuente: Elaboración propia

La Figura 7-49, relaciona el contenido isotópico de oxígeno-18 y la salinidad (en escala logarítmica). Esta sirve como complemento para exponer, como las lagunas y las aguas del acuífero (salobre) se distribuyen en una misma línea de tendencia. En esta figura, se observa que las lagunas y las aguas del pozo somero se correlacionan entre sí. Esto sugiere que existe una relación entre estas aguas, a través de procesos de mezcla; no así, con las salmueras identificadas en los piezómetros más profundos.

**Figura 7-49 Diagrama Oxígeno-18 vs Cloruros Sector Peine**

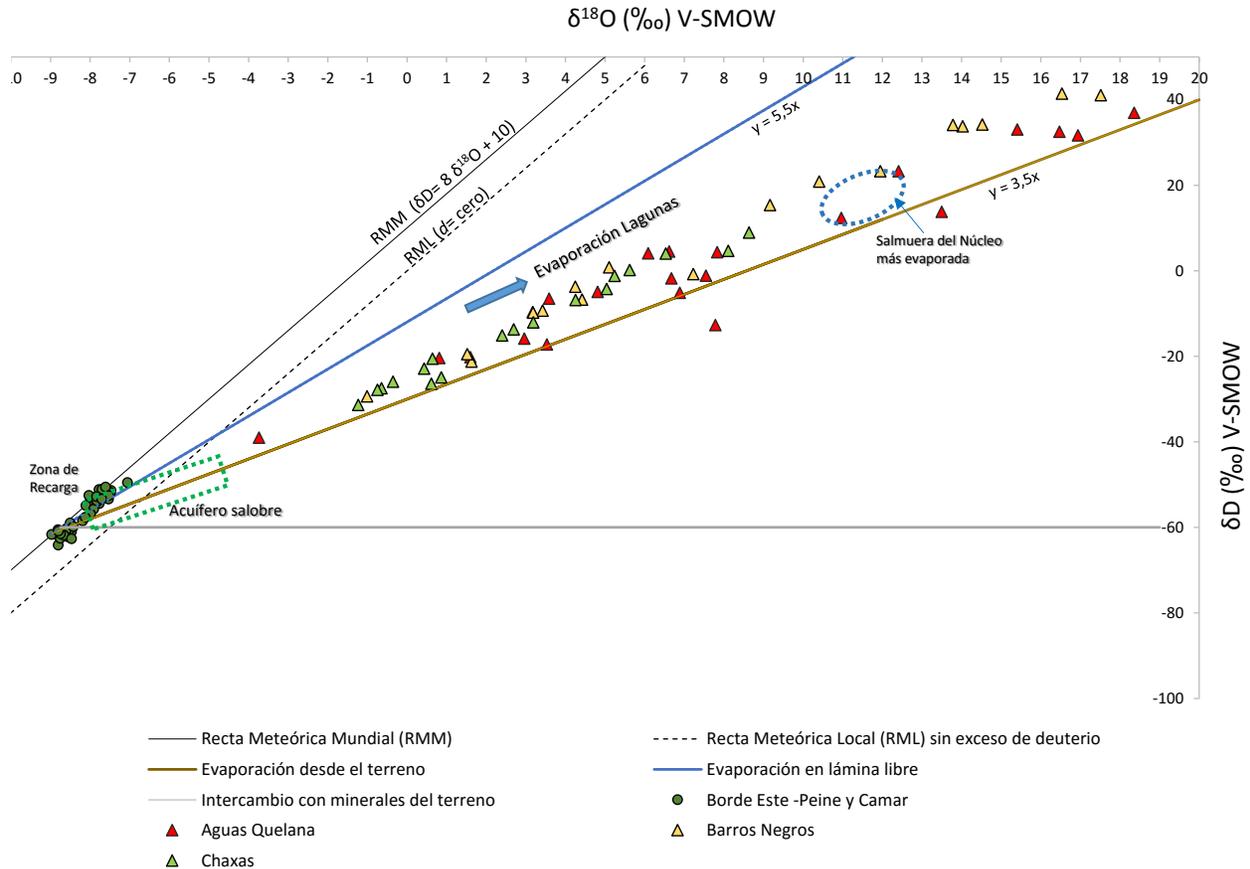


Fuente: Elaboración propia

Cabe mencionar, que el fraccionamiento isotópico se ve afectado por procesos de evaporación y mezcla, no así por procesos de disolución, como se ve en la Figura 7-49, donde las aguas más diluidas del Borde Este y Tilomonte, incrementan su salinidad, sin enriquecimiento de oxígeno-18.

- En el sector Norte, el estudio isotópico se realizó en el sector de las lagunas del sistema Soncor (Chaxa y Barros Negros) y laguna Aguas de Quelana. En la Figura 7-50, se presenta la composición de  $\delta^2\text{H}$  y  $\delta^{18}\text{O}$  de las mismas. La composición isotópica puede variar entre  $-30\text{‰}$  y  $+20\text{‰}$  en  $\delta^2\text{H}$  y entre  $-4\text{‰}$  y  $+12\text{‰}$  en  $\delta^{18}\text{O}$ .

**Figura 7-50 Resultados Análisis Isótopos de Deuterio y Oxígeno-18 Lagunas Sector Norte**



Fuente: Elaboración propia

Los valores de  $\delta^{18}\text{O}$  más ligeros, alrededor de  $-4\text{‰}$ , sugieren que son aguas superficiales poco evaporadas, aunque los valores de conductividad son mayores a  $150.000 \mu\text{S}/\text{cm}$ . A medida que las aguas se evaporan, se observa un enriquecimiento tanto en  $\delta^{18}\text{O}$  como en  $\delta\text{D}$ . Las aguas de la laguna Barros Negros tienden a ser las más evaporadas y más mineralizadas. De hecho, los valores de conductividad ascienden por sobre  $200.000 \mu\text{S}/\text{cm}$ , cuando su composición isotópica en  $\delta^{18}\text{O}$  registra valores en torno a  $+10\text{‰}$ ; incluso hasta  $+12\text{‰}$ , siendo más enriquecido que otras muestras de salmuera del sector del Núcleo.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

## 7.8 Conclusiones

El estudio isotópico y químico de las aguas subterráneas y superficiales, en conjunto con la geología del sector, ha permitido entender mejor la evolución química de las aguas y la relación entre los sistemas lagunares, el acuífero y la salmuera en la cuenca del Salar de Atacama, que contribuyen con información para sustentar el Modelo Hidrogeológico Conceptual en este sector. En la Figura 7-51 se presenta un resumen esquemático del funcionamiento conceptual del acuífero en un contexto hidroquímico e isotópico.

En el área de interés, las aguas de recarga al acuífero varían en composición química según sea el área de captación. En áreas próximas a centros volcánicos activos, en el Norte del Salar, como es la cuenca de la Quebrada Camar, las aguas subterráneas tienden a ser sulfatadas-sódicas. Mientras, las aguas infiltradas en los depósitos aluviales del sector Este y Sur tienden a ser cloruradas-sódicas, y particularmente bicarbonatadas-sódicas en algunas zonas como lo es el Callejón de Tilopozo. En general estas aguas se caracterizan por bajas concentraciones en cloruro, entre 150 mg/L y 1000 mg/L, valores de conductividad inferiores a 4500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , y contenidos isotópicos en torno a  $-8\text{‰}$   $\delta^{18}\text{O}$  y  $-61\text{‰}$   $\delta\text{D}$  que demuestran que las aguas subterráneas tienen un origen meteórico, con escasa a nula evaporación en terreno antes de recargar el acuífero.

A medida que los flujos subterráneos alcanzan la Zona Marginal del Salar, las aguas evolucionan químicamente y adquieren mayor contenido de sales (i) por la alta tasa de evaporación en la cuenca (Apéndice J), especialmente en los flujos de agua cerca de la superficie, lo que se ve reflejado en contenidos más enriquecidos de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta\text{D}$ , y (ii) por disolución de sales pre-existentes. En conjunto, los procesos generan un aumento notorio en el contenido en cloruro, sodio, y seguido de magnesio y potasio. Los iones minoritarios, tales como litio, boro, arsénico también se ven incrementados, más de 10 veces en magnitud. En la Zona Marginal además se observa precipitación de calcita, lo cual explica la disminución de calcio y bicarbonato en los flujos subterráneos más cercanos al sector del Núcleo. Y en el caso de los sulfatos, su disminución se ve reflejado por la precipitación de yeso, principalmente en el entorno de los sistemas lagunares.

Del análisis químico e isotópico, se puede concluir que en la Zona Marginal Sur, de donde se obtuvo la mayor cantidad de información, las lagunas son alimentadas por flujos de agua subterránea de carácter salobre, las cuales se mezclan con el agua ya almacenada y evaporada en estos sistemas. Es por esto, que en ciertos sectores de las lagunas se analizan concentraciones químicas, valores de conductividad y contenidos isotópicos similares al de las aguas subterráneas. A medida que las aguas superficiales se alejan de la fuente de alimentación, aumenta la concentración de sales, principalmente por evaporación en períodos estivales, alcanzando valores de conductividad inferiores a 150.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

En una sección vertical (Figura 7-51), los perfiles de conductividad medidos entre 2013 y 2014 muestran el desarrollo de una zona de interfase salina, que se mantiene estable a una profundidad determinada, sin mostrar relación con los sucesos superficiales en el área del Proyecto. La zona de interfase salina, dada

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

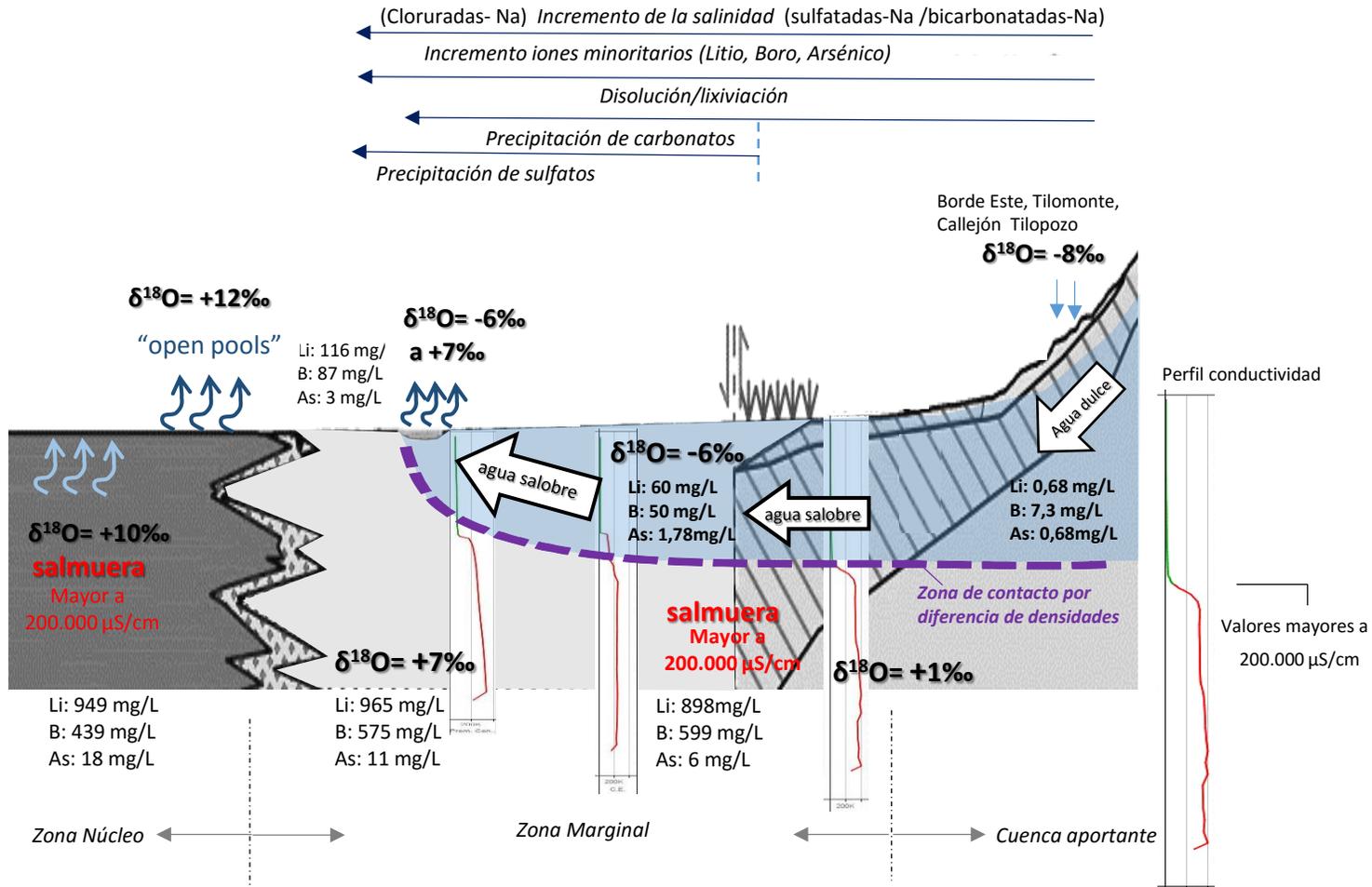
por una fuerte inflexión en los valores de conductividad, refleja la presencia de salmuera, bajo el acuífero salobre.

La salmuera que se caracteriza mejor en la zona del Núcleo es predominante clorurada-sódica, con valores de conductividad superiores a 200.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Las altas tasas de evaporación que afectan la zona del Núcleo se ven expresadas por contenidos isotópicos más enriquecidos, mayores contenidos en iones minoritarios, tales como litio, arsénico y boro, y una mayor concentración de sales al punto de saturación, reflejado por el desarrollo de cristales de halita en este sector.

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. Estudios de contenidos en clorofluocarbono (gases atmosféricos de origen antrópico) en el acuífero y la salmuera (Munk and Hynek, 2012) muestran que las aguas que llegan a la Zona Marginal, desde el Borde Este y Sur son aguas recientes, post 1958, las que no se mezclarían con la salmuera del Núcleo. Esto apoya el modelo conceptual que se presenta en la Figura 7-51.

Para un mayor análisis de las lagunas y las variaciones estacionales, así como caudales de aporte a estos sistemas, se presentan en el Apéndice I Funcionamiento Hidrogeológico de los Sistemas Lagunares: La Punta–La Brava, Peine, Aguas de Quelana y Soncor.

**Figura 7-51 Modelo Conceptual Hidrogeoquímico**



Fuente: Elaboración propia

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

## 8 HIDROGEOLOGÍA

### 8.1 Síntesis de la evolución hidrogeológica del Salar de Atacama

Con el propósito de dar a entender la dinámica y presencia de las distintas unidades que conforman el Salar, se presenta una breve reseña de la evolución hidrogeológica de la Cuenca, basado en la publicación: “*Características Geológicas e Hidrogeológicas del Salar de Atacama*”, (Mardones, 1986).

Los sedimentos clásticos y evaporitas del paleógeno de la Formación San Pedro, que conforman la Cordillera de la Sal, constituyen la evidencia de un Salar paleógeno de condiciones similares al actual Salar de Atacama. Sobreyacen a estos sedimentos en discordancia angular y de erosión, flujos de ignimbritas con intercalaciones clásticas y de cenizas del paleógeno medio a superior, depositados cuando la cuenca había presentado un levantamiento y posterior erosión. Estos flujos volcánicos procedentes del oriente, del sector de la actual Cordillera de Los Andes, en parte cruzaron un relieve positivo que coincidía con la actual Cordillera de Domeyko, sin embargo, en el área del Salar de Atacama, varios sectores continuaban como depresiones inundadas con agua, presumiblemente provenientes de deshielos y con deposición de carbonatos, al igual como ocurría con las calizas de Chiu-Chiu y la cuenca de Calama, de manera tal que las ignimbritas en diferentes sectores se presentan cubiertas y/o mezcladas con material carbonatado. La depresión y sus condiciones climáticas persistieron después de la deposición de las ignimbritas en el neógeno superior-cuaternario inferior.

Posteriormente durante el cuaternario inferior, como consecuencia de la tectónica de bloques que delineó definitivamente la morfología del país, el área del Salar de Atacama se volvió a hundir, provocando el plegamiento y alzamiento relativo de la Cordillera de la Sal, de manera que tanto ignimbritas como los sedimentos lagunares del borde se muestran inclinados hacia el Salar.

Es en esta depresión donde comienza a formarse el actual Salar de Atacama, tal y como lo conocemos hoy en día, y se habría originado a lo menos en tres etapas:

- 1) Formación de una laguna, como consecuencia de los deshielos del Mindel-Riss, en tanto que el periodo interglaciar del Gunz-Mindel, sería el responsable del depósito de los sedimentos calcáreos de la Formación El Tambo. El tiempo necesario para la acumulación de las sales y salmueras del núcleo de menor permeabilidad (considerando la misma composición actual de las aguas y la misma tasa de evaporación actual, que corresponde a un período interglaciar frío como el del Mindel-Riss) sería mínimo, del orden de los 250.000 años. La duración del período interglaciar Mindel-Riss es mayor a los 300.000 años. La recarga producida por la fusión de los hielos se realizó a través de cauces superficiales y aguas subterráneas.
- 2) Formación de un Núcleo central de NaCl; Cuando los glaciares se fundieron, la recarga subterránea con grandes caudales persistió por mucho tiempo, asegurando el abastecimiento de la cuenca hasta que

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

los volúmenes evaporados, que excedían cada vez más la recarga, terminaron por secar las lagunas, dejando un núcleo central de NaCl, de gran espesor saturados con salmueras y rodeado de sulfatos y carbonatos.

- 3) La formación del Núcleo Superior de mayor permeabilidad y de una potencia del orden de los 30 m se habría formado en la última etapa, como consecuencia de los deshielos del período post-Wurn, dejando como resultado las salmueras ahora presentes en el nivel superior del núcleo.

Tanto los depósitos lagunares como las ignimbritas se presentan afectados por fallas y plegamientos relacionados con el último alzamiento de la Cordillera de la Sal y el hundimiento progresivo de la zona del núcleo. El alzamiento posterior, durante el cuaternario inferior de la Cordillera de la Sal y sus pronunciados y locales plegamientos se habrían producido por efecto de las compresiones laterales inducidas en sedimentos plásticos, que conforman la Formación San Pedro. Los descensos de los sedimentos en el graben generarían sedimentos de granulometría gruesa (Formación Tambores) que rodean y engranan con la Formación San Pedro. El hundimiento de la cuenca en este período fue mucho más intenso que en el anterior, de manera que las ignimbritas y calizas en varios sectores marginales al Salar se presentan fuertemente inclinados hacia el Salar, encontrándose las ignimbritas a más de 600 m de profundidad bajo la costra del núcleo.

Durante este período de subsidencia, la cuenca recibió importantes volúmenes de aguas provenientes de los deshielos, recibiendo agua por una parte y evaporando por otra, dejando como resultado una salmuera que se enriquecía progresivamente e importantes cantidades de precipitados. A medida que los hielos se van derritiendo la recarga disminuye, haciendo que los volúmenes evaporados fueran más importantes que los recargados, hasta que la laguna se secó completamente dejando un núcleo central de NaCl, rodeado de precipitados de sulfatos y en menor medida de carbonatos.

Finalmente, una vez que los hielos se derritieron, los aportes superficiales mermaron ostensiblemente, pero la lenta recarga subterránea, en ese entonces abundante, se prolongó por mucho tiempo, hasta agotar los recursos entregados por los deshielos.

## 8.2 Unidades hidrogeológicas y parámetros hidráulicos

Una unidad hidrogeológica es un conjunto de formaciones geológicas adyacentes, que presentan propiedades hidrogeológicas similares y que, dependiendo de la escala y objetivos de trabajo, conviene considerarlas conjuntamente. Así, dentro de la unidad podrá haber uno o varios acuíferos, acuitardos o acuicludos y puede también subdividirse en unidades menores.

En el marco de este trabajo y para el desarrollo del modelo numérico, se definieron distintas unidades hidrogeológicas, que agruparon unidades geológicas con características hidrogeológicas similares, atendiendo a criterios geológicos, como la litología y el grado de consolidación de los materiales, y/o

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

criterios hidrogeológicos, tales como la localización de su área de recarga, parámetros hidráulicos, composición hidroquímica, etc.

### 8.2.1 Definiciones

Los parámetros hidráulicos representan las propiedades del medio físico y del fluido que condicionan el movimiento de agua subterránea, por lo tanto son una parte fundamental de la descripción de las Unidades Hidrogeológicas. Los de mayor interés hidrogeológico son:

- **Conductividad hidráulica o permeabilidad (K):** representa la mayor o menor facilidad con la que el medio deja pasar el agua a través de él por unidad de área transversal a la dirección del flujo, y se define por lo tanto como el caudal que circula a través de una sección unitaria de acuífero, bajo un gradiente dado. Las dimensiones son m/día.
- **Transmisividad (T):** En otras palabras, es el volumen de agua que atraviesa una banda de acuífero de ancho unitario en la unidad de tiempo y bajo la carga de un metro. Es representativa de la capacidad que tiene el acuífero para ceder agua. En un acuífero homogéneo es igual al producto de la conductividad hidráulica por el espesor de la zona saturada. Las dimensiones son m<sup>2</sup>/día.
- **Coefficiente de almacenamiento (S):** es el volumen de agua que se ha de inyectar en el acuífero por unidad de superficie para que el nivel piezométrico aumente una unidad. Éste es un parámetro adimensional. En un acuífero libre es equivalente a la porosidad eficaz. En un acuífero confinado o semiconfinado corresponde a una combinación entre la porosidad, la compresibilidad del agua y la del esqueleto granular del suelo.

Debido al interés de la salmuera del núcleo como recurso minero se han realizado numerosos estudios de terreno para conocer los parámetros hidráulicos en esa zona. La mayor parte de estos estudios han sido realizados por las empresas que explotan la salmuera (SQM y Rockwood) con el objetivo de caracterizar el yacimiento, así como de los acuíferos cercanos, de los cuales se extrae agua dulce y/o salobre) para los procesos industriales.

En este punto se hace una revisión de las fuentes de información desde donde se han extraído los valores de los parámetros hidráulicos utilizados en este trabajo. Este análisis permitirá una mejor caracterización de las propiedades hidráulicas del núcleo de halita y acuíferos de la cuenca, que son determinantes para conocer el comportamiento hidráulico del medio y así poder evaluar los potenciales efectos sobre el ambiente. Los principales trabajos donde se ha encontrado información son:

- SQM (2005) EIA Proyecto Cambios y mejoras de la operación minera en el Salar de Atacama. En especial la Adenda 2 Anexo V, Estudios realizados por SQM y otros para el cálculo de la conductividad hidráulica.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

- Ayala, Cabrera y Asociados Ltda. (1989) Asesoría profesional informe de avance número 2, Octubre 1989.
- AC Ingenieros consultores Ltda (1995) Radio de protección zanja sector Tucúcaro. San Pedro de Atacama II Región.
- AC Ingenieros consultores Ltda. (1996) Modelación del sistema acuífero del Salar de Atacama, Informe final, Junio 1996.
- GCF Ingenieros consultores (2001) Sondaje de Exploración de salmuera en el Salar de Atacama. Asesoría y estudio para la caracterización de las reservas de salmueras. Informe Final. Octubre 2001
- Dalannais, L. 1979. Hidrogeología del Borde Oriental del Salar de Atacama. Tesis para optar al título de Geólogo. Universidad del Norte. Departamento de Geología. Antofagasta.
- SLM NX UNO de Peine (2012) EIA Proyecto planta de producción de sales de potasio. Adenda 3 Anexo 3, Antecedentes hidrogeológicos existencia zona de baja conductividad hidráulica Salar de Atacama.
- Sociedad Chilena del Litio (2009) EIA, Proyecto Modificaciones y mejoramiento del sistema de pozas de evaporación solar en el Salar de Atacama. Anexo 5.3 Hidrología e Hidrogeología.
- Kunasz, I.A. y Bell, R.R. (1979) Salar de Atacama Lithium reserves High calcium brine exploration report. June 20, 1979
- McCartney, J. (2001) "Hydraulic and Hydrochemical interactions in the Tilopozo groundwater zone Salar de Atacama Region II, Chile"
- Quintadrilling (2014). Estimación de Reservas de Litio Sector Borde Sur Salar de Atacama, Informe Final.

Adicionalmente a esta información bibliográfica en el marco del presente EIA, el Titular ha desarrollado dos campañas de terreno, incluyendo perforación de nuevos pozos y la realización de pruebas de bombeo para la obtención de parámetros hidráulicos en los años 2013 y 2014:

- Campaña 2013: 20 Ensayos Lefranc y 2 Pruebas de bombeo
- Campaña 2014: 4 Pruebas de bombeo

En las tablas resumen del punto 4 del "Apéndice H: Ensayos hidráulicos" de este Anexo se incluyen todos los valores de parámetros hidráulicos georreferenciados que se han recopilado a partir de la revisión bibliográfica. Este mismo apéndice incluye también la descripción detallada de los ensayos realizados en las dos campañas llevadas a cabo por el Titular en el marco de este EIA.

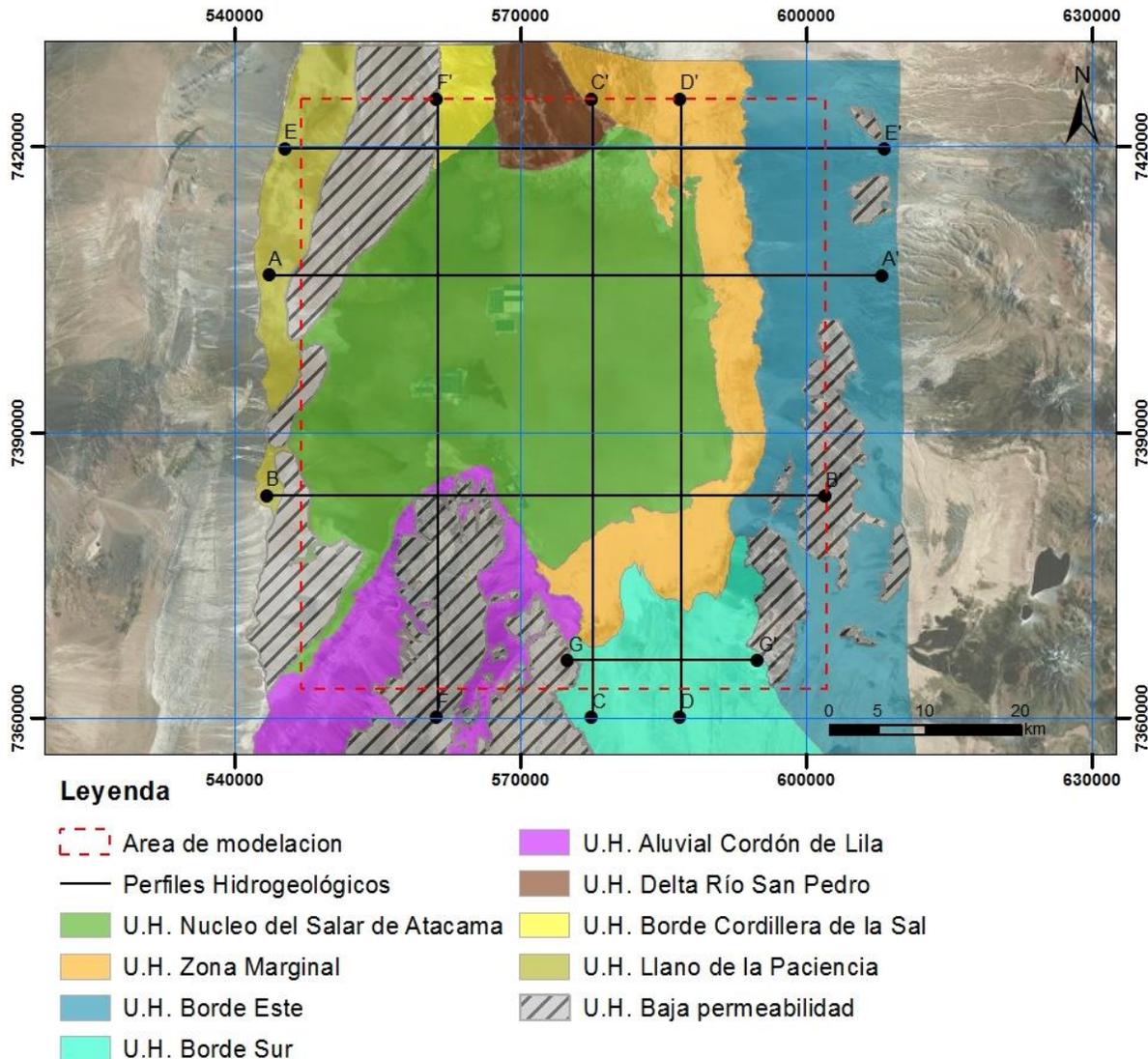
	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

## 8.2.2 Descripción de las Unidades Hidrogeológicas

En este punto se describen las unidades hidrogeológicas definidas para este estudio junto con los parámetros hidráulicos que les han sido asignados, a partir de los datos de ensayos hidráulicos puntuales obtenidos sobre la base de ensayos de terreno realizados en el marco de este EIA y complementando la información con rangos extraídos de la literatura científica existente.

En el área del estudio se han definido en 9 unidades hidrogeológicas de rango local cuya distribución espacial se muestra en la Figura 8-1, junto con la ubicación de los perfiles hidrogeológicos realizados.

**Figura 8-1 Unidades hidrogeológicas**



Fuente: Elaboración propia

### 8.2.2.1 Unidad hidrogeológica Núcleo

El Núcleo es una de las dos unidades hidrogeológicas con materiales salinos (Moraga *et al.*, 1974). Esta unidad es un cuerpo homogéneo formado mayoritariamente por depósitos de halita cristalina (NaCl) prácticamente pura, de origen evaporítico, que contiene intercalaciones de arcillas, limos y materiales vulcano-sedimentarios. La superficie es muy irregular, dentada y quebradiza y presenta un color pardo. Ocupa un área aproximada de 1.700 km<sup>2</sup> y su espesor es variable, desde menos de 400 m en el borde suroccidental a más de 1.800 m en el extremo septentrional (Jordan, 2007).

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

Esta unidad se encuentra atravesada por algunas estructuras geológicas de tipo falla, como el Sistema de Fallas del Salar (SFS) y el Sistema de Fallas de Peine (SFP), cuya descripción en detalle se muestra en el capítulo 3 del presente Anexo. El SFS provoca la variación en espesor de la halita del núcleo entre el bloque Este y el Oeste de dicha falla que se describe en (Jordan, 2007). La ubicación de estas fallas puede verse en los perfiles hidrogeológicos incluidos en este capítulo.

La halita presenta porosidad primaria (intercristalina) y porosidad secundaria en forma de fracturas y conductos de disolución. Se diferencia una parte superior del núcleo de mayor porosidad y espesor variable de entre 30 y 60 metros aproximadamente (50 como promedio), que se observa representada en los perfiles obtenidos de las prospecciones geofísicas realizadas en el marco de este estudio y que pueden verse en el Apéndice B de Geofísica. Esta característica también es citada en (Mardones, 1997), donde se hace la diferencia entre un núcleo inferior y otro superior diferenciados por su porosidad.

Los niveles de agua en el núcleo se encuentran muy próximos a la superficie, en condiciones naturales, la zona no saturada tiene un espesor inferior a 1 m. La zona saturada del núcleo presenta agua de tipo salmuera que presenta una gran concentración de sólidos disueltos, muy rica en Litio (Li), Potasio (K) Magnesio (Mg) y Boro (B) (Risarcher y Alonso, 1996). Estas salmueras tienen una conductividad eléctrica mayor o igual a 200.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (de acuerdo a la definición dada en el capítulo 7 Hidroquímica).

Así como se observa en el núcleo una parte superior de alta porosidad, también se distingue un tramo superior de elevada conductividad hidráulica y coeficiente de almacenamiento y un tramo inferior más compacto debido a la precipitación de sales y al efecto de la presión litostática. Efectivamente, el núcleo de halita del Salar se caracteriza por poseer una conductividad hidráulica con una elevada heterogeneidad, con valores que varían entre  $10^{-2}$  y  $10^3$  m/día en los metros superiores (hasta los 30 m aproximadamente) que se reduce en profundidad, tal y como muestran los antecedentes de Dictuc (2003) e Hydrotechnica (1987) incluidos en la Adenda 2 del EIA de SQM. En general en estos trabajos se reportan valores de  $10^{-3}$  y  $10^0$  m/día en las pruebas realizadas por debajo de 50 m de profundidad, aunque existen valores aislados de  $10^2$  m/día reportados por Hydrotechnica (1987)<sup>3</sup>. Todos los valores de conductividad hidráulica recopilados se pueden consultar en las tablas resumen del punto 4 del Apéndice H: Ensayos Hidráulicos. Los valores del coeficiente de almacenamiento son en general altos, siendo frecuentes valores de 0,1 (10%) aunque existen pruebas que muestran valores del coeficiente de almacenamiento menores. Estos valores puntuales de coeficiente de almacenamiento se pueden consultar en el las tablas resumen del punto 4 del Apéndice H: Ensayos Hidráulicos. Considerando que el núcleo de halita corresponde a un acuífero libre, el coeficiente de almacenamiento equivale a la porosidad eficaz.

Lo anterior valida lo presentado en el informe del Proyecto de Estudio y Monitoreo del Recurso Hídrico de la Cuenca del Salar de Atacama de Conama (2003), donde también se indica que existe variación del

---

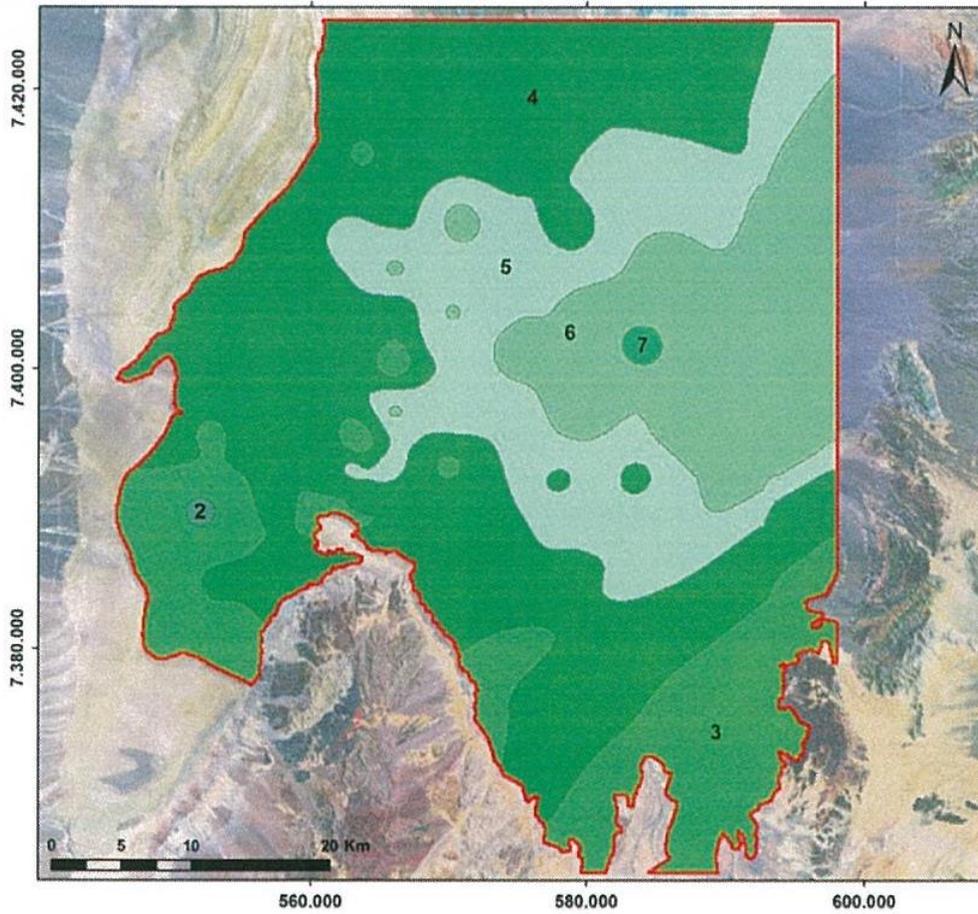
<sup>3</sup>No se han podido localizar algunos los puntos (2001, 2002, 2010 y 2022) con valores reportados en Hydrotecnica 1987.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

coeficiente de almacenamiento con la profundidad. En la pp 2-14 cita: *“Existe una zona superior de 10 a 20 m de espesor con una porosidad efectiva de alrededor de 6,3%. La zona inferior, bajo los 20 m, tiene una porosidad promedio de 3,4%. Especialmente, la porosidad efectiva en los 40 m superiores tiene un promedio de 4,4%, con valores más altos en el centro, y una disminución hacia la periferia”.*

En la Figura 8-2 se puede observar la distribución de porosidad en planta en la zona de modelación de SQM, extraída de la “Segunda actualización del modelo de flujo de agua subterránea en el Salar de Atacama según RCA 22/2006” (Geohidrología, 2013), esta figura se ha modificado incluyendo la tabla con los valores que se reportaba en otra hoja del mismo informe. Estos valores son coherentes con los reportados por Conama y por SQM anteriormente.

**Figura 8-2 Distribución de porosidad**



Zona	Rango de porosidad %	
	Min	Max
2	5,50	5,99
3	6,00	7,00
4	7,01	8,00
5	8,01	9,00
6	9,01	10,00
7	10,01	10,68

Fuente: Modificado de Geohidrología, 2013

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

### 8.2.2.2 Unidad hidrogeológica Zona Marginal

La Zona Marginal es la otra de las dos unidades hidrogeológicas con materiales salinos (Moraga et al., 1974) presentes en el área de estudio. Esta unidad está constituida por costras de transición a cloruros, costras yesíferas, costras cloruro yesíferas y costras de limos salinos, y se distribuye bordeando la unidad Núcleo de halita del Salar de Atacama por su límite Sur y Este. Radialmente, desde el centro de la cuenca, esta unidad presenta una anchura variable, que va de 1 a 7 kilómetros. La potencia de la misma también varía mucho y se acuña según nos acercamos a zonas más proximales de la Cuenca.

En la Zona Marginal se distinguen dos subunidades hidrogeológicas: Zona de Limos y Zona de Costras de Transición a Cloruros. Estas zonas se diferencian por su aspecto físico y composición química y mineralógica, sus contactos en algunas zonas son transicionales.

- La Zona de Limos se encuentra en los bordes del Salar, está constituida por arcillas y limos de origen aluvial que pueden estar localmente cementados por sales de cloruros y sulfatos. Esta zona es plana con vegetación abundante y homogénea (Conama, 2003).
- Zona de Costras Salinas constituida por depósitos salinos que varían de composición desde el núcleo de halita hacia los bordes: Costra de transición de cloruros, Costra Yesífera, Costra Cloruro-yesífera y costras de Limos Salinos (Moraga *et al.*, 1974). También aparecen de manera subordinada boratos, carbonatos y otras sales.

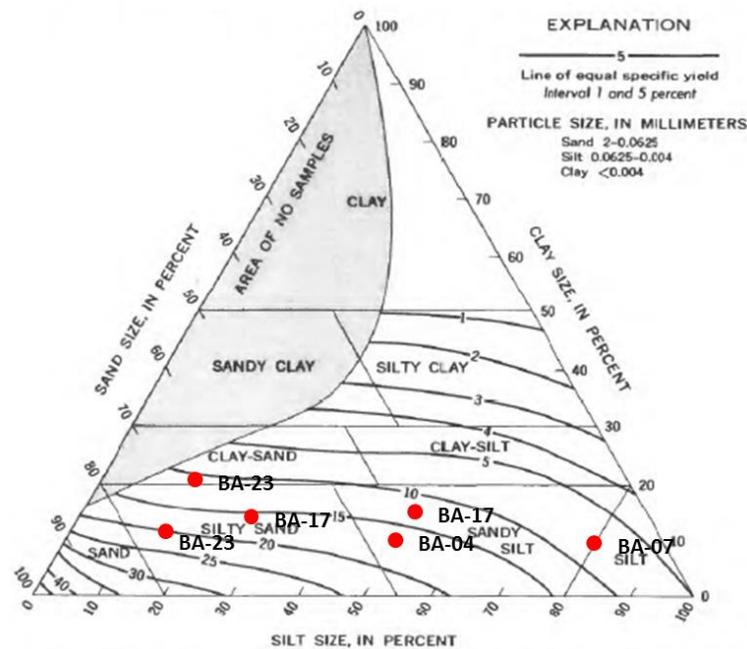
En la zona de Tilopozo, dentro del área de unidad hidrogeológica, se identifica una falla a partir del estudio de los datos de prospección geofísica. Esta falla tiene un rumbo Suroeste-Noreste y pone en contacto la ignimbrita, al Sur; con la zona de costras salinas al Norte. Esta estructura, no tiene expresión superficial y no hay evidencias que indiquen alguna influencia sobre la evolución de los niveles freáticos a un lado u otro de la falla. Así se deduce del análisis de la evolución de niveles en los piezómetros TPZ-10, TPZ-12, TPZ-8, TPZ-6, TPZ-7B, L12-4 y MP-02A, entre otros, véase Apéndice G: Evolución de niveles. Tampoco se observan evidencias de efectos de la falla sobre la posición de la interfase salina en esa zona, que ha sido medida en los piezómetros MP-02C, MP-03C y MP-04C de Rockwood y en el TP-2 de MEL, mostrando una continuidad en profundidad coincidente con la posición medida en la geofísica (perfil L-2 de La Punta-La Brava, véase Apéndice B: Geofísica).

En los ensayos Lefranc realizados por Rockwood se han obtenido valores de conductividad hidráulica en los órdenes de magnitud de entre  $10^{-4}$  y  $10^2$  m/día. Los valores de conductividad hidráulica reportados en los Slug Test de Mc Cartney están en los órdenes de magnitud de  $10^{-1}$  a  $10^0$  m/día, excepto un ensayo realizado en las proximidades de las lagunas de La Punta-La Brava (puntera TPZ-9A en McCartney 2001) en el que se reporta un valor en un orden de magnitud de  $10^{-3}$  m/día. En los pozos del sector Soncor (pozo GD-1) y Aguas de Quelana (pozo GD-2) se realizaron pruebas de conductividad hidráulica en laboratorio que dieron resultados de  $5,4 \times 10^{-3}$  (Dictuc, 2004).

Estos resultados son coherentes con los valores de conductividad hidráulica asignados por Fock (2009) para la Zona Marginal donde afirma que los carbonatos presentan rangos de permeabilidades entre  $10^{-2}$  y  $10^3$  m/día, mientras que los yesos pueden presentar valores de permeabilidad menores a  $10^{-4}$  m/día.

Los resultados de los análisis granulométricos realizados en la perforación de piezómetros someros (Apéndice C: Perforaciones) indican una granulometría entre arena limosa y limo. Estos materiales presentan coeficientes de almacenamiento de entre  $7 \times 10^{-2}$  y  $2 \times 10^{-1}$  (Figura 8-3), mientras que en zonas arcillosas el coeficiente de almacenamiento es de  $2 \times 10^{-2}$  (Johnson, 1967).

**Figura 8-3 Coeficiente almacenamiento de muestras de la Zona Marginal Sur**



Fuente: Modificado de Johnson. 1967

### 8.2.2.3 Unidad hidrogeológica borde Este

La definición de la Unidad Borde Este se realizó según la información recogida en la publicación de Dalannais (1979), quien basa su descripción en las características geológicas e hidrogeológicas de las muestras obtenidas de perforaciones realizadas en la zona y de las pruebas de bombeo realizadas en las mismas.

Esta unidad está constituida por una serie de depósitos de origen aluvial y volcánico, con espesor variable, que alcanza una potencia total de más de 500 m. Su espesor máximo se encuentra en la zona de contacto

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

con la Unidad Zona Marginal, y disminuye hacia el Este, donde limita, mediante discordancia angular con el sustrato rocoso de baja permeabilidad. Hacia el Oeste limita con la Unidad Zona Marginal mediante un cambio lateral de facies que se materializa en forma de interdigitaciones de una unidad en la otra.

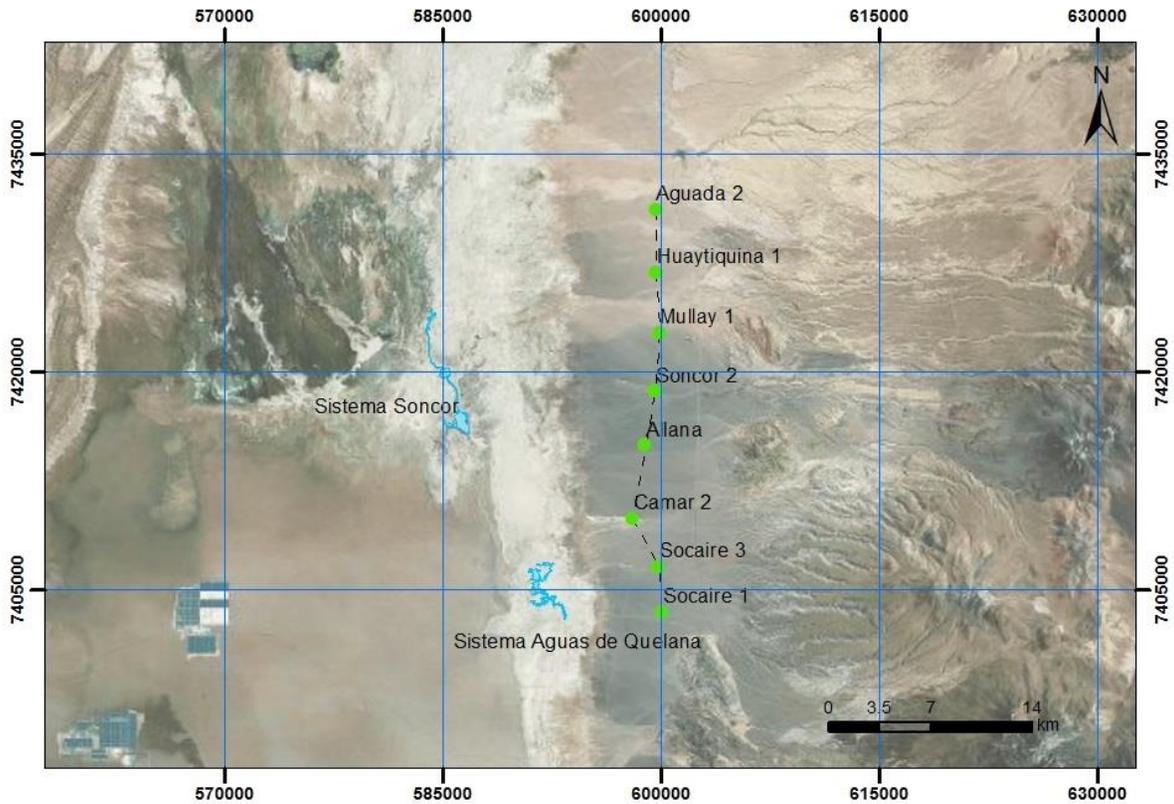
Los depósitos que configuran esta unidad son básicamente detríticos, con tamaños que abarcan desde grava a arcilla, en su mayor parte se trata de materiales de origen aluvial. Por otro lado, también se encuentran depósitos de origen volcánico que corresponden a depósitos de cenizas y de ignimbritas que reflejan diferentes eventos volcánicos en el área. Un estudio más individualizado de esta unidad nos permite hacer una división en varias subunidades hidrogeológicas (Dalannais, 1979), las cuales se presentan a continuación y cuya disposición espacial se representa en la Figura 8-5:

- Subunidad A: Corresponde a depósitos de origen sedimentario, con tamaños que van de grava mediana a arena gruesa y cantos rodados. Los clastos corresponden a lavas andesíticas porfídicas y a lavas ignimbríticas, son subredondeados y subangulares. Esta unidad alcanza una potencia levemente superior a 50 m.
- Subunidad B: Esta unidad está formada por depósitos de naturaleza arenosa, con pequeños lentes arcillosos y con algunas capas de grava fina. Esta subunidad en algunos sectores alcanza un máximo de 140 m de espesor (proximidades Camar 2, Figura 8-4), siendo su espesor promedio de 30 m, situándose por debajo a la unidad A.
- Subunidad C: Corresponde a una subunidad de clastos subredondeados y con clastos predominantemente de naturaleza andesítica e ignimbrítica. Su mayor espesor alcanza los 25 m, con un promedio de 20 m. Localmente en esta subunidad se desarrolla un acuífero con características de semiconfinado y libre.
- Subunidad D: Esta subunidad comprende depósitos originados por un flujo ignimbrítico-tobáceo de color gris. Se localiza entre los pozos Camar y Huaytiquina. Esta subunidad corresponde a un acuitardo.
- Subunidad E: Esta unidad está compuesta por materiales de tamaño fino, arena fina, lentes de limo, arcilla, ceniza, materiales calcáreos y sulfatos y presenta la mayor potencia y distribución superficial de todas las descritas. Su espesor promedio es de 100 m y se encuentra apoyada sobre el basamento hidrogeológico. En esta unidad se desarrolla un acuífero semiconfinado y en algunos casos confinado.

La hidrogeología de este acuífero fue caracterizada por Dalannais (1979) mediante la descripción de perforaciones y la realización de ensayos de bombeo cuya ubicación se muestra en el mapa de la Figura 8-4. Este mismo autor también elaboró un perfil hidrogeológico en el que se muestra la disposición de las subunidades descritas anteriormente, ver Figura 8-5.

En el documento de Fock, 2009, basándose en la definición de estas subunidades se definen tres acuíferos diferentes: Un acuífero libre superior, que englobaría las subunidades A, B y C, un acuitardo que es coincidente con la subunidad D y un acuífero confinado que subyace al acuitardo anteriormente citado y que contendría a la subunidad E.

**Figura 8-4 Trazado en planta del perfil hidrogeológico borde Este**

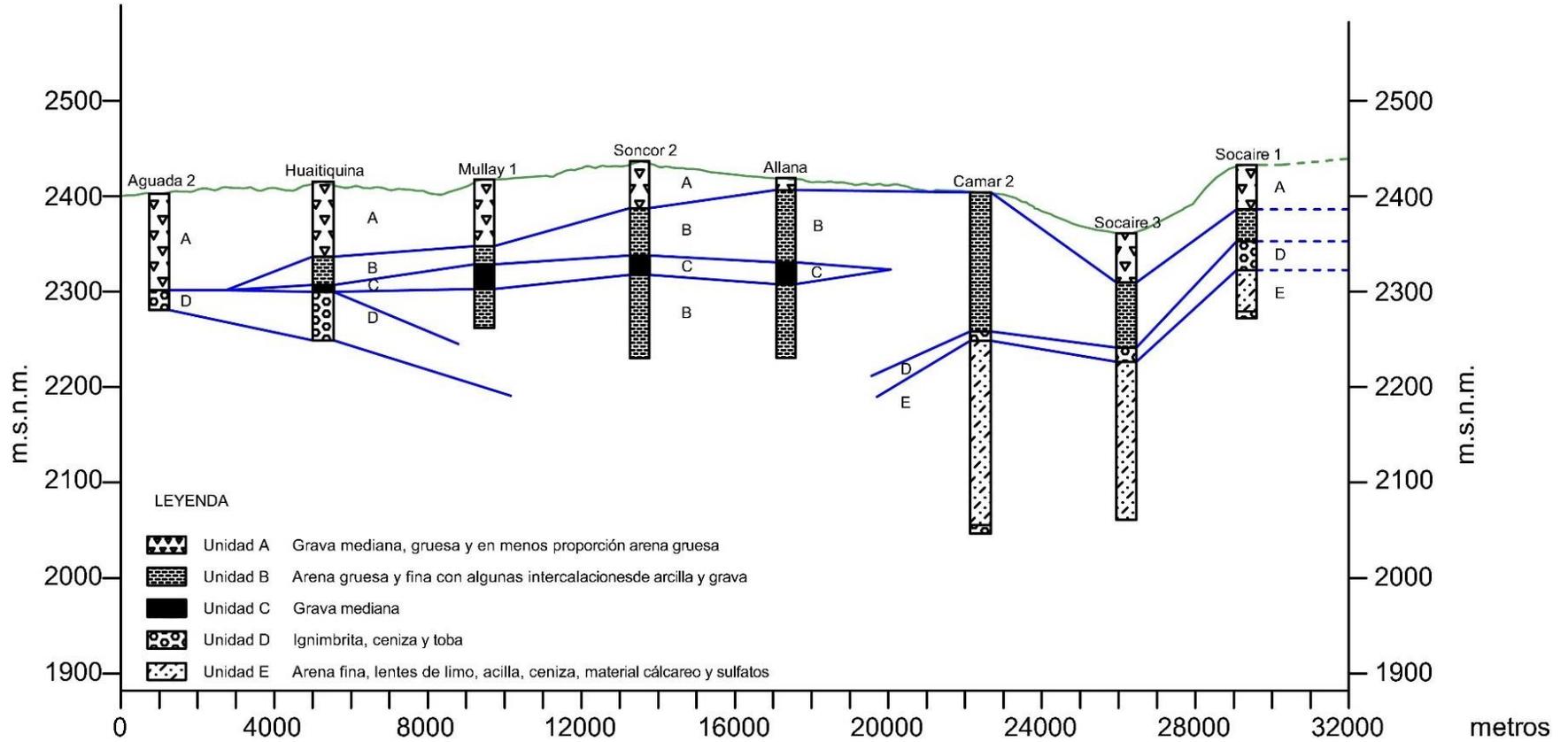


**Planta correlación (Dalannais, 1979)**

- Cuerpos lagunares
- Pozos
- - - Traza correlación

Fuente: Elaboración propia

**Figura 8-5 Correlación de subunidades hidrogeológicas**



EV 1:1.000  
EH 1:25.000

Fuente: Modificado de Dalannais, 1979

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

Posteriormente la empresa SQM realizó otros ensayos descritos en Dictuc (1999), Dictuc (1999b), Dictuc (2001), Dictuc (2002) y Dictuc (2002b). En esta unidad se ha reconocido un acuífero superior libre, un acuitardo y un acuífero inferior confinado.

Se han reportado valores de conductividad hidráulica de entre  $10^0$  y  $10^1$  m/día en las pruebas de bombeo realizadas en el acuífero superior. El acuitardo está conformado por arcillas en su parte más distal y por una ignimbrita en sus partes más altas, pudiéndoles asignar una permeabilidad que va desde  $10^{-4}$  m/día (arcillas) hasta  $10^1$  m/día, máximo reportado en ignimbritas (Fock, 2009).

Los valores de coeficiente de almacenamiento reportados para esta unidad están en los órdenes de magnitud de  $10^{-4}$  a  $10^{-1}$ .

Todos los valores conductividad hidráulica y coeficiente de almacenamiento recopilados se pueden consultar en las tablas resumen del punto 4 del "Apéndice H: Ensayos hidráulicos".

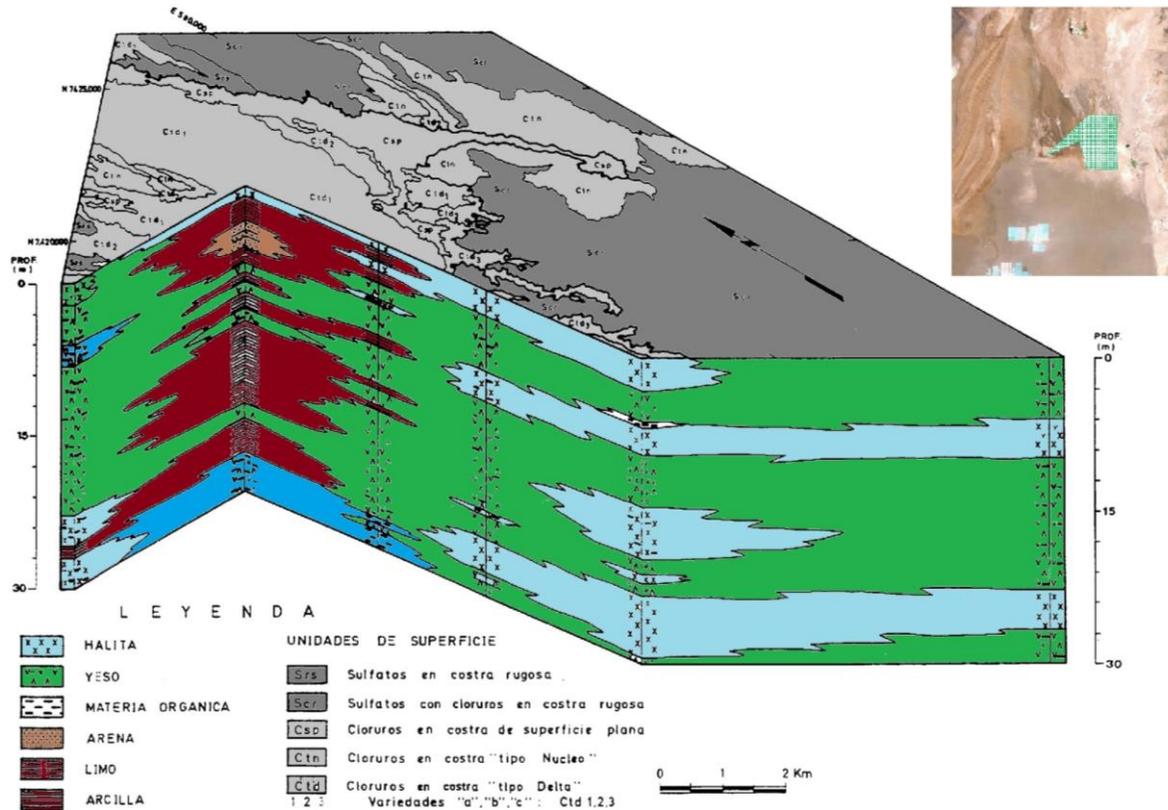
#### 8.2.2.4 Unidad Hidrogeológica Delta del río San Pedro

Esta unidad se sitúa geográficamente al Norte del Salar de Atacama y al Este de la Cordillera de la Sal, y tiene su origen en los materiales acumulados en la desembocadura del río San Pedro sobre el núcleo de halita del Salar.

Litológicamente está constituida principalmente por arcillas, limos, yeso, frecuentemente mezclado con materia orgánica, arena y halita. La proporción de cloruros se incrementa hacia el borde distal del delta, mientras que las arcillas y limos son más abundantes en el sector centro-distal del mismo y funcionan como niveles confinantes. Los sulfatos aparecen predominantemente en el sector distal y en ocasiones se presentan mezclados con fangos orgánicos (Bevacqua, 1994).

En la Figura 8-6 se muestra un esquema tridimensional de la estratigrafía de la parte más distal del río San Pedro.

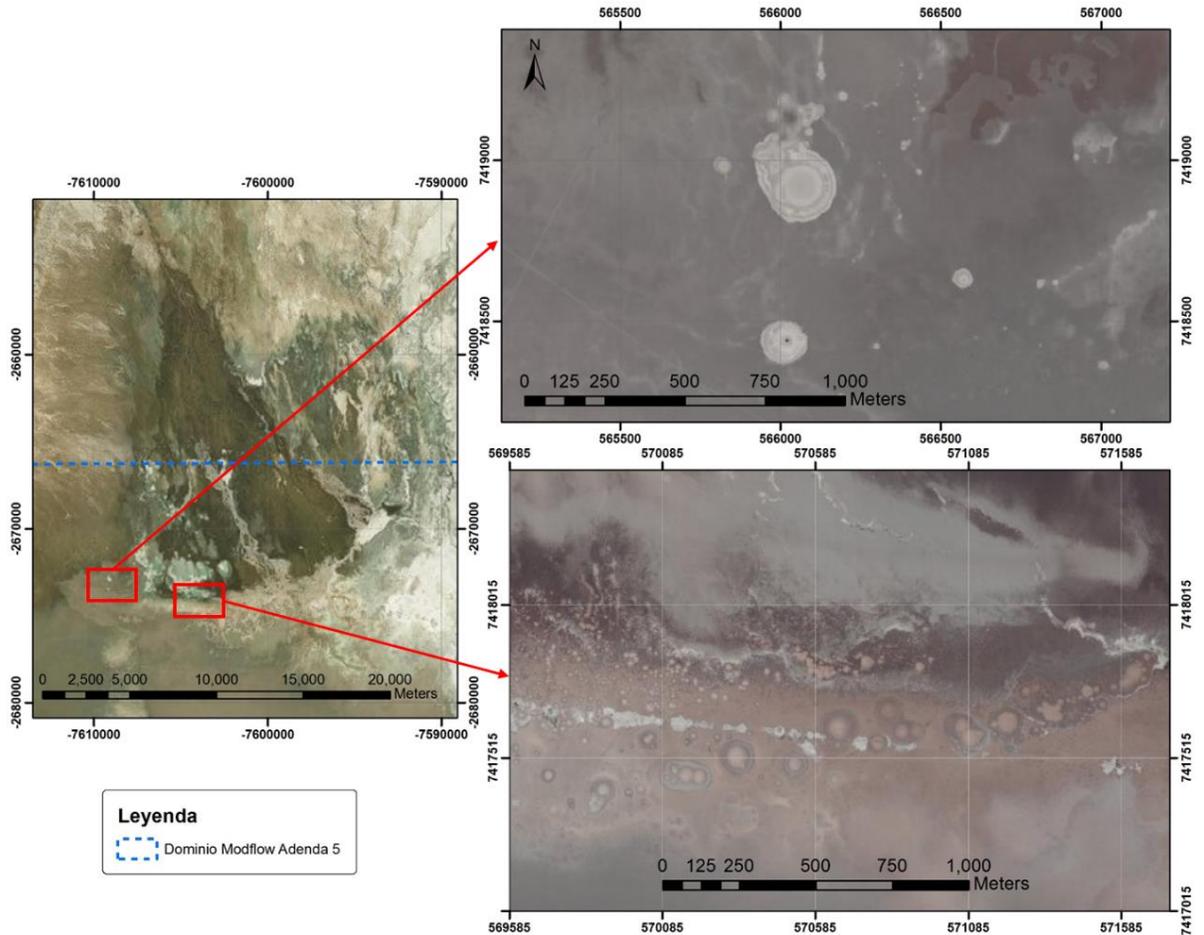
Figura 8-6 Esquema estratigrafía Delta del Río San Pedro



Fuente: Modificado de Bevaqua (1994)

En la parte distal del delta, y en el núcleo más próximo al mismo, se producen surgencias de agua subterránea en forma de "ojos" (Figura 8-7). Los ojos tienen habitualmente tamaño decamétrico pero pueden alcanzar los 200 m de diámetro, esto evidencia la existencia de flujos verticales relacionados con niveles confinados que llegan a superficie a través de estructuras kársticas en los niveles de halita.

**Figura 8-7 Surgencias (Ojos) en Delta del río San Pedro**



Fuente: Elaboración propia con imagen de Google Earth

Los valores de conductividad hidráulica asignados para esta unidad están comprendidos entre  $10^{-4}$  y  $10^{-3}$  m/día en limos y arcillas, mientras que en el caso arenas finas mezcladas con limos estos valores son del orden de  $5 \times 10^0$  m/día (Custodio y Llamas, 2001).

El coeficiente de almacenamiento de estos materiales está comprendido entre  $2,5 \times 10^{-1}$  en gravas a  $2 \times 10^{-2}$  en arcillas (Johnson, 1967).

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

### 8.2.2.5 Unidad hidrogeológica Borde Sur

Esta unidad se sitúa al Sur del Salar de Atacama y está constituida por diferentes tipos de materiales que rellenan los corredores de Tilopozo, Tilomonte y las lomas de Tilocalar. Desde niveles más superficiales a más profundos se pueden diferenciar: depósitos aluviales someros, niveles ignimbríticos<sup>4</sup> y materiales de la Formación Tambores que se sitúan en la parte inferior.

Los depósitos aluviales someros principalmente están constituidos por rellenos aluviales y vulcano sedimentarios que se sitúan más superficialmente, la naturaleza de estos sedimentos es muy heterogénea, al igual que el grado de retrabajo de los mismos. Litológicamente consiste en una mezcla de gravas, arenas y limos sin consolidar.

Los depósitos ignimbríticos corresponden a la ignimbrita de Tucúcaro, que es una unidad con un espesor muy heterogéneo, con espesores comprendidos entre menos de 10 m en algunas zonas a algo más de 100 m en otras, en función del relieve existente durante su depósito, siendo mayor en las zonas deprimidas y menor en las zonas elevadas.

Por debajo de la ignimbrita se sitúan los depósitos de la formación Tambores, la cual está compuesta por paraconglomerados, con intercalaciones de areniscas de grano grueso, ocasionalmente, con vetillas de yeso. Esta unidad llega a alcanzar los 450 m de espesor (Ramirez y Gardeweg, 1982).

Todos estos depósitos se encuentran atravesados por un conjunto de fallas normales, con rumbo predominante Norte-Sur, las cuales son fácilmente identificables en los perfiles geofísicos realizados en la zona y que se pueden consultar en el Apéndice B: Geofísica de este estudio. Estas fallas pueden actuar, según se interpreta en los perfiles geofísicos, como un límite lateral del acuífero subyacente de salmuera y por lo tanto canalizan el flujo de agua de los acuíferos de la zona con una dirección predominante Sur-Norte.

A esta unidad se le asignan valores de conductividad hidráulica de  $10^0$  a  $10^1$  m/día, que corresponden a los valores asignados por MEL (1996) de 1,5 a 3 m/día y en MEL (2014) donde se actualiza su modelo numérico con valores de 1,8 a 13,9 m/día.

Los valores del coeficiente de almacenamiento están entre los órdenes de magnitud de  $3 \times 10^{-2}$  y  $1,4 \times 10^{-1}$  (MEL, 1996).

---

<sup>4</sup> Ignimbrita: Roca o depósito formado a partir de un flujo piroclástico pumítico, independientemente de si está soldado o no. Los fragmentos pueden ser de tamaño muy variados, con pómez y otras rocas flotando en una matriz de ceniza. Cas y Wright (1992)

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

#### 8.2.2.6 Unidad hidrogeológica Aluvial Cordón de Lila

Esta unidad ocupa una estrecha franja que rodea el Cordón de Lila. Está constituida por depósitos aluviales (Ramirez y Gardeweg, 1982) provenientes de las descargas realizadas a través de la red de drenaje que recorre el Cordón de Lila y que se activan temporalmente dando lugar a los abanicos aluviales que cubren la zona.

Litológicamente se trata de una mezcla heterogénea de gravas, arenas, limos y arcillas. Esta unidad presenta un espesor variable, pero puede alcanzar una potencia importante en los abanicos aluviales como se ha comprobado en la perforación de los multipiezómetros MP-05 y MP-06. En estas perforaciones, de profundidad mayor a 80 m, no se alcanza el límite inferior de esta unidad. Las características de estos puntos y su descripción litológica se puede consultar en el "Apéndice C: Perforaciones" de este anexo.

Estos materiales pueden presentar valores de conductividad hidráulica de  $10^{-1}$  a  $10^2$  m/día (Custodio y Llamas, 2001). Se dispone de un valor calculado en la zanja de Tucúcaro (AC Ingenieros consultores Ltda, 1995) que estima la conductividad hidráulica en 15 m/día. El coeficiente de almacenamiento de estos materiales va de  $2,5 \times 10^{-1}$  en gravas a  $2 \times 10^{-2}$  en arcillas (Johnson, 1967).

#### 8.2.2.7 Unidad Hidrogeológica Llano de la Paciencia

Esta unidad se ubica al Oeste del Salar de Atacama, entre la Cordillera de Domeyko y la Cordillera de la Sal. Consiste en depósitos de limos y arcillas con un alto contenido salino. Los limos y arcillas forman parte de abanicos aluviales coalescentes, que corresponden principalmente a depósitos de corrientes de barro (80%) y secundariamente depósitos aluviales de arenas y gravas (20%). En la parte topográficamente más baja de la unidad también encontramos depósitos salinos recientes (Salares o playas) (Ramirez y Gardeweg, 1982).

Los depósitos de esta unidad que consisten en limos y arcillas con un alto contenido salino con valores de conductividad hidráulica de  $10^{-4}$  a  $10^{-3}$  m/día y secundariamente en depósitos aluviales de arenas y gravas  $10^0$  a  $10^2$  m/día (Custodio y Llamas, 2001).

El coeficiente de almacenamiento de estos materiales va de  $2,5 \times 10^{-1}$  en gravas a  $2 \times 10^{-2}$  en arcillas (Johnson, 1967).

#### 8.2.2.8 Unidad Hidrogeológica Aluvial Cordillera de la Sal

Esta unidad hidrogeológica se sitúa en el borde oriental de la Cordillera de la Sal, y al Oeste del delta del río San Pedro y está constituida principalmente por depósitos aluviales correspondientes a abanicos aluviales formados por la erosión de las rocas de la Cordillera de la Sal. Se trata de acumulaciones de arcillas, limos y gravas, con una disminución del tamaño de grano hacia el centro de la cuenca. (Ramírez y Gardeweg, 1982).

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

Estos materiales pueden presentar valores de conductividad hidráulica de  $10^{-2}$  a  $10^2$  m/día (Custodio y Llamas, 2001). El coeficiente de almacenamiento de estos materiales va de  $2,5 \times 10^{-1}$  en gravas a  $2 \times 10^{-2}$  en arcillas (Johnson, 1967).

#### 8.2.2.9 Unidad hidrogeológica de Baja Permeabilidad

El conjunto de rocas con comportamiento casi impermeable que bordean la cuenca hidrogeológica del Salar de Atacama, y configuran el basamento hidrogeológico de la misma. Estas rocas con comportamiento hidrogeológico similar se dividen en dos tipos, atendiendo a su origen geológico (Ramirez y Gardeweg, 1982).

Por un lado se presentan las unidades de origen sedimentario, como es la Formación San Pedro, de edad Oligoceno-Mioceno Medio. Esta formación está constituida por estratos moderadamente plegados y parcialmente erosionados, cuyos componentes principales son areniscas de grano fino y limolitas de color pardo y pardo rojizo, con capas decimétricas de sal y yeso. Aflora al Oeste del Salar dando origen a la Cordillera de la Sal.

Por otro lado se tienen las rocas de origen ígneo. Se pueden diferenciar dos tipos principales, las que afloran en el Cordón de Lila al Sur y las que afloran al Este del Salar. Las del Sur son rocas intrusivas de composición granítica que corresponden a dos pulsos intrusivos distintos, uno ocurrido en el Paleozoico y el otro en el Cretácico. Las rocas ígneas del Este son principalmente rocas volcánicas de composición dacítica o andesítica correspondientes a la Formación Cas (Permico-Triásico) y la formación Peine (Paleozoico Superior-Triásico). La formación Peine también contiene areniscas y tobas.

La Formación San Pedro subyace bajo el núcleo de halita y la Zona Marginal del Salar (Jordan, 2007), los depósitos del Llano de la Paciencia y aluviales de la Cordillera de la Sal. La profundidad máxima a la que se encuentra el techo de esta formación bajo el núcleo del Salar son 1800 m (Jordan, 2007).

Debido a este contraste de permeabilidad con los materiales que tiene por encima, tanto la Formación San Pedro, como los materiales ígneos antes descritos, que conforman la Unidad de Baja Permeabilidad, se consideran como basamento hidrogeológico. Para efectos de la modelación numérica se considerará que esta zona no participa en aquellas con flujo de agua y por lo tanto corresponden a celdas inactivas y por consiguiente no requieren de una asignación de valores de parámetros hidráulicos.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

### 8.2.3 Distribución espacial de parámetros hidráulicos

En el marco de este EIA se han realizado pruebas de bombeo y pruebas del tipo Lefranc, con el objetivo de poder obtener valores de Transmisividad (T), Permeabilidad (K) y Coeficientes de Almacenamiento (S) representativos de la zona más local asociada al proyecto en evaluación. El detalle de los tipos de ensayos y pruebas de bombeo realizados, se presentan en el "Apéndice H: Ensayos hidráulicos" de este Anexo en donde se incluyen todos los valores obtenidos.

A manera de resumen, en la Tabla 8-1 y Tabla 8-2 se presentan el listado de puntos en los cuales Rockwood ha realizado las pruebas hidráulicas en el marco de esta evaluación ambiental, y los resultados obtenidos.

Con estos datos junto a la información recopilada, se han elaborado mapas con los valores puntuales de conductividad hidráulica (m/día).

En la elaboración este mapa, se ha considerado que para los puntos en los que existía más de una prueba de ensayo hidráulico, el valor de la conductividad hidráulica queda dado por la media de los valores obtenidos en las distintas pruebas. En los casos en los que existían diferencias elevadas en los resultados, se consideró únicamente la prueba de mayor fiabilidad. Es decir, si existen dos antecedentes de ensayos Lefranc se asumió la media de ambos valores, pero cuando existe una prueba de bombeo y un ensayo Lefranc, se consideró únicamente el valor obtenido de la prueba de bombeo. En los casos de ensayos "packer" en pozos profundos se calcularon dos valores medios: uno para el tramo entre la superficie y los 50 m de profundidad y otro desde los 50 m hasta el fondo del pozo.

**Tabla 8-1 Resumen de Pruebas de Bombeo realizadas**

Pozo	Profundidad del pozo (m)	T (m <sup>2</sup> /d)	S (-)
CL-6	19	4,53 x 10 <sup>2</sup>	4,61 x 10 <sup>-1</sup>
CL-21	26	7,93 x 10 <sup>2</sup>	6,94 x 10 <sup>-2</sup>
PN-05	19	1,69 x 10 <sup>5</sup>	2,09 x 10 <sup>-1</sup>
PN-08	18	7,28 x 10 <sup>3</sup>	1,37 x 10 <sup>-1</sup>
PN-14	22	5,55 x 10 <sup>4</sup>	5,30 x 10 <sup>-2</sup>
PN-16	18,5	1,25 x 10 <sup>4</sup>	2,10 x 10 <sup>-1</sup>

Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente a estas pruebas de bombeo se realizaron dos pruebas en el pozo de Tilopozo y la zanja de Tucúcaro con el objetivo de conocer su área de influencia. Estas pruebas y las áreas calculadas se encuentran en el Apéndice D: "Determinación área de Influencia de Bombeo en el Pozo Tilopozo y en la Zanja de Tucúcaro".

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

**Tabla 8-2 Resumen de ensayos Lefranc realizados**

Piezómetro	Tramo Ensayado (m)			Conductividad (m/día)	
	Inicio	Fin	Longitud	Nivel Constante	Nivel Variable
P-01	9,00	10,00	1,00	$7,69 \times 10^{-2}$	$2,64 \times 10^{-2}$
	24,00	25,00	1,00	$4,10 \times 10^{-2}$	
P-02	23,00	24,00	1,00	$5,99 \times 10^{-1}$	$1,00 \times 10^{-2}$
	24,80	25,80	1,00	$4,31 \times 10^{-1}$	$4,30 \times 10^{-2}$
P-03	29,00	30,00	1,00	$5,50 \times 10^{-2}$	$6,90 \times 10^{-2}$
	40,90	41,90	1,00	$1,61 \times 10^{-1}$	$3,54 \times 10^{-1}$
	4,00	5,00	1,00	$3,86 \times 10^{-1}$	$3,90 \times 10^{-1}$
P-04	14,00	15,00	1,00	$4,25 \times 10^{-1}$	$8,21 \times 10^{-1}$
	19,00	20,00	1,00	$4,25 \times 10^0$	$1,74 \times 10^{-1}$
	24,00	25,00	1,00	$7,18 \times 10^{-1}$	$1,85 \times 10^{-1}$
	29,00	30,00	1,00	$3,81 \times 10^0$	$2,23 \times 10^0$
	6,30	7,00	0,70	$3,81 \times 10^2$	$2,23 \times 10^1$
MP-01A	9,00	10,00	1,00	$1,14 \times 10^2$	$2,97 \times 10^1$
MP-02B	10,90	12,50	1,60	$3,44 \times 10^1$	$5,13 \times 10^0$
MP-03B	15,00	16,00	1,00	$3,24 \times 10^1$	$4,24 \times 10^0$
	29,00	30,00	1,00	$9,60 \times 10^0$	$9,19 \times 10^{-1}$
MPS-AA	3,20	4,00	0,90	S.A	$3,02 \times 10^{-1}$
MPS-AB	29,00	30,70	1,70	S.A	$9,87 \times 10^{-4}$
MPS-CA	2,55	3,40	0,85	$9,18 \times 10^1$	$3,38 \times 10^0$
MPS-CA	39,10	40,00	0,90	$6,04 \times 10^1$	$3,09 \times 10^0$

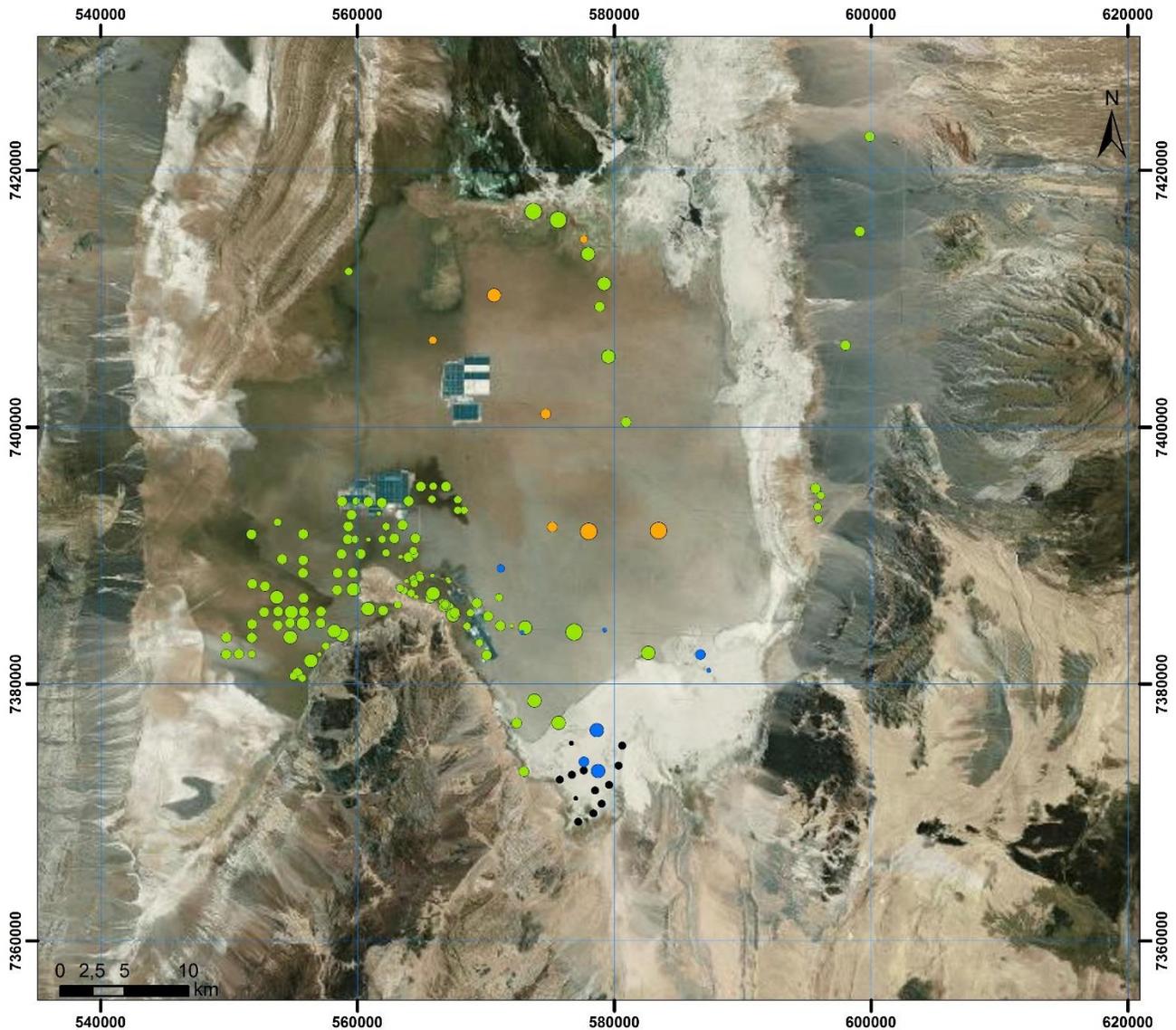
S.A: Sin Admisión

Fuente: Elaboración propia

Para facilitar un mejor análisis de los valores de conductividad hidráulica en el Núcleo, y con ello su incorporación en el modelo numérico, se han elaborado dos mapas de conductividad hidráulica, uno que muestra los valores sobre 50 m de profundidad, que se muestran en la Figura 8-8, y otro con los valores de conductividad hidráulica bajo los 50 m, que se muestra en la Figura 8-9. Estas Figuras representan todas las pruebas hidráulicas realizadas y recopiladas, cuyos valores se encuentran en la Tabla del Capítulo 4 del Apéndice H de este Anexo. Se destaca que la escala de la conductividad hidráulica es distinta en ambas figuras.

Los valores de permeabilidad hidráulica reportados bajo 50 m son muy bajos y con poca variación, presentando valores medidos inferiores a 1 m/día en la mayoría de los casos. Se considera que debido al comportamiento dúctil de las evaporitas el efecto de la presión litostática hace similar las características hidráulicas al aumentar la profundidad. Es por esta razón la falla del Salar ha sido representada solamente sobre los 50 m, donde se realizan las extracciones de salmuera.

**Figura 8-8 Valores puntales de conductividad hidráulica sobre 50 m**



**Leyenda**

**K m/día**

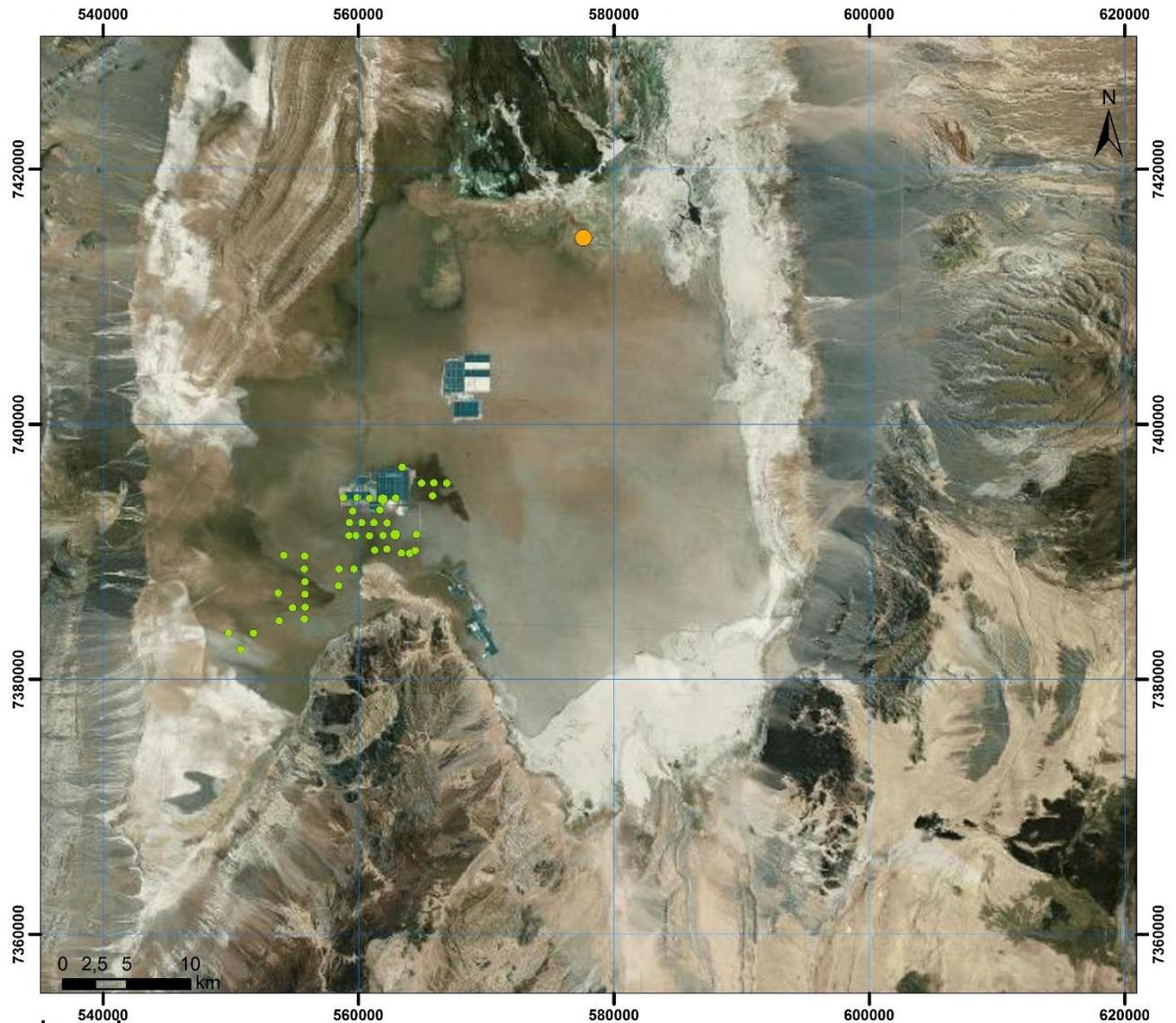
- < 1
- 1 - 10
- 10- 100
- 100 - 1000
- >1000

**Tipo Prueba**

- LEFRANC
- PACKER
- PRUEBA BOMBEO
- SLUG TEST

Fuente: Elaboración propia

**Figura 8-9 Valores puntuales de conductividad hidráulica bajo 50 m**



**Leyenda**

**K m/día**

- < 1
- 1 - 10
- 10 - 100
- 100 - 1000
- >1000

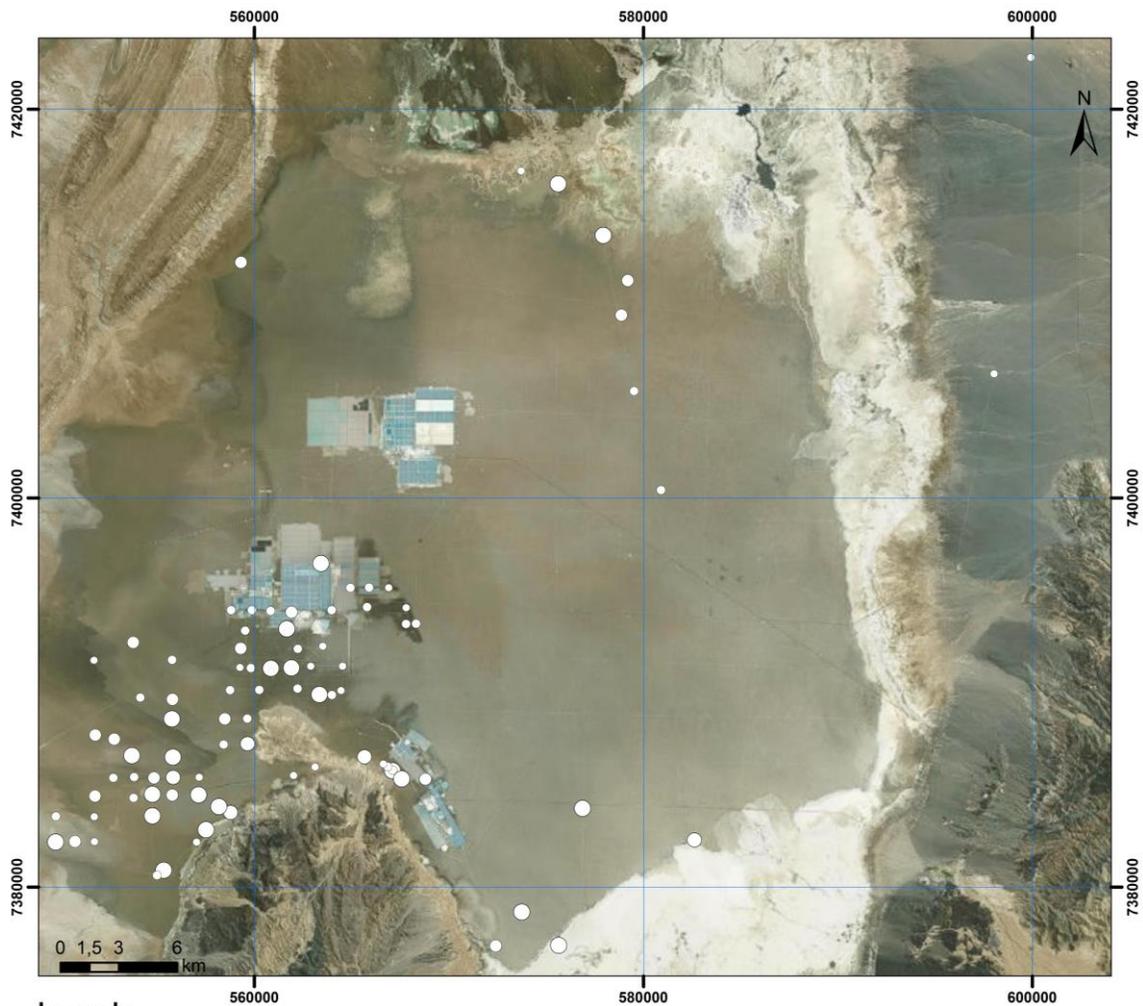
**Tipo Prueba**

- LEFRANC
- PACKER
- PRUEBA BOMBEO
- SLUG TEST

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 8-10 se presentan los valores puntuales de coeficiente de almacenamiento de los ensayos realizados en el marco del presente EIA y los que han sido recopilados para este estudio. De manera similar a la conductividad hidráulica, en los puntos en los que existía más de un valor se utilizó el promedio, cuando todos los valores disponibles fueron obtenidos de ensayos de bombeo. En los puntos situados en el núcleo de halita, éstos corresponden a pruebas realizadas a menos de 50 m de profundidad.

**Figura 8-10 Valores puntuales del coeficiente de almacenamiento sobre 50 m**



**Leyenda**

**Coefficiente de almacenamiento**

- < 0,01
- 0,01 - 0,05
- 0,05 - 0,08
- 0,08 - 0,1
- > 0,1

Fuente: Elaboración propia

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

#### 8.2.4 Geometría del acuífero y perfiles hidrogeológicos

Para facilitar la comprensión del sistema hidrogeológico estudiado, y visualizar la geometría del modelo numérico, se han realizado 7 perfiles hidrogeológicos que abarcan toda el área de modelación, y que coinciden con los perfiles geológicos presentados en el Capítulo 3 (Figura 3-15 a Figura 3-21). Además, se han realizado otros tres perfiles que representan con detalle la geometría de las diferentes unidades hidrogeológicas en la proximidad de los sistemas lagunares de Peine, La Punta- La Brava y Soncor, que es donde se han implementado los perfiles de modelación numérica en SEAWAT (Capítulo 10 de este anexo). La ubicación de estos perfiles respecto a las unidades hidrogeológicas descritas se muestra en Figura 8-1 y Figura 8-18.

Estos perfiles nos muestran la disposición espacial de las distintas unidades hidrogeológicas, para la definición de las cuales se realizaron agrupaciones de materiales geológicos con características hidráulicas similares. La correspondencia entre las diferentes unidades hidrogeológicas y las geológicas, descritas en el Capítulo 3 de esta Adenda, se enumera a continuación:

- U.H. Núcleo del Salar: Contiene las unidades salina Núcleo de cloruros (Qcl) y Costra de Cloruros y Sulfatos (Qcls).
- U.H. Zona Marginal: Al igual que la anterior predominan los depósitos salinos: Costra de limos salinos (Ql), Costra de cloruros y sulfatos (Qcls), Costra de sulfatos (Qs), Núcleo de cloruros (Qcl), Costra de transición de cloruros (Qtcl).
- U.H. Borde Este: depósitos aluviales (Qal), depósitos aterrazados (TQt), depósitos piroclásticos Socaire y Tumisa (Pipi)
- U.H. Borde Sur: Ignimbrita de Tucúcaro (Pltc), Formación tambores (Tt), depósitos aluviales (Qal), Ignimbrita de Tucúcaro (Pltc).
- U.H. Aluvial Cordón de Lila: Depósitos aluviales (Qal).
- U.H. Delta del Río San Pedro: costra de limos salinos (Ql), costra de transición de cloruros (Qtcl) y Núcleo de cloruros (Qcl).
- U.H. Borde Cordillera de la Sal: Costra de limos (Ql). Formación Vilama (MsQv).
- U.H. Llano de la Paciencia: Costra de limos (Ql), depósitos aluviales (Qal), depósitos aterrazados (TQt), Formación el Campamento (MsQec)
- U.H. Baja permeabilidad: Formación San Pedro (Tsp), Formación Cas (PzTrc), Formación Purilactis (Jkp), Formación Cinchado.(Tlc), Intrusivo plutónico granodiorita (Kgd), Intrusivo plutónico granito(Kg), Estratos de Cerros Negros (TrJcn), Tonalita (Pzt), Formación Peine (PzTrp), (Tq) Estratos de Quepe, Granito (Pzig)

En los perfiles también se representa el trazado de la interfase salina, que es una superficie que aflora en superficie en la Unidad Hidrogeológica Zona Marginal y se inclina hacia zonas más profundas al alejarse del centro de la Cuenca. Esta interfase salina es el límite entre el acuífero de salmuera inferior y el acuífero de agua salobre que se sitúa por encima, el cual muestra una disminución en su espesor hacia el centro

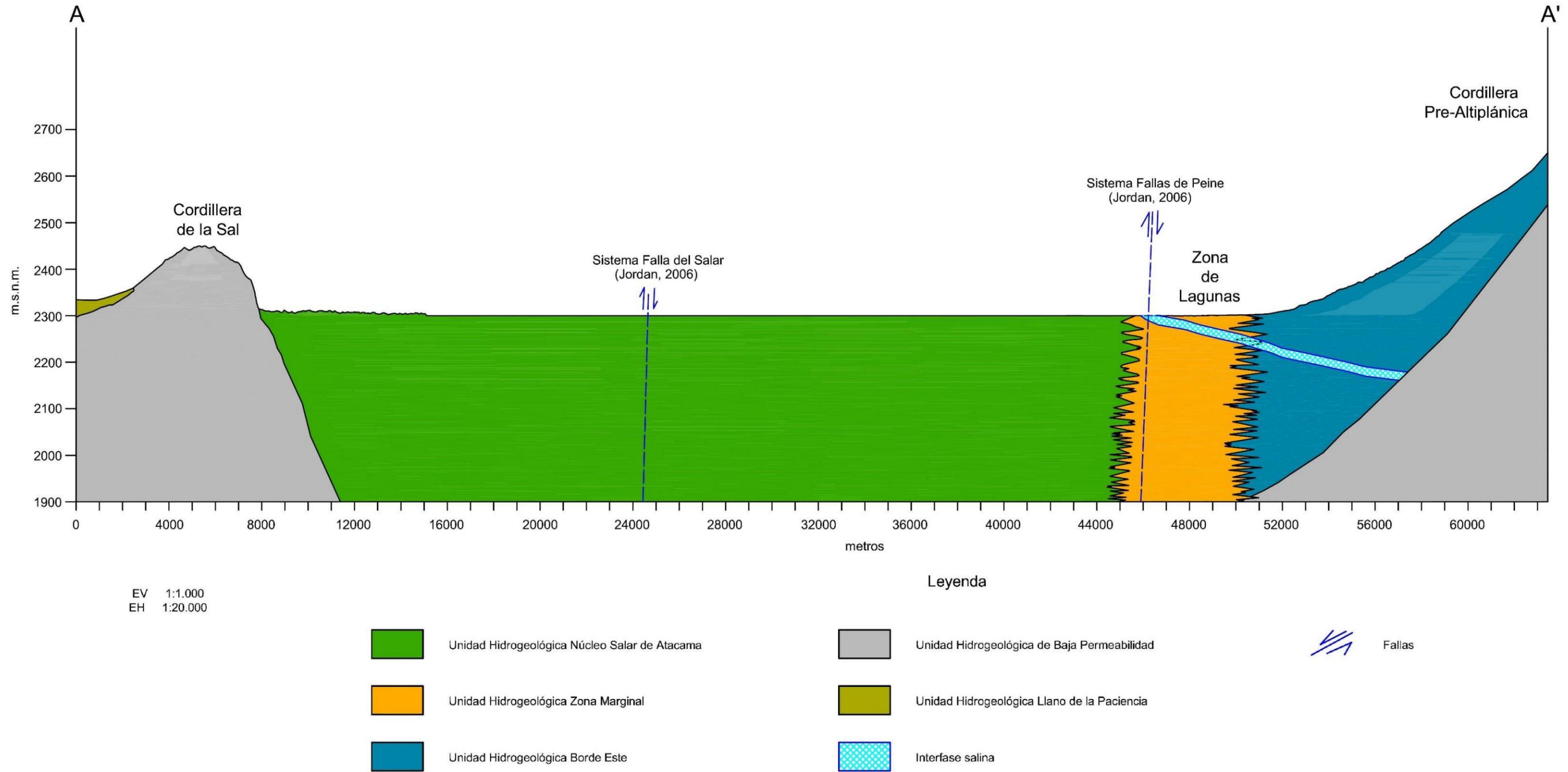
	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

de la Cuenca hasta desaparecer. Es decir, la interfase actúa como basamento hidrogeológico del acuífero de agua salobre, y limita la entrada del flujo subterráneo hacia el Núcleo. De la misma forma, el acuífero de salmuera se va profundizando por debajo de la interfase salina, como se observa en la representación de dicha interfase en los perfiles hidrogeológicos. El detalle de la geometría de esta interfase se presenta en el punto 8.4.3. Geometría de la interfase salina, de este capítulo.

Respecto la Unidad Hidrogeológica Núcleo del Salar que aloja la mayor parte de la salmuera de la Cuenca, se destaca que ésta hasta los aproximadamente 50 primeros metros, presenta valores mayores de porosidad y de permeabilidad hidráulica, y debajo de esta profundidad, valores menores. Si bien esta diferenciación no se ha tenido en cuenta en la generación de los perfiles hidrogeológicos, sí ha sido considerada en la configuración del modelo numérico que se presenta en el capítulo 10 de este anexo.

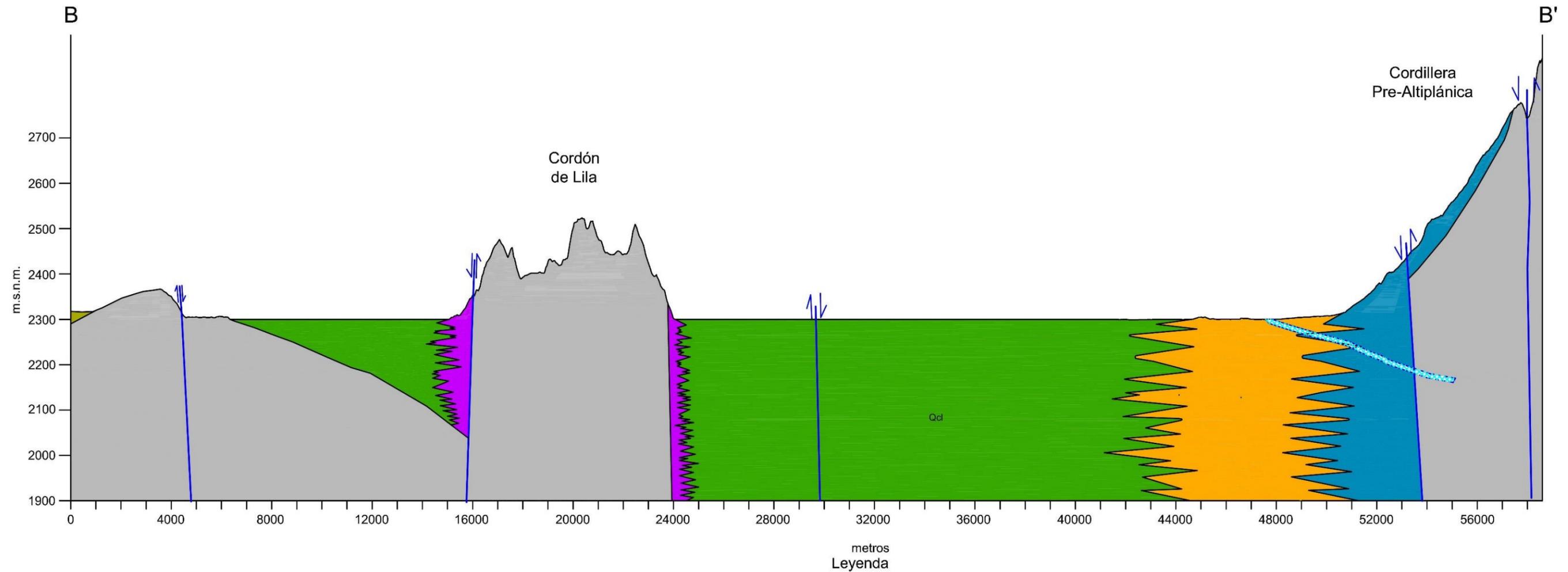
Esta unidad además presenta espesores muy heterogéneos, que van desde menos de 400 metros en el borde suroccidental del Salar hasta 1800 en el extremo norte de la Cuenca (Jordan, 2007). Al respecto se considera que, para efectos de la evaluación de los procesos hidrogeológicos que ocurren en la parte somera de la Cuenca y Salar, los procesos o flujos profundos de esta unidad no tienen incidencia en los potenciales efectos de las extracciones en pozos de alrededor de 30 m sobre los sistemas lagunares superficiales. Es por esta razón que tanto los perfiles hidrogeológicos, como el modelo numérico, representan los primeros 400 m de la Cuenca.

Figura 8-11 Perfil hidrogeológico A-A'



Fuente: Elaboración propia

**Figura 8-12 Perfil hidrogeológico B-B'**

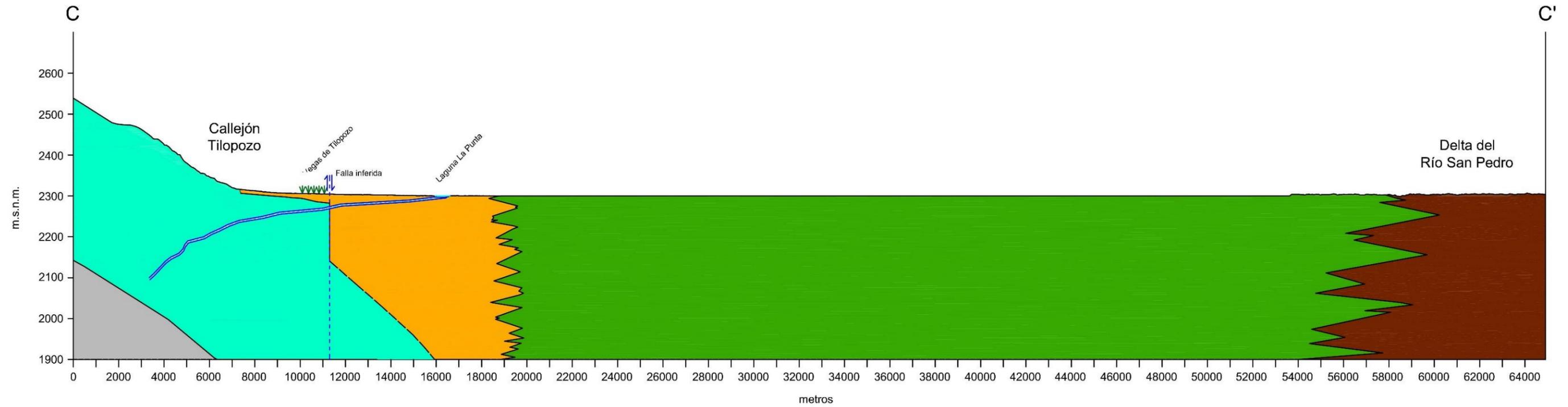


EV 1:1.000  
EH 1:18.000

- |   |   |   |   |
|---|---|---|---|
|  | Unidad Hidrogeológica Núcleo del Salar de Atacama |  | Unidad Hidrogeológica de Baja Permeabilidad |
|  | Unidad Hidrogeológica Zona Marginal               |  | Unidad Hidrogeológica Llano de la Paciencia |
|  | Unidad Hidrogeológica Borde Este                  |  | Interfase Salina                            |
|  | Unidad Hidrogeológica Aluvial del Cordón de Lila  |  | Fallas                                      |

Fuente: Elaboración propia

**Figura 8-13 Perfil hidrogeológico C-C'**



EV 1:1.000  
EH 1:18.000

- Unidad Hidrogeológica Núcleo del Salar de Atacama
- Unidad Hidrogeológica Zona Marginal
- Unidad Hidrogeológica Borde Sur

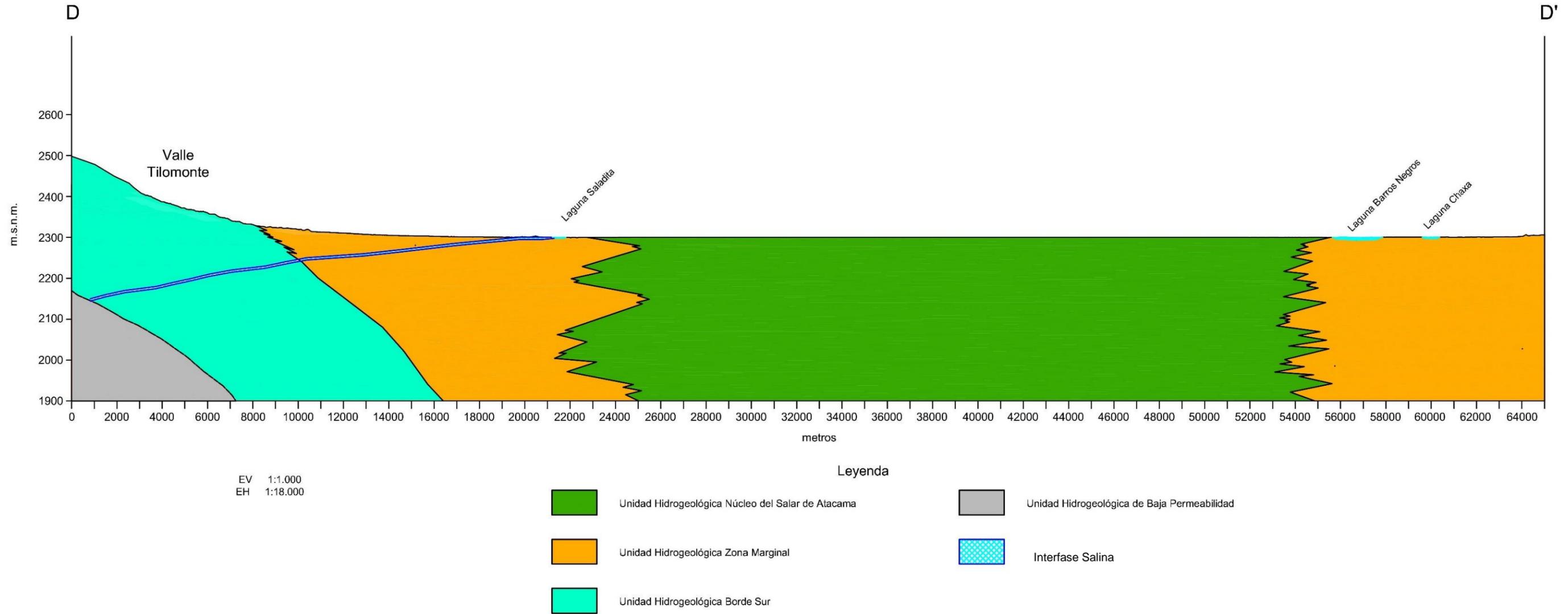
**Leyenda**

- Unidad Hidrogeológica Delta del Río San Pedro
- Unidad Hidrogeológica de Baja Permeabilidad
- Interfase salina



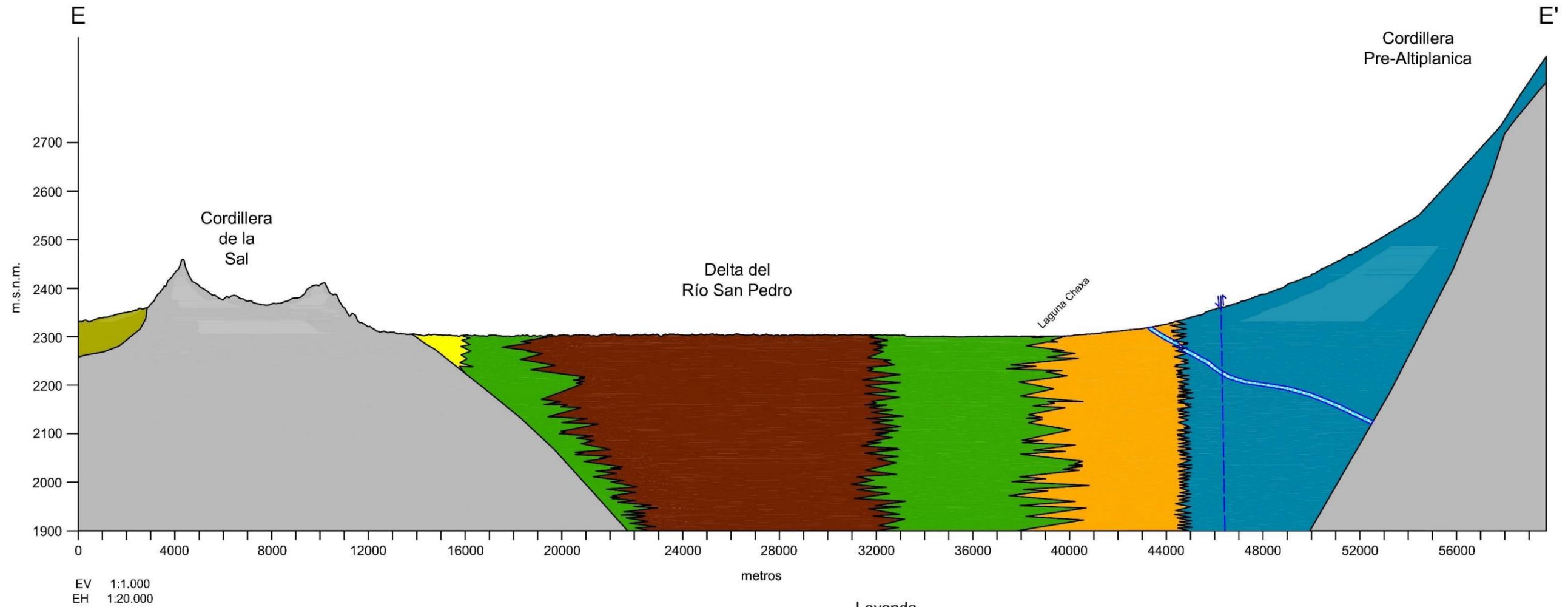
Fuente: Elaboración propia

**Figura 8-14 Perfil hidrogeológico D-D'**



Fuente: Elaboración propia

Figura 8-15 Perfil hidrogeológico E-E'

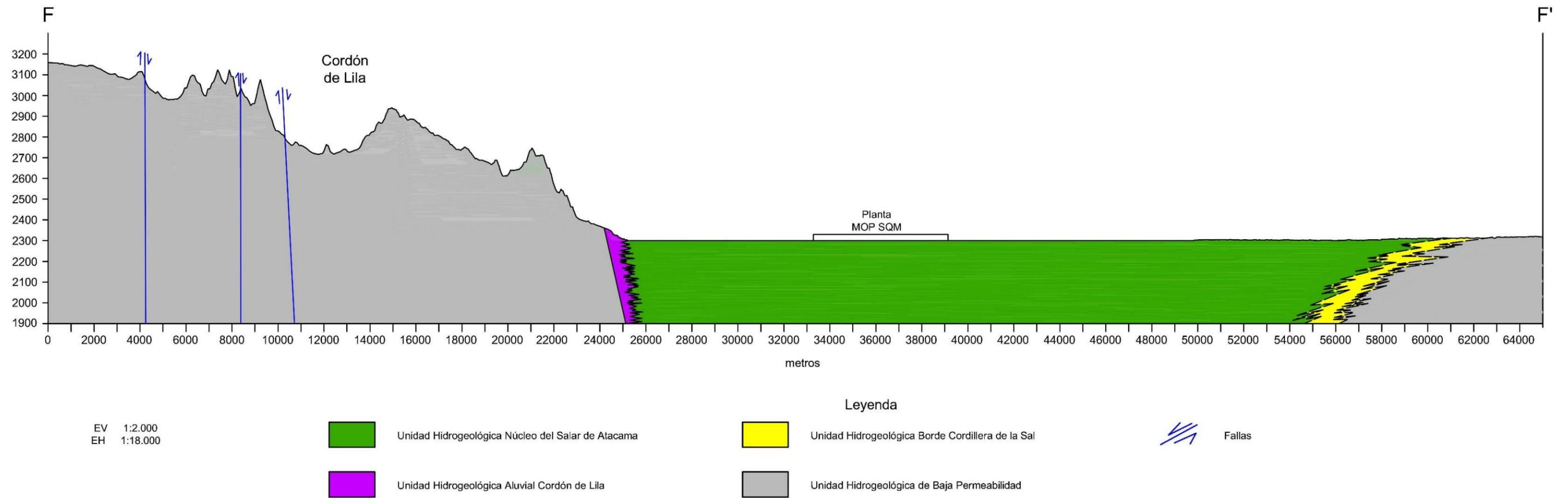


Leyenda

- |   |   |   |  |   |                              |
|---|---|---|--|---|------------------------------|
|  | Unidad Hidrogeológica Núcleo del Salar de Atacama |  | Unidad Hidrogeológica Borde Cordillera de la Sal |  | Falla inferida Jordan (2006) |
|  | Unidad Hidrogeológica Zona Marginal               |  | Unidad Hidrogeológica Llano de la Paciencia      |   |                              |
|  | Unidad Hidrogeológica Delta del Río San Pedro     |  | Unidad Hidrogeológica de Baja Permeabilidad      |   |                              |
|  | Unidad Hidrogeológica Borde Este                  |  | Interfase Salina                                 |   |                              |

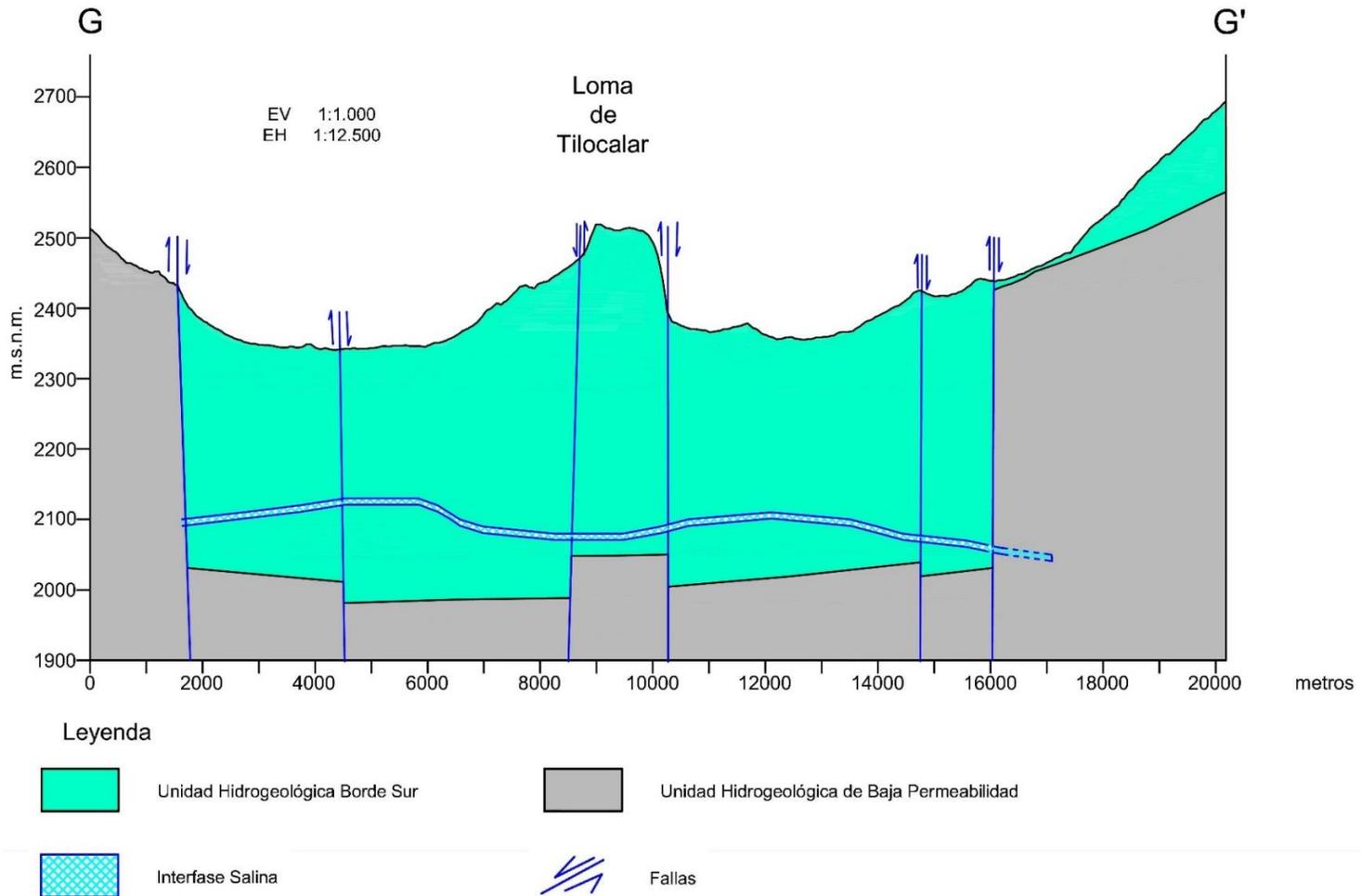
Fuente: Elaboración propia

**Figura 8-16 Perfil hidrogeológico F-F'**



Fuente: Elaboración propia

**Figura 8-17 Perfil hidrogeológico G-G'**



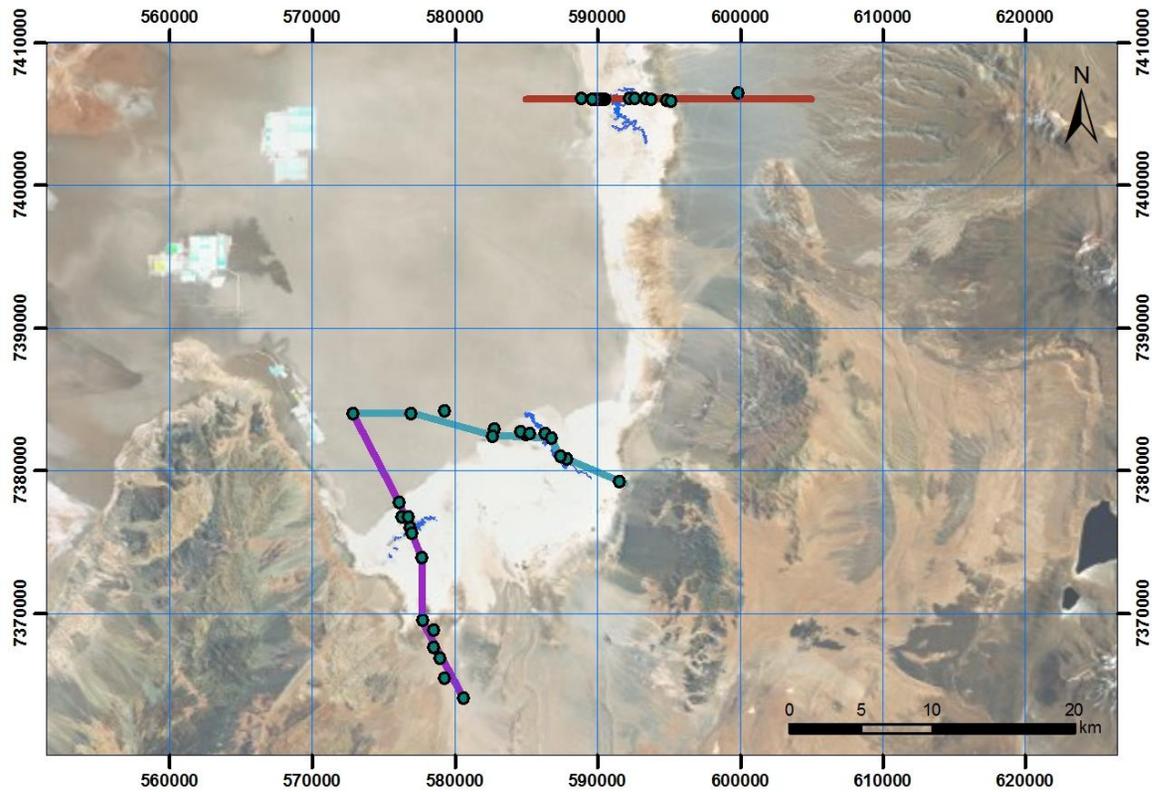
Fuente: Elaboración propia

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

Con el fin de representar con más detalle las características hidrogeológicas en los sectores de interés, próximos a los sistemas lagunares de La Punta-La Brava y de Peine, se han elaborado dos perfiles hidrogeológicos en dichas zonas, cuya ubicación en el Salar se puede observar en la Figura 8-18. En los mismos se representan las unidades hidrogeológicas y se puede ver con más precisión la geometría de la interfase en profundidad. Asimismo, se incorporan gráficos con la evolución de niveles en pozos ubicados en dichos perfiles.

En el perfil hidrogeológico La Punta La Brava, que se presenta en la Figura 8-19, se puede observar que en el pozo MP-04C se ha identificado un espesor de aproximadamente 100 m de roca ignimbrítica. Esta litología, a pesar de estar incluida en la Unidad Hidrogeológica Zona Marginal, no es común y se interpreta como una característica local de esta zona del callejón de Tilopozo. Además aguas abajo no se ha vuelto a encontrar, al menos en los niveles más superficiales, por lo que se supone que se encuentra situada a mayor profundidad debido al combamiento, posiblemente favorecido por fallas, hacia el Núcleo que afecta a estas unidades del borde del Salar. De todas maneras, cabe señalar que esta estructura geológica no afecta al comportamiento hidrogeológico de la zona, pues la interfase salina se sitúa en la posición esperada, y la evolución de niveles en la zona es coherente con el modelo hidrogeológico descrito para la Zona Marginal.

**Figura 8-18 Localización perfiles de detalle de los sistemas lagunares**

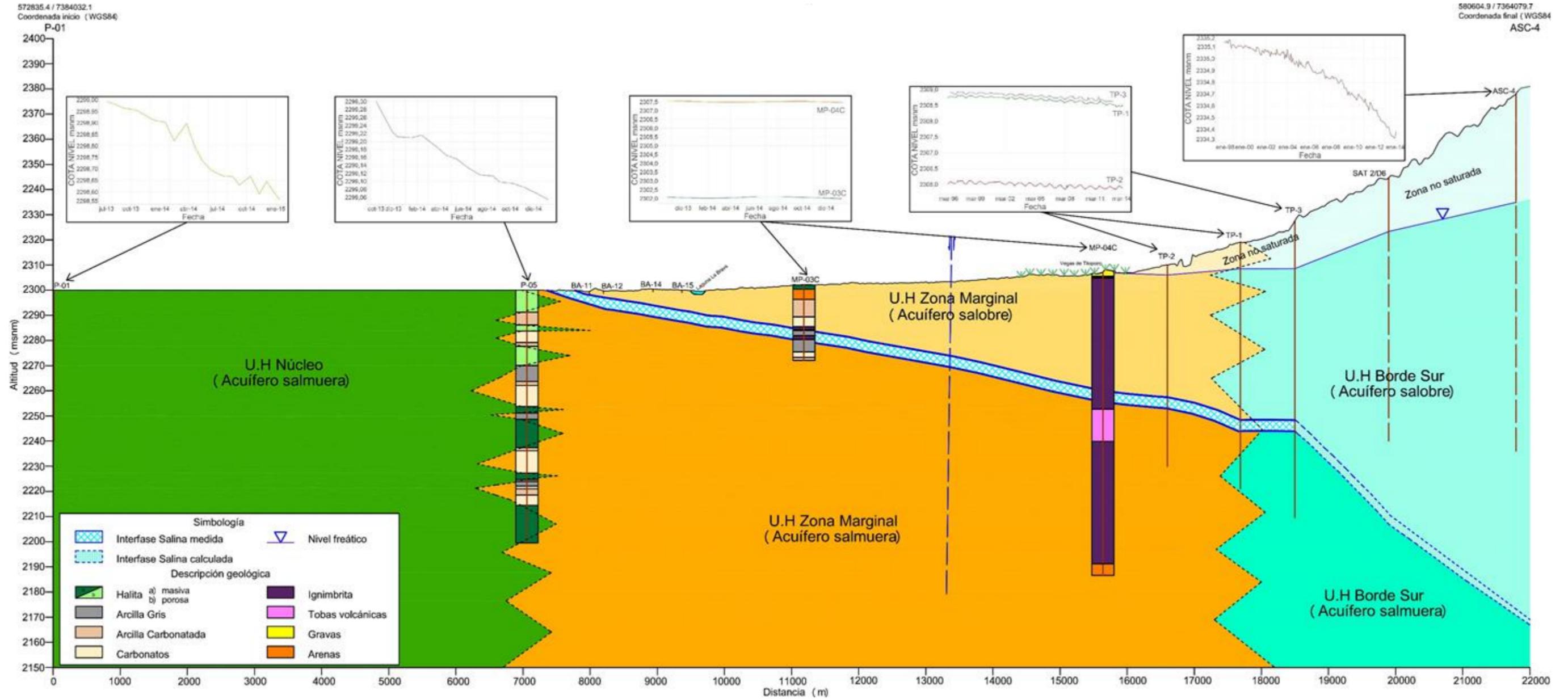


**Leyenda**

- Pozo
- Perfil Hidrogeológico La Punta - La Brava
- Perfil Hidrogeológico Peine
- Perfil Hidrogeológico Quelana
- Lagunas

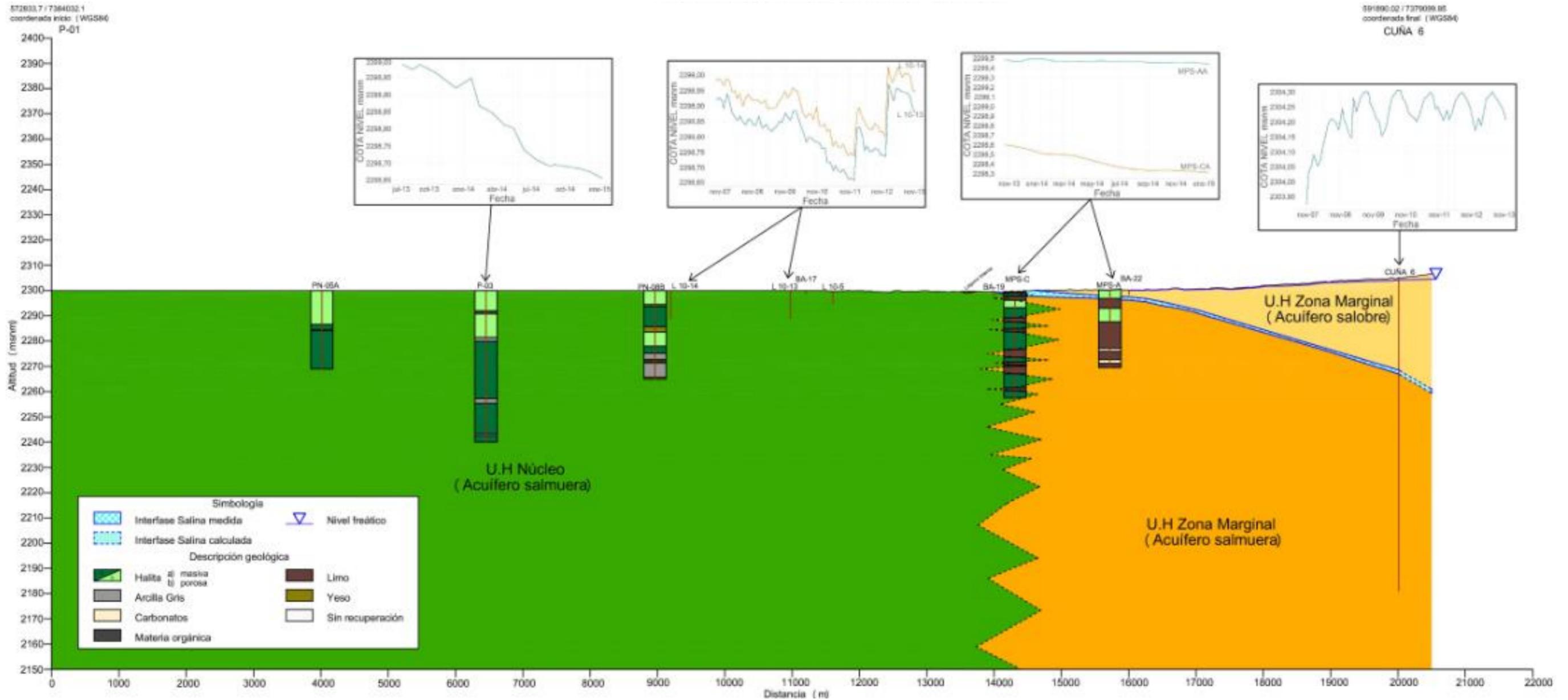
Fuente: Elaboración propia

Figura 8-19 Perfil Hidrogeológico La Punta- La Brava



Fuente: Elaboración propia

Figura 8-20. Perfil hidrogeológico Sistema Lagunar Peine

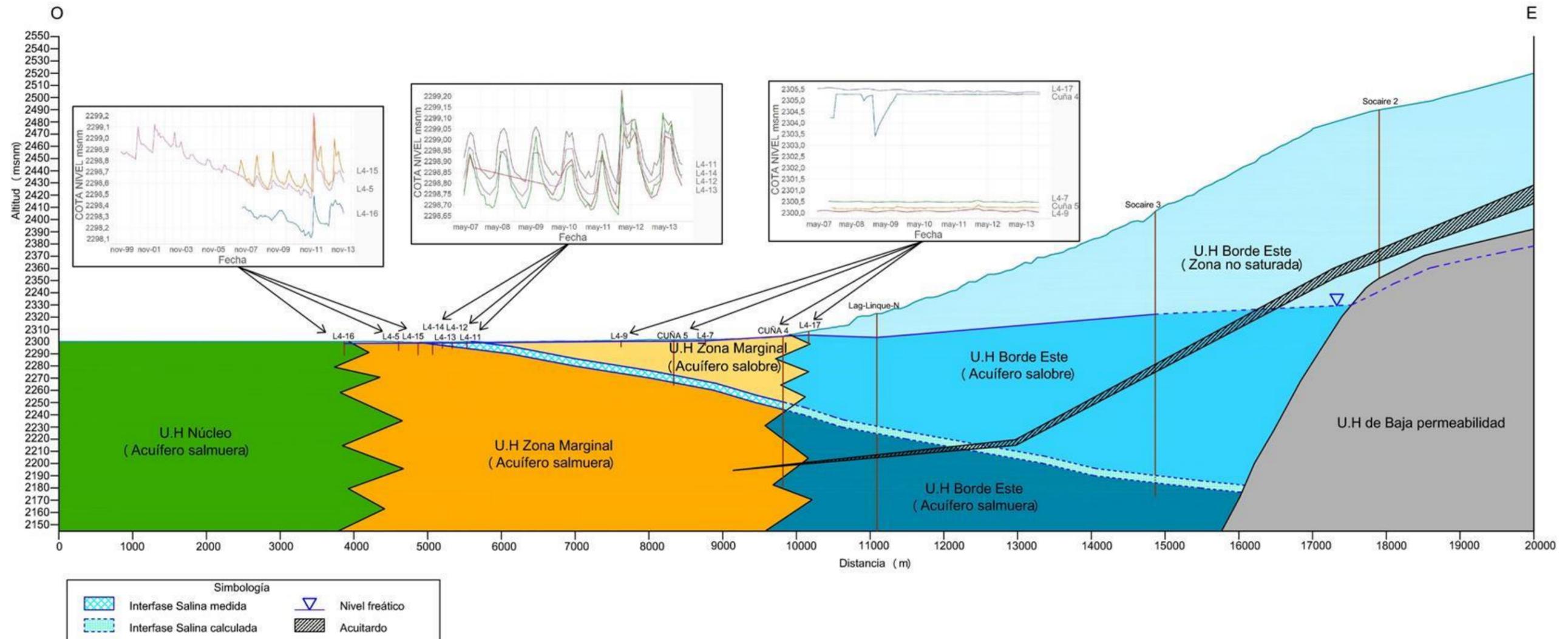


Fuente: Elaboración propia

Figura 8-21. Perfil hidrogeológico Quelana

585000 / 7406052.6  
coordenada inicio (WGS84)

605000 / 7406052.63  
coordenada final (WGS84)



Fuente: Elaboración propia

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

### 8.3 Evolución de niveles y superficie freática

Las aguas subterráneas del Salar de Atacama son monitoreadas por Rockwood y por otras tres compañías (SQM, SLM NX Uno de Peine<sup>5</sup> y Minera Escondida Ltda.). Para este estudio se ha integrado la información propia y la generada por terceros de forma de comprender el comportamiento y evolución de las aguas subterráneas; desarrollar el modelo conceptual y utilizar estos datos para las calibraciones permanente y transiente de los modelos numéricos MODFLOW y SEAWAT que se presentan en el Capítulo 10 Modelos Numéricos, de este Anexo.

Los niveles de agua subterránea son medidos en pozos y piezómetros en forma de profundidad desde el terreno. Conocida la cota del terreno se puede representar el nivel freático en metros sobre el nivel del mar, de manera de tener una referencia común, que los valores sean fácilmente comparables, así poder determinar las direcciones de flujo en los acuíferos.

#### 8.3.1 Redes de monitoreo hídrico

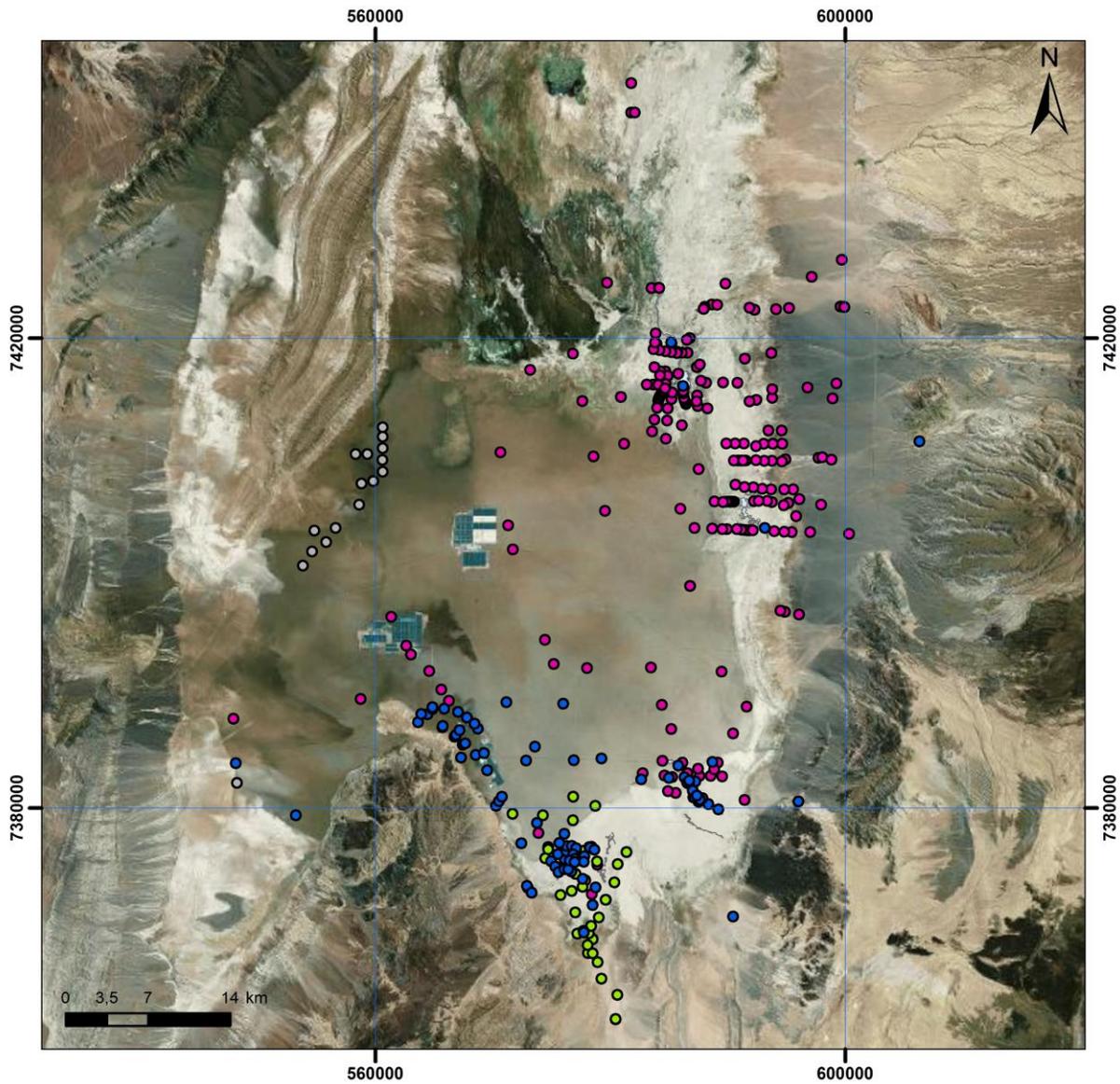
Las aguas subterráneas son de gran importancia en los ecosistemas y en la operación minera en la cuenca del Salar de Atacama. Por este motivo las empresas con intereses en el área tienen implementadas distintas redes de monitoreo en virtud de sus compromisos con la autoridad, generando una gran cantidad de información que en muchos casos queda publicada en el marco de las distintas tramitaciones y compromisos ambientales. De esta manera, esta información considerada pública ha sido recopilada e integrada en este trabajo para una mejor comprensión del comportamiento del recurso hídrico de la cuenca, definir finalmente el modelo conceptual de funcionamiento del sistema, y representarse o utilizarse para la modelación numérica.

Así, en este punto se describen las redes de monitoreo que tienen en la actualidad tanto Rockwood (109 puntos), como las empresas Minera Escondida Ltda (58 puntos), SLM NX Uno de Peine (16 puntos) y SQM (225 puntos), y cuya información ha sido utilizada para el presente EIA. En la Figura 8-22 se muestran estas redes de monitoreo.

---

<sup>5</sup> SQM: Soquimich Comercial S.A.  
 SLM NX Uno de Peine: Sociedad Legal Minera NX-UNO de Peine

**Figura 8-22 Redes de monitoreo actual sobre el recurso hídrico en la cuenca**



**Leyenda**

- Red de monitoreo Rockwood
- Red de monitoreo SML NX-Uno de Peine
- Red de monitoreo Minera Escondida
- Red de monitoreo SQM

Fuente: Elaboración propia

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

### 8.3.1.1 Nomenclatura de medición de niveles

Para homogeneizar cierta nomenclatura utilizada en las diferentes fuentes de información consultadas y evitar posibles confusiones, se presentan a continuación los términos usados en este Anexo 1 de esta Adenda 5 en referencia a los niveles freáticos:

*Cota Collar:* Es la cota altimétrica de referencia (del brocal o de una estaca) para las mediciones realizadas en terreno.

*Cota Terreno:* Es la cota altimétrica a la que se encuentra la superficie del terreno en el punto de medición.

*Stick-Up:* Altura entre la superficie del terreno y el punto de referencia (cota collar del brocal o estaca).

$$\text{Stick-Up} = (\text{Cota}_{\text{Collar}} - \text{Cota}_{\text{Terreno}})$$

*Profundidad Nivel:* Es la medida entre el punto de referencia (cota collar) hasta la superficie de agua/salmuera.

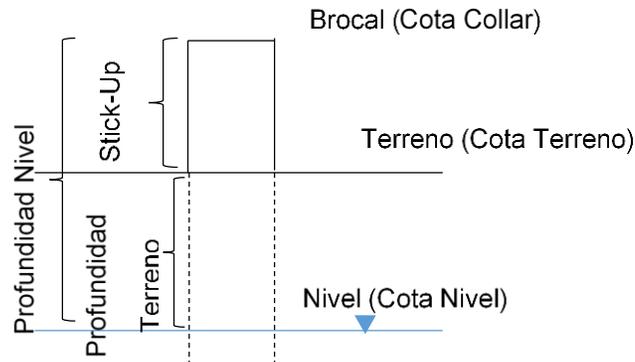
*Profundidad respecto Terreno:* Es la medida entre la superficie del terreno hasta la superficie de agua/salmuera

*Cota Nivel:* Es la cota altimétrica de la superficie de agua/salmuera expresada en m.s.n.m.

$$\text{Cota}_{\text{Nivel}} = (\text{Cota}_{\text{Collar}} - \text{Profundidad}_{\text{Nivel}})$$

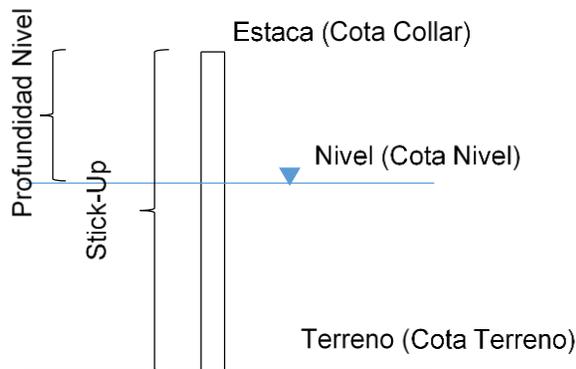
En las siguientes figuras se presentan los esquemas de estos términos para las diferentes tipologías de puntos monitoreados. La Figura 8-23 hace referencia a los pozos y/o piezómetros, la Figura 8-24 a las reglillas, y la Figura 8-25 al caso de zanjas. En este último caso la cota collar y la cota terreno son la misma, por lo que el stick-up es 0.

**Figura 8-23 Nomenclatura usada en pozos y/o piezómetros**



Fuente: Elaboración propia

**Figura 8-24 Nomenclatura usada en reglillas**



Fuente: Elaboración propia

**Figura 8-25 Nomenclatura usada en zanjas**



Fuente: Elaboración propia

Los valores reportados por Rockwood en el “Apéndice G: Registro histórico de niveles” de este Anexo, corresponden a la cota collar de cada punto de medición y la cota nivel de cada medida realizada.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

En el caso de los niveles provenientes de terceros podemos encontrar tres fuentes:

1. **Minera Escondida:** Los datos disponibles en los informes del “Plan de Alerta Temprana para el acuífero de Monturaqui-Negrillar-Tilopozo” corresponden a la cota collar de cada punto de medición y la cota nivel de cada medida realizada. El último informe considerado corresponde al número 13, el que contiene datos hasta diciembre de 2013.
2. **NX UNO de Peine:** Los datos disponibles en el “EIA Proyecto Planta de Producción de Sales de Potasio”, y sus tres adendas, corresponden a la cota terreno de cada punto de medición y la cota nivel de cada medida realizada.
3. **SQM:** Los datos disponibles en los informes del “Plan de Seguimiento Ambiental Hidrogeológico Proyecto Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama” corresponden a las cotas nivel de cada medida realizada, sin entregar información de la cota collar o cota terreno. El último informe considerado corresponde al número 14, el que contiene datos hasta diciembre de 2013.

### 8.3.1.2 Red de monitoreo de Rockwood

La operación actual de Rockwood en el Salar consiste en extraer salmuera desde el Núcleo, y agua salobre del pozo situado en Tilopozo y de la zanja de Tucúcaro. Rockwood reporta trimestralmente a la autoridad el nivel de 29 puntos de observación en el núcleo y de 2 puntos de bombeo de agua industrial, según lo establecido en Resoluciones de Calificación Ambiental<sup>6</sup>.

Además, en el marco de la tramitación de este EIA, Rockwood ha ampliado su red de monitoreo para el levantamiento de mayor información hidrogeológica, de tal forma que en la actualidad, la red de monitoreo se compone de 109 puntos de medición que se desglosan en:

- 36 Piezómetros
- 25 Piezómetros someros (<2 m)
- 8 Multipiezómetros (compuestos por 3 piezómetros cada uno, lo que significa 24 puntos de medición en total)
- 4 Secciones de Aforo
- 4 Limnímetros
- 12 Puntos de agua superficial
- 2 Puntos de bombeo de agua industrial
- 1 zanja
- 1 Estación meteorológica

<sup>6</sup> 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.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

En la Figura 8-26 se muestran la situación de los puntos que conforman la red de monitoreo, diferenciándolos según su tipología.

Los detalles de la perforación y habilitación de los piezómetros, piezómetros someros, y multipiezómetros de nueva construcción se puede consultar en el "Apéndice C: Perforaciones" de este anexo.

Para un mejor entendimiento de lo que se presenta cabe señalar que en el caso de los multipiezómetros éstos están constituidos por tres piezómetros independientes, perforados y habilitados a diferentes profundidades. El nombre de cada multipiezómetro comienza con las iniciales MP o MPS, seguidas de un número correlativo y finaliza con una letra; A, B o C, cuyo significado es el siguiente:

- A: piezómetro perforado y habilitado sobre la posición de la interfase, es por tanto el menos profundo de los tres y sirve para la medición del nivel de agua y muestrear el acuífero de agua salobre.
- B: piezómetro habilitado únicamente por debajo de la posición de la interfase, destinado a la toma de muestras de salmuera y que permite medir el nivel freático del tramo habilitado de piezómetro.
- C: piezómetro perforado hasta una profundidad por debajo de la interfase y a habilitado con ranurado en su totalidad. Se destina a la realización de perfiles de conductividad y temperatura.

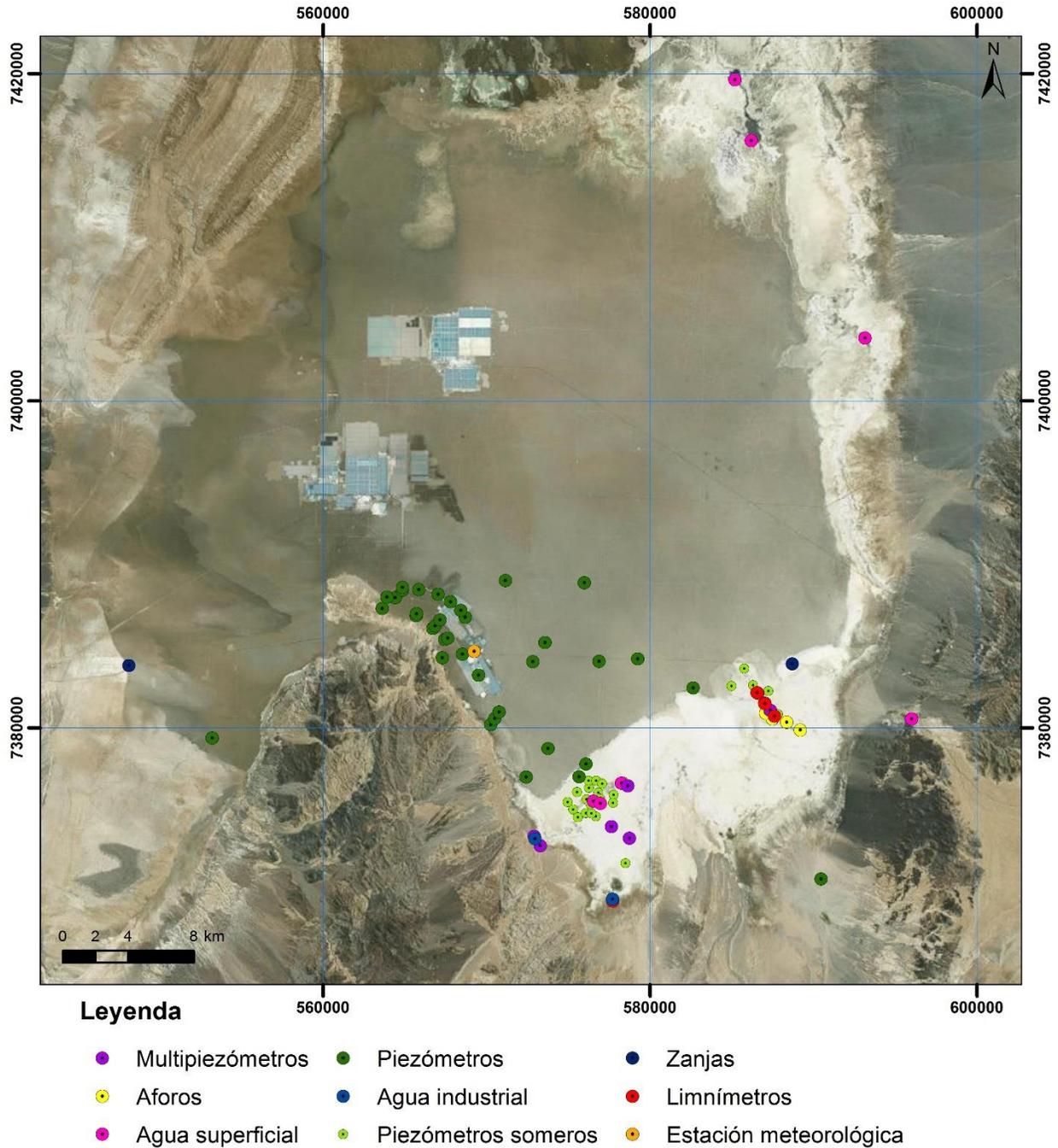
En la Tabla 8-3 se indican las principales características de ubicación de los puntos que constituyen la red de monitoreo de Rockwood, el período de registro y los parámetros que se registran en cada punto (marcados con una "X"). El parámetro "Nivel de Agua" corresponde a nivel freático en el caso de pozos y piezómetros y a nivel limimétrico en Limnómetros. Los análisis químicos incluyen los análisis isotópicos en todas las muestras indicadas en forma mensual hasta Diciembre 2014. A partir de esta fecha, solamente en las lagunas se analizan mensualmente sus composiciones isotópicas, mientras que para el resto de muestras, estos análisis se hacen en forma bianual con los muestreos definidos para los meses de enero y julio.

La estación meteorológica no se incluye en estas tablas dado que sus características y registros se explican con detalle en el Capítulo 6. Hidrología y en el Apéndice E. Hidrología incluido en este anexo.

Los registros del nivel de estos puntos pueden consultarse en el "Apéndice G: Registro Histórico de Niveles"<sup>7</sup> de este Anexo y los resultados de los análisis químicos se encuentran disponibles en el "Apéndice F: Análisis físico-químico e Isotópico del Agua". Se destaca que en el "Apéndice A: Topografía" de este Anexo se entrega mayor información del origen de la cota altimétrica de cada punto (topografía, GPS, estimación, de bibliografía), especificando si la cota ha sido extraída de un DEM, o levantada mediante estación total (E. Total) o GPS Geodésico (GPS Geo).

<sup>7</sup> Aunque el monitoreo continua a la fecha solo se incluyen los registros hasta Diciembre de 2014

**Figura 8-26 Red actual de monitoreo de Rockwood según tipología**



Fuente: Elaboración propia

**Tabla 8-3 Red de monitoreo mensual de Rockwood**

Punto	UTM WGS 84		Cota Terreno (m.s.n.m)		Tipo Punto	Periodo Registro		Parámetros registrados			
	Este	Norte	(m.s.n.m)	Método		Desde	Hasta	Nivel de Agua	Aforo Caudal	Análisis Químico	Perfil Cond-Temp
AFP-01	589.191	7.379.864	2.301,01	DEM 7m	Aforo	jul-14	la fecha	-	x	-	-
AFP-02	588.360	7.380.332	2.300,27	DEM 7m	Aforo	jul-14	la fecha	-	x	-	-
AFP-03	587.491	7.380.533	2.300,23	DEM 7m	Aforo	jul-14	la fecha	-	x	-	-
AFP-04	587.079	7.380.893	2.300,05	DEM 7m	Aforo	jul-14	la fecha	-	x	-	-
Tilopozo*	577.715	7.369.511	2.307,82	GPS Geo	Agua Industrial	ene-01	la fecha	x	-	-	-
Tucúcaro*	572.970	7.373.199	2.302,89	GPS Geo	Agua Industrial	ene-01	la fecha	x	-	-	-
Laguna Interna (Reglilla)	586.549	7.382.138		GPS Geo	Limnómetro	ago-14	la fecha	x	-	-	-
Laguna Salada (Reglilla)	587.625	7.380.707	2.300,41	GPS Geo	Limnómetro	ago-14	la fecha	x	-	-	-
Laguna Saladita (Reglilla)	587.023	7.381.471	2.299,95	GPS Geo	Limnómetro	ago-14	la fecha	x	-	-	-
Tilopozo (Reglilla)	577.733	7.369.390	2.307,09	GPS Geo	Limnómetro	ago-14	la fecha	x	-	-	-
CL-10	567.208	7.386.399	2.300,28	GPS Geo	Piezómetro	may-85	la fecha	x	-	-	-
CL-11	566.728	7.386.065	2.300,57	E. Total	Piezómetro	may-85	la fecha	x	-	-	-
CL-12	566.856	7.386.218	2.300,16	E. Total	Piezómetro	may-85	la fecha	x	-	-	-
CL-13	567.451	7.385.392	2.300,66	E. Total	Piezómetro	may-85	la fecha	x	-	-	-
CL-14	563.624	7.387.299	2.300,24	E. Total	Piezómetro	ago-89	la fecha	x	-	-	-
CL-16	567.648	7.385.680	2.300,30	GPS Geo	Piezómetro	may-85	la fecha	x	-	-	-
CL-17	565.711	7.386.853	2.300,26	GPS Geo	Piezómetro	may-85	la fecha	x	-	-	-
CL-18	565.732	7.386.970	2.300,23	E. Total	Piezómetro	may-85	la fecha	x	-	-	-
CL-2	573.582	7.385.213	2.300,72	E. Total	Piezómetro	jul-85	la fecha	x	-	-	-
CL-26	564.419	7.387.956	2.300,63	E. Total	Piezómetro	ene-01	la fecha	x	-	-	-
CL-27	567.043	7.388.162	2.299,87	E. Total	Piezómetro	ene-01	la fecha	x	-	-	-

\*Se registra además el caudal extraído

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 8-3 Red de monitoreo mensual de Rockwood (Continuación)**

Punto	UTM WGS 84		Cota Terreno (m.s.n.m)		Tipo Punto	Periodo Registro		Parámetros registrados			
	Este	Norte	(m.s.n.m)	Método		Desde	Hasta	Nivel de Agua	Aforo Caudal	Análisis Químico	Perfil Cond- Temp
CL-28	568.539	7.384.505	2.300,88	E. Total	Piezómetro	ene-01	la fecha	x	-	-	-
CL-29	569.513	7.383.212	2.300,85	E. Total	Piezómetro	ene-01	la fecha	x	-	-	-
CL-30	563.915	7.387.985	2.300,30	E. Total	Piezómetro	ene-01	la fecha	x	-	-	-
CL-31	564.860	7.388.412	2.300,28	E. Total	Piezómetro	ene-01	la fecha	x	-	-	-
CL-32	564.868	7.388.580	2.300,18	E. Total	Piezómetro	ene-01	la fecha	x	-	-	-
CL-33	568.710	7.386.741	2.299,82	E. Total	Piezómetro	ene-01	la fecha	x	-	-	-
CL-34	568.431	7.387.167	2.300,07	E. Total	Piezómetro	ene-01	la fecha	x	-	-	-
CL-6	572.422	7.376.975	2.300,04	E. Total	Piezómetro	feb-13	la fecha	x	-	x	-
EXP-2	565.861	7.388.442	2.299,87	E. Total	Piezómetro	ene-01	la fecha	x	-	-	-
MP-01A	578.647	7.376.429	2.300,73	E. Total	Multi- piezómetro	oct-13	la fecha	x	-	x	-
MP-01B	578.650	7.376.430	2.300,69	E. Total		oct-13	la fecha	x	-	x	-
MP-01C	578.646	7.376.429	2.300,73	E. Total		oct-13	la fecha	x	-	-	x
MP-02A	578.747	7.373.235	2.302,78	E. Total	Multi- piezómetro	oct-13	la fecha	x	-	x	-
MP-02B	578.744	7.373.236	2.302,74	E. Total		oct-13	la fecha	x	-	x	-
MP-02C	578.748	7.373.235	2.302,76	E. Total		oct-13	la fecha	x	-	-	x
MP-03A	577.651	7.373.947	2.302,07	E. Total	Multi- piezómetro	oct-13	la fecha	x	-	x	-
MP-03B	577.653	7.373.947	2.302,08	E. Total		oct-13	la fecha	x	-	x	-
MP-03C	577.650	7.373.947	2.302,07	E. Total		oct-13	la fecha	x	-	-	x
MP-04A	577.716	7.369.509	2.308,10	E. Total	Multi- piezómetro	oct-13	la fecha	x	-	x	-
MP-04B	577.717	7.369.513	2.308,03	E. Total		oct-13	la fecha	x	-	x	-
MP-04C	577.713	7.369.510	2.308,11	GPS Geo		oct-13	la fecha	x	-	-	x
MP-05A	572.915	7.373.356	2.302,74	E. Total	Multi- piezómetro	oct-13	la fecha	x	-	x	-
MP-05B	572.913	7.373.356	2.302,70	E. Total		oct-13	la fecha	x	-	-	-
MP-05C	572.916	7.373.355	2.302,72	E. Total		oct-13	la fecha	x	-	-	x

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 8-3 Red de monitoreo mensual de Rockwood (Continuación)**

Punto	UTM WGS 84		Cota Terreno (m.s.n.m)		Tipo Punto	Periodo Registro		Parámetros registrados			
	Este	Norte	(m.s.n.m)	Método		Desde	Hasta	Nivel de Agua	Aforo Caudal	Análisis Químico	Perfil Cond-Temp
MP-06A	573.298	7.372.778	2.304,81	E. Total	Multi-piezómetro	oct-13	la fecha	x	-	-	-
MP-06B	573.296	7.372.777	2.304,77	E. Total		oct-13	la fecha	x	-	x	-
MP-06C	573.299	7.372.779	2.304,86	E. Total		oct-13	la fecha	x	-	-	x
MPS-AA	587.361	7.381.053	2.299,70	GPS Geo	Multi-piezómetro	oct-13	la fecha	x	-	x	-
MPS-AB	587.360	7.381.056	2.299,62	GPS Geo		oct-13	la fecha	x	-	x	-
MPS-AC	587.361	7.381.052	2.299,75	GPS Geo		oct-13	la fecha	x	-	-	x
MPS-CA	586.725	7.382.313	2.299,09	GPS Geo	Multi-piezómetro	oct-13	la fecha	x	-	-	-
MPS-CB	586.723	7.382.312	2.299,18	GPS Geo		oct-13	la fecha	x	-	x	-
MPS-CC	586.726	7.382.313	2.299,13	GPS Geo		oct-13	la fecha	x	-	-	x
P-01	572.834	7.384.032	2.300,29	E. Total	Piezómetro	jul-13	la fecha	x	-	x	-
P-02	572.433	7.376.977	2.300,00	E. Total	Piezómetro	jul-13	la fecha	x	-	-	-
P-03	579.260	7.384.212	2.300,21	E. Total	Piezómetro	jul-13	la fecha	x	-	x	-
P-04	571.158	7.389.005	2.300,01	E. Total	Piezómetro	sep-13	la fecha	x	-	-	-
P-05	576.091	7.377.780	2.299,36	E. Total	Piezómetro	oct-13	la fecha	x	-	x	-
PN-05B	576.901	7.384.044	2.300,19	GPS Geo	Piezómetro	oct-14	la fecha	x	-	-	-
PN-08A	582.633	7.382.424	2.300,09	GPS Geo	Piezómetro	oct-14	la fecha	x	-	-	-
PN-14B	573.777	7.378.721	2.299,85	GPS Geo	Piezómetro	oct-14	la fecha	x	-	-	-
PN-16B	575.663	7.377.001	2.299,85	GPS Geo	Piezómetro	oct-14	la fecha	x	-	-	-
S-1	570.270	7.380.179	2.300,28	E. Total	Piezómetro	oct-14	la fecha	x	-	-	-
S-2	570.521	7.380.563	2.300,23	E. Total	Piezómetro	oct-14	la fecha	x	-	-	-
S-3	570.775	7.380.949	2.300,39	E. Total	Piezómetro	feb-13	la fecha	x	-	-	-
S-4	575.984	7.388.860	2.300,14	E. Total	Piezómetro	mar-13	la fecha	x	-	-	-
TPZ - 6S	578.506	7.371.715	2.303,16	GPS Geo	Piezómetro	mar-13	la fecha	x	-	x	-
TS-8	590.465	7.370.743	2.341,19	GPS Geo	Piezómetro	mar-13	la fecha	x	-	x	x
Well IK	567.801	7.387.700	2.299,88	E. Total	Piezómetro	may-85	la fecha	x	-	-	-

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 8-3 Red de monitoreo mensual de Rockwood (Continuación)**

Punto	UTM WGS 84		Cota Terreno (m.s.n.m)		Tipo Punto	Periodo Registro		Parámetros registrados			
	Este	Norte	(m.s.n.m)	Método		Desde	Hasta	Nivel de Agua	Aforo Caudal	Análisis Químico	Perfil Cond- Temp
BA - 01	574.964	7.375.461	2.299,96	E. Total	P. Somero	sep-13	la fecha	x	-	-	-
BA - 02	575.305	7.375.003	2.300,26	E. Total	P. Somero	ago-13	la fecha	x	-	-	-
BA - 03	575.594	7.374.516	2.300,37	E. Total	P. Somero	ago-13	la fecha	x	-	-	-
BA - 04	576.096	7.374.776	2.300,52	E. Total	P. Somero	ago-13	la fecha	x	-	-	-
BA - 05	576.373	7.375.324	2.300,33	E. Total	P. Somero	may-13	la fecha	x	-	-	-
BA - 06	576.120	7.375.626	2.300,31	E. Total	P. Somero	may-13	la fecha	x	-	-	-
BA - 07	578.406	7.376.692	2.300,28	E. Total	P. Somero	may-13	la fecha	x	-	-	-
BA - 08	577.783	7.375.887	2.300,48	E. Total	P. Somero	may-13	la fecha	x	-	-	-
BA - 09	575.545	7.376.062	2.300,09	E. Total	P. Somero	sep-13	la fecha	x	-	-	-
BA - 10	576.268	7.376.317	2.299,85	E. Total	P. Somero	sep-13	la fecha	x	-	-	-
BA - 11	576.254	7.376.750	2.300,01	E. Total	P. Somero	sep-13	la fecha	x	-	-	-
BA - 12	576.707	7.376.759	2.299,86	E. Total	P. Somero	ago-13	la fecha	x	-	-	-
BA - 13	577.081	7.376.565	2.300,00	E. Total	P. Somero	ago-13	la fecha	x	-	-	-
BA - 14	576.842	7.376.029	2.300,27	E. Total	P. Somero	jun-13	la fecha	x	-	-	-
BA - 15	576.968	7.375.650	2.300,01	E. Total	P. Somero	jun-13	la fecha	x	-	-	-
BA - 16	577.746	7.375.405	2.301,10	E. Total	P. Somero	may-13	la fecha	x	-	-	-
BA - 17	584.997	7.382.542	2.299,86	E. Total	P. Somero	jun-13	la fecha	x	-	-	-
BA - 18	585.778	7.383.610	2.299,61	E. Total	P. Somero	jun-13	la fecha	x	-	-	-
BA - 19	586.321	7.382.592	2.299,79	E. Total	P. Somero	jun-13	la fecha	x	-	-	-
BA - 20	587.247	7.382.250	2.299,81	E. Total	P. Somero	jun-13	la fecha	x	-	-	-
BA - 21	587.159	7.380.905	2.300,39	E. Total	P. Somero	may-13	la fecha	x	-	-	-
BA - 22	587.837	7.380.817	2.300,40	E. Total	P. Somero	sep-13	la fecha	x	-	-	-
BA - 23	586.684	7.382.108	2.299,83	E. Total	P. Somero	may-13	la fecha	x	-	-	-
BA - 24	576.693	7.374.573	2.300,90	E. Total	P. Somero	ago-13	la fecha	x	-	-	-
BA - 25	576.424	7.374.761	2.300,71	E. Total	P. Somero	ago-13	la fecha	x	-	-	-

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 8-3 Red de monitoreo mensual de Rockwood (Continuación)**

Punto	UTM WGS 84		Cota Terreno (m.s.n.m)		Tipo Punto	Periodo Registro		Parámetros registrados			
	Este	Norte	(m.s.n.m)	Método		Desde	Hasta	Nivel de Agua	Aforo Caudal	Análisis Químico	Perfil Cond-Temp
Lag Aguas de Quelana	593.163	7.403.837	2.299,43	DEM 7m	Superficial	may-13	la fecha	-	-	x	-
Lag Barros Negros	586.194	7.415.908	2.299,43	DEM 7m	Superficial	ago-13	la fecha	-	-	x	-
Lag Chaxas	585.201	7.419.629	2.300,27	DEM 7m	Superficial	feb-13	la fecha	-	-	x	-
Laguna Interna	586.605	7.382.101	2.299,78	GPS Geo	Superficial	feb-13	la fecha	-	-	x	-
Laguna La Brava	576.553	7.375.506	2.299,35	DEM 7m	Superficial	may-13	la fecha	-	-	x	-
Laguna La Brava Punto C	576.965	7.375.372	2.299,98	GPS Geo	Superficial	feb-13	la fecha	x	-	x	-
Laguna La Punta	578.263	7.376.600	2.300,18	DEM 7m	Superficial	mar-13	la fecha	-	-	x	-
Laguna Salada	587.586	7.380.722	2.300,85	GPS Geo	Superficial	feb-13	la fecha	-	-	x	-
Laguna Saladita	587.020	7.381.497	2.300,19	GPS Geo	Superficial	feb-13	la fecha	-	-	x	-
Quebrada Camar	606.314	7.411.194	2.729,00	DEM 90	Superficial	mar-13	la fecha	-	-	x	-
Vertiente Peine	596.010	7.380.542	2.446,50	DEM 90	Superficial	feb-13	la fecha	-	x	x	-
AnterrepresaTilomonte	591.962	7.367.618	2.429,01	DEM 90	Superficial	feb-13	la fecha	-	x	x	-
Zanja Camino a Peine	588.696	7.383.905	2.300,26	E. Total	Zanja	ene-01	la fecha	x	-	-	-

Fuente: Elaboración propia

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

### 8.3.1.3 Red de monitoreo de Minera Escondida

Minera Escondida en conjunto con la Compañía Minera Zaldívar explotan los acuífero de Negrillar y Monturaqui, situados en el Sur de la Cuenca del Salar de Atacama. Minera Escondida reporta los resultados de su monitoreo en el marco del *“Plan de Alerta Temprana para el acuífero de Monturaqui-Negrillar-Tilopozo”* que emite como compromiso relativo al *“Proyecto de lixiviación de óxidos de cobre y aumento de capacidad de tratamiento de mineral sulfatado”*, mientras que Compañía Minera Zaldívar no tiene compromisos de informar directamente, sino que a través de Minera Escondida, lo que queda incluido en lo reportado por este último.

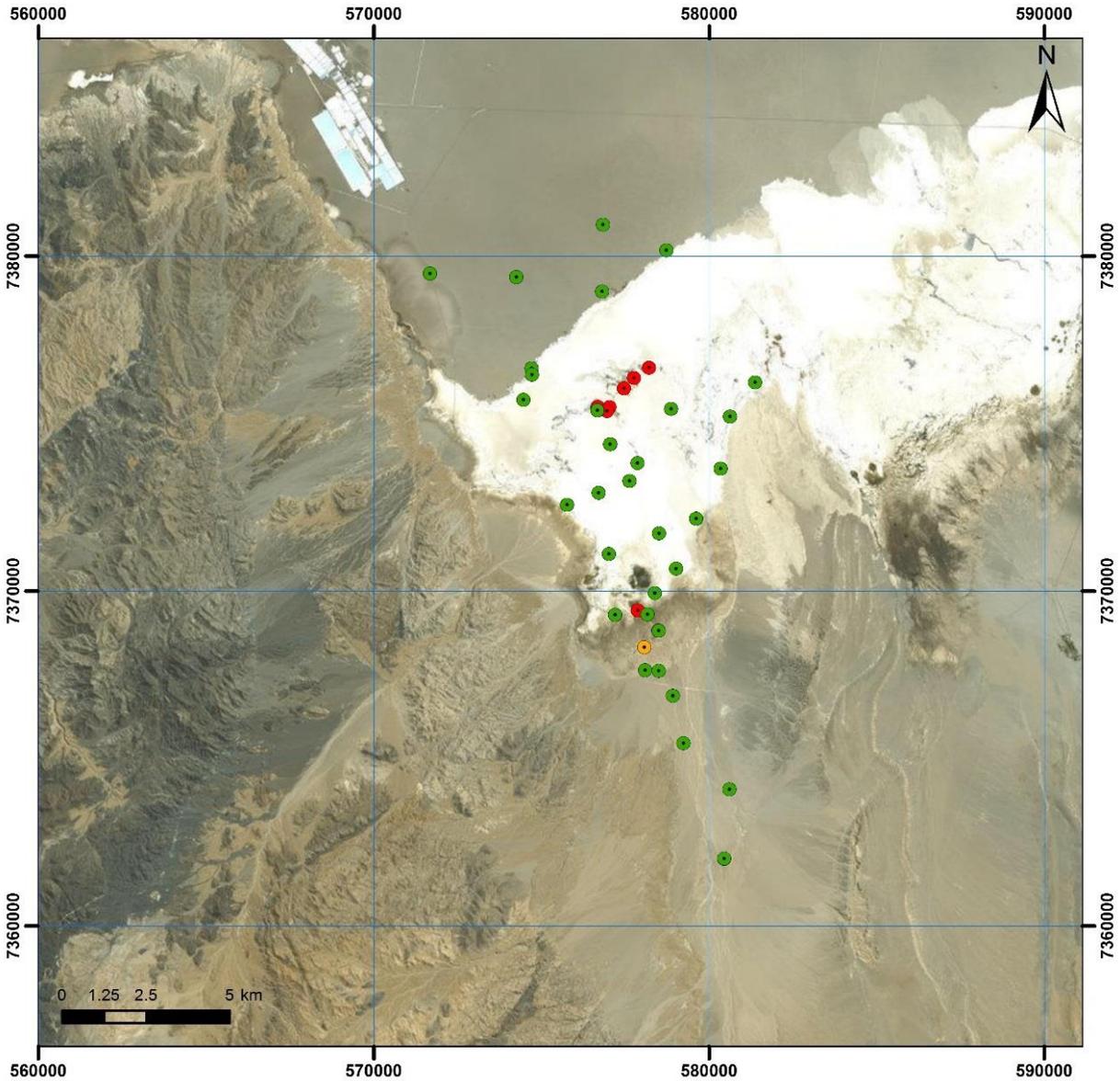
Esta red de monitoreo está constituida por un importante número de puntos, muchos de ellos situados a gran distancia del Salar, insertos en el acuífero de Negrillar-Monturaqui-Tilopozo. Por este motivo solo se han recopilado los datos de 58 puntos situados en el área de modelación (Excepto TE-8 y TM-6, situados fuera pero muy próximos a esta área) (Figura 8-22), que se desglosan en:

- 50 piezómetros
- 7 limnímetros
- 1 estación meteorológica

El detalle de la ubicación de cada estos puntos de monitoreo por tipo de punto puede observarse en la Figura 8-27 La mayoría de los puntos en la zona marginal corresponden a piezómetros someros con registros mensuales desde el año 2000 en adelante, en los limnímetros se registra el nivel mensual desde el año 1994 y en la estación meteorológica desde 1999.

Las principales características de estos puntos junto con sus series históricas pueden consultarse el "Apéndice G: Registro histórico de niveles" incluido en este Anexo. La información de calidad química disponibles puede consultarse en el "Apéndice F: Análisis físico-químico e Isotópico del Agua". La información relativa a la estación meteorológica se encuentra en el Capítulo 6 y en el Apéndice E: Hidrología.

**Figura 8-27 Red de monitoreo de Minera Escondida según tipología**



**Leyenda**

- Red de monitoreo Minera Escondida**
- Piezómetro
  - Estación meteorológica
  - Limnómetro

Fuente: Elaboración propia

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

#### 8.3.1.4 Red de monitoreo de SLM NX Uno de Peine

La compañía minera SLM NX Uno de Peine se encuentra a la fecha tramitando ambientalmente el proyecto "Planta de Producción de Sales de Potasio", razón por la cual sólo se dispone de registros de nivel incluidos en la Adenda 2 del Estudio de Impacto Ambiental de dicho proyecto. Los registros corresponden a 16 piezómetros, que se ubican en el sector Oeste del núcleo del Salar, como se observan en la Figura 8-22. Se dispone de registros de los años 2009 y 2010 en estos puntos.

Las principales características de estos puntos junto con sus series históricas pueden consultarse en el "Apéndice G: Registro histórico de niveles" incluido en este Anexo

#### 8.3.1.5 Red de monitoreo de SQM

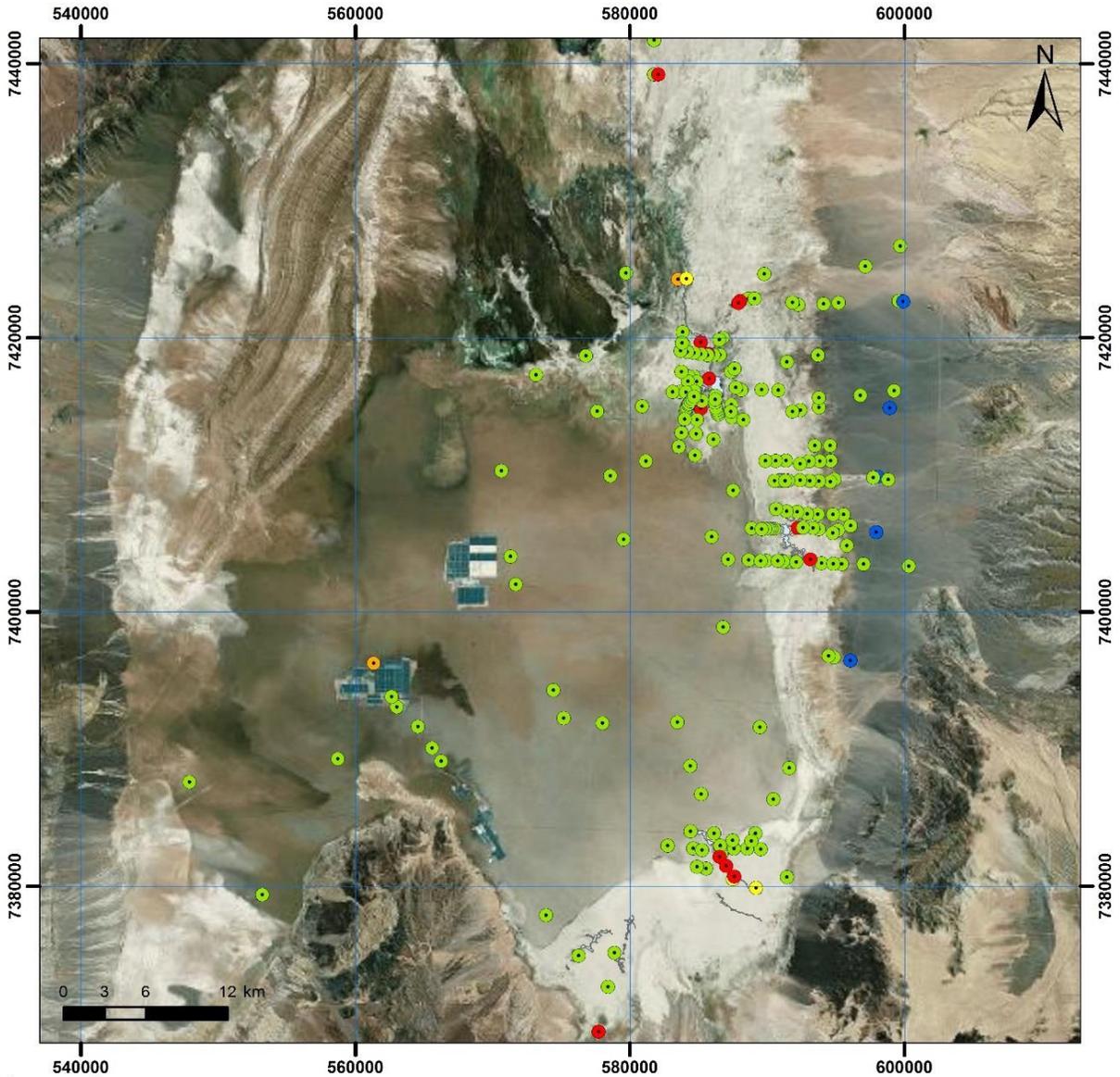
La empresa SQM explota salmuera del núcleo de halita del Salar y agua de los acuíferos del borde Este. SQM reporta los resultados de su monitoreo en el marco del "Plan de Seguimiento Ambiental Hidrogeológico." que emite como compromiso relativo al "Proyecto Cambios y Mejoras en la Operación Minera en Salar de Atacama " Esta red de monitoreo está compuesta por 225 puntos de monitoreo (Figura 8-22) que se desglosan en:

- 112 piezómetros someros
- 84 piezómetros profundos
- 5 pozos de bombeo de agua industrial
- 18 limnímetros
- 4 estaciones de aforo de aguas superficiales
- 2 estaciones meteorológicas

El detalle de la ubicación de cada estos puntos de monitoreo por tipo de punto puede observarse en la Figura 8-28. La mayoría de los puntos tiene registro a partir del año 2007 si bien existe un número menor de puntos con registros anteriores (1994-2006).

Las principales características de estos puntos junto con sus series históricas pueden consultarse el "Apéndice G: Registro histórico de niveles" incluido en este Anexo. La información de calidad química disponibles puede consultarse en el "Apéndice F: Análisis físico-químico e Isotópico del Agua".

**Figura 8-28 Red de monitoreo de SQM según tipología**



**Leyenda**

**Red de monitoreo SQM**

- Aforo
- Limnómetro
- Agua Industrial
- Estación Meteorológica
- Piezómetros y Piezómetros someros

Fuente: Elaboración propia

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

### 8.3.2 Evolución de niveles

El análisis de la evolución de niveles de un acuífero permite entender los cambios en el volumen almacenado producto de la recarga y descarga por la meteorología del área, y también reconocer los efectos y comportamientos de un acuífero, de agua o salmuera, frente a la explotación. Así, la distribución espacial de niveles, que puede ser distinta en el tiempo, determinará las direcciones de flujo del área, y permitirá comprender la dinámica del sistema. Esta información cobra especial relevancia para el desarrollo de modelos numéricos predictivos, los cuales se basan en el comportamiento histórico de niveles para estimar la respuesta futura del sistema frente a nuevos escenarios de explotación.

De esta manera, para el análisis del comportamiento histórico de niveles en la cuenca del Salar de Atacama, con énfasis al área de modelación, la información de evolución de los niveles freáticos se ha agrupado en tres zonas que presentan tendencias similares:

- Núcleo de halita.
- Zona Marginal.
- Acuíferos detríticos del Borde Este y Sur.

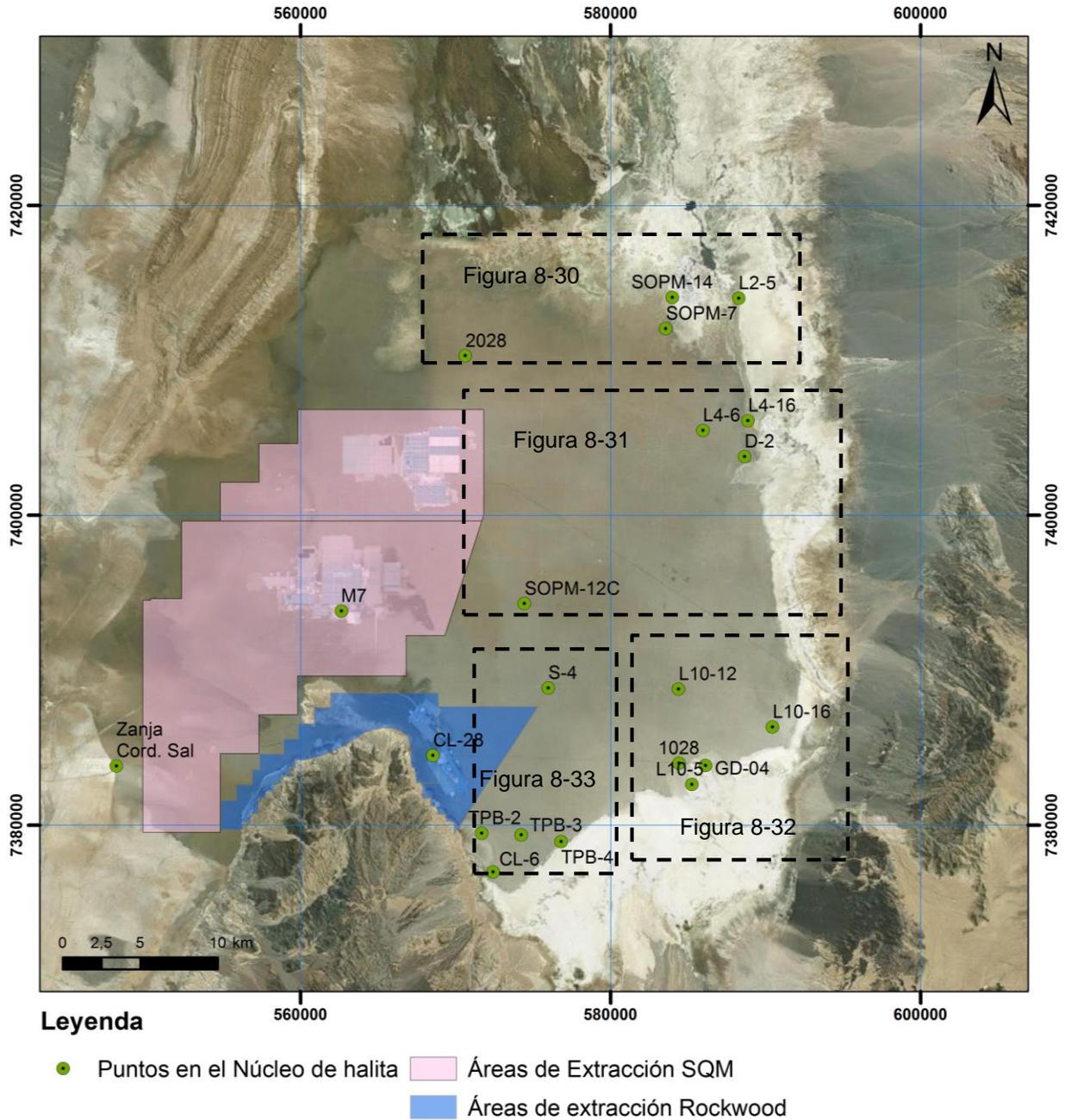
#### 8.3.2.1 Evolución de niveles freáticos en el Núcleo de halita

La extracción de salmuera para su aprovechamiento económico, ha provocado un descenso en el nivel freático en el núcleo en las cercanías de los campos de extracción de SQM y de Rockwood. Por esta razón existe un gran número de pozos en los que se monitorea el nivel de salmuera en el núcleo del Salar cuyos registros de evolución de niveles recopilados para este estudio, se pueden consultar en el "Apéndice G: Registro histórico de niveles" incluido en este Anexo.

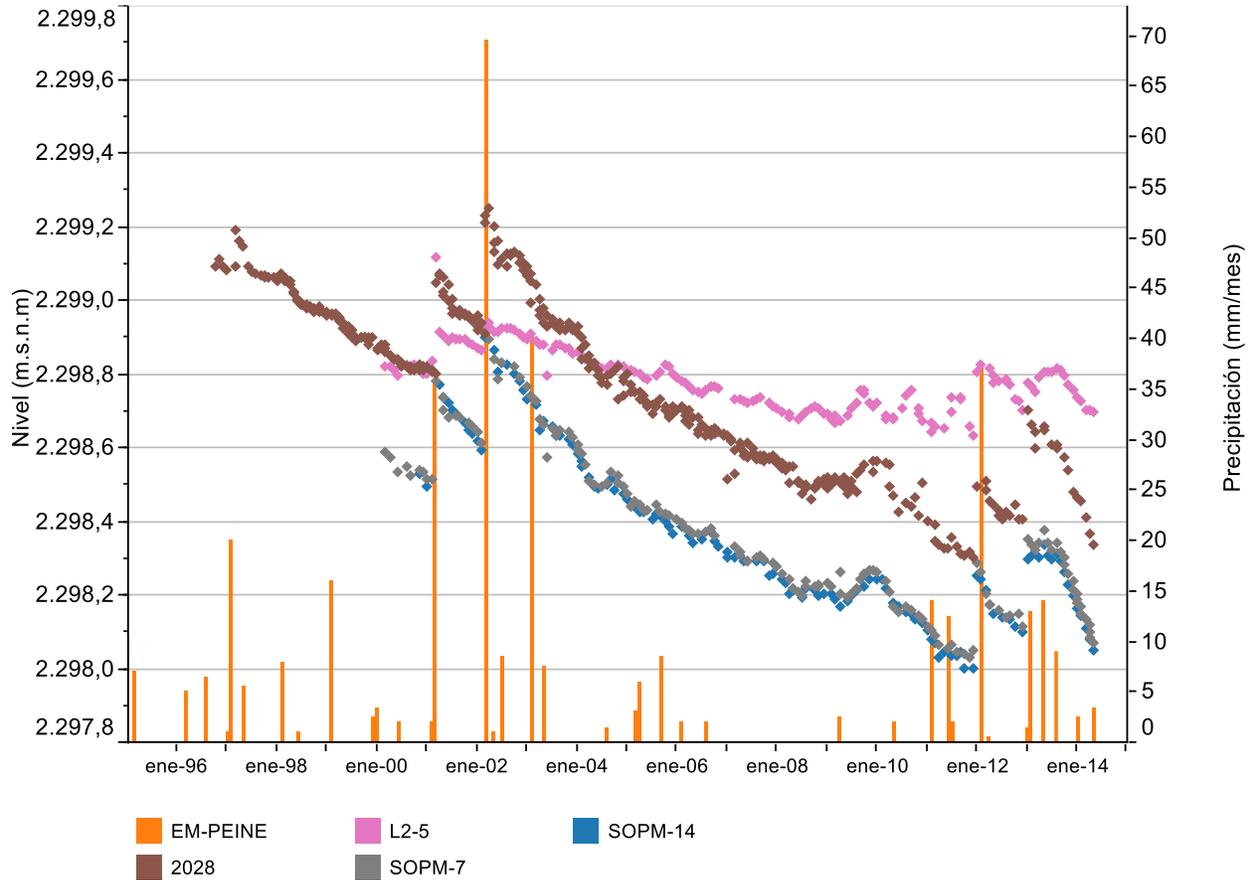
A modo de ejemplo, desde la Figura 8-30 hasta la Figura 8-36 se muestran los registros del nivel en algunos puntos representativos del Núcleo, cuya ubicación se ha representado en la Figura 8-29, conjuntamente con los datos históricos de precipitación en la Estación Meteorológica de Peine (EM-PEINE).

Cabe señalar que los pozos GD-04, L10-8, L10-6, L10-7, L10-3, entre otros, en la clasificación de SQM están descritos como pozos de "Zona Marginal" ya que se encuentran sobre la "Costra de cloruro clara por mayor aporte de agua" según Moraga et al (1974). Sin embargo, el monitoreo químico de esa zona muestra que sólo se encuentra salmuera y asimismo, la dinámica de la evolución de niveles es similar a la observada en otros pozos del núcleo. Por estos motivos, en este trabajo se han considerado dentro del análisis de comportamiento de niveles del núcleo.

**Figura 8-29 Ubicación pozos analizados con registro histórico de niveles en el núcleo**



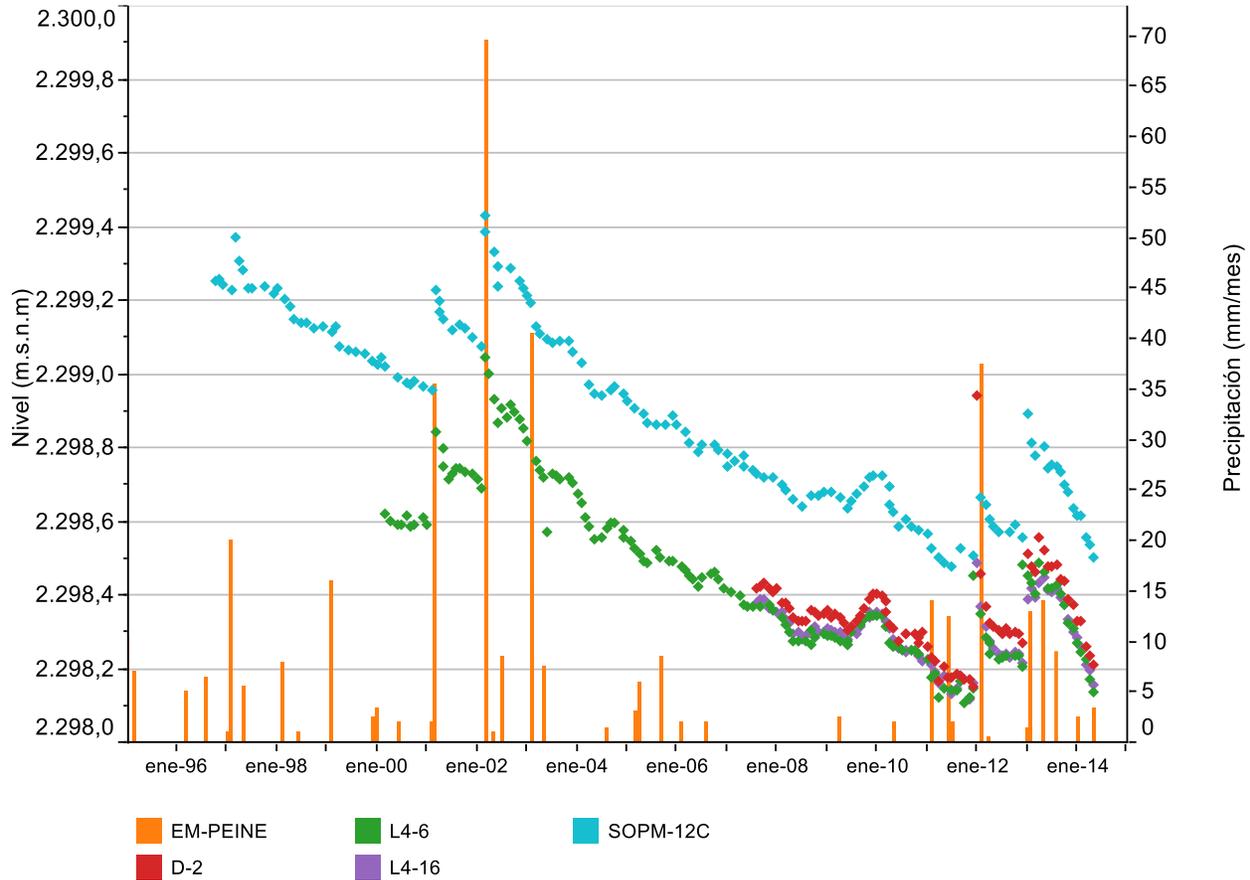
**Figura 8-30 Evolución niveles de Salmuera**



Fuente: Elaboración propia con datos de terceros

En la Figura 8-30 se presenta la evolución de niveles en pozos situados en el Noreste del núcleo del Salar. Se observa como el punto L2-5 presenta una tendencia de descenso menor que los otros puntos presentados debido a que se sitúa a una mayor distancia de la zona de extracción. También se observa como los eventos mayores de precipitación provocan aumento de nivel en todos estos puntos.

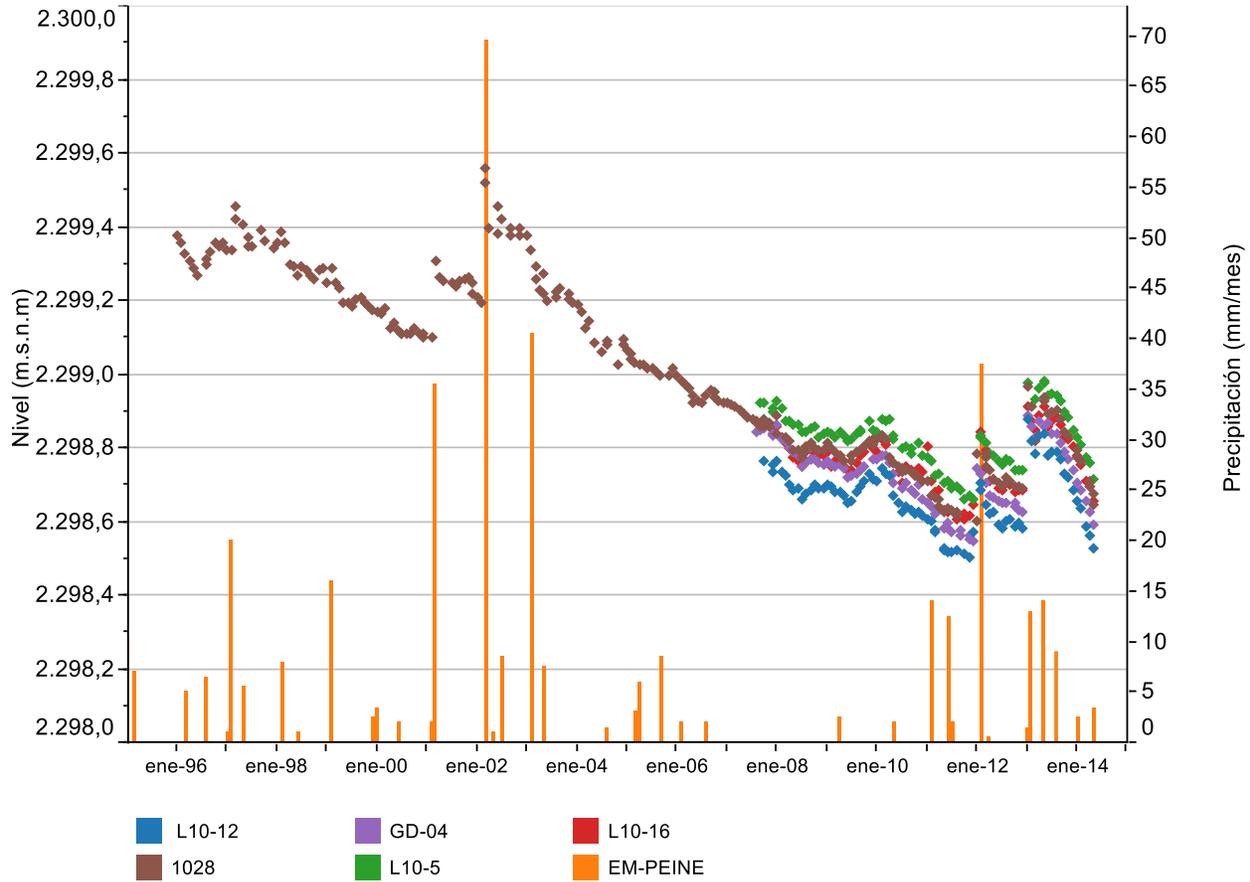
**Figura 8-31 Evolución niveles de Salmuera (2)**



Fuente: Elaboración propia con datos de terceros

En la Figura 8-31 se presenta la evolución de niveles en pozos situados en el este del núcleo del Salar. Igual que en la Figura 8-30 se observa como los eventos mayores de precipitación provocan aumento de nivel en todos estos puntos.

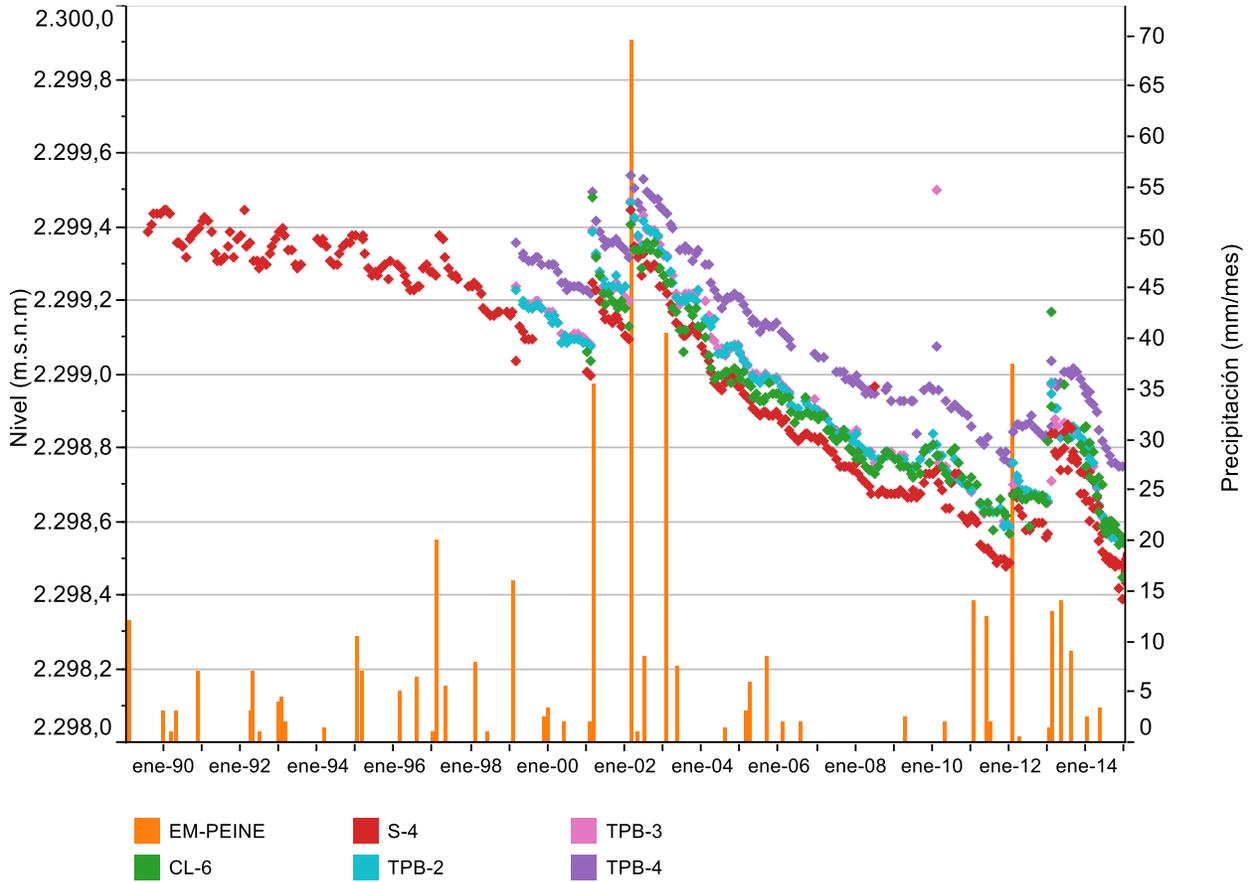
**Figura 8-32 Evolución niveles de Salmuera (3)**



Fuente: Elaboración propia con datos de terceros

En la Figura 8-32 se presenta la evolución de niveles en pozos situados en el sureste del núcleo del Salar. Los puntos en esta zona presentan niveles similares lo que indica bajo gradiente hidráulico de esta zona. Igual que en la Figura 8-30 se observa como los eventos mayores de precipitación provocan aumento de nivel en todos estos puntos.

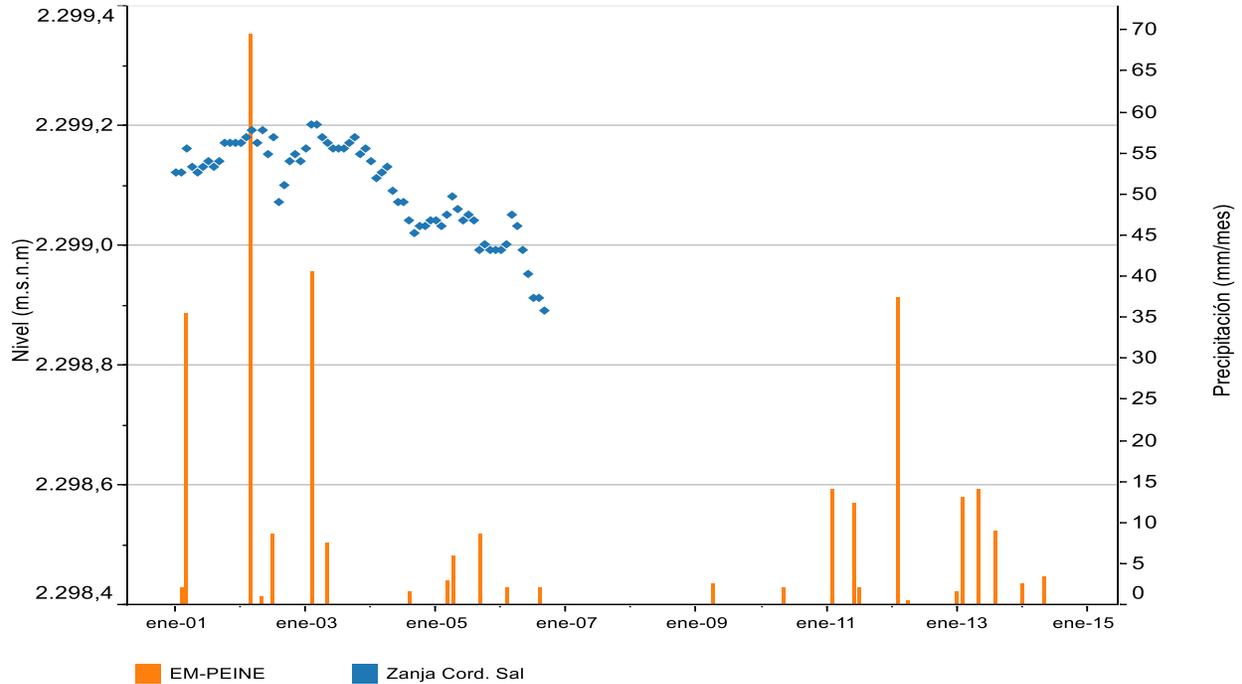
**Figura 8-33 Evolución niveles de Salmuera (4)**



Fuente: Elaboración propia con datos de terceros

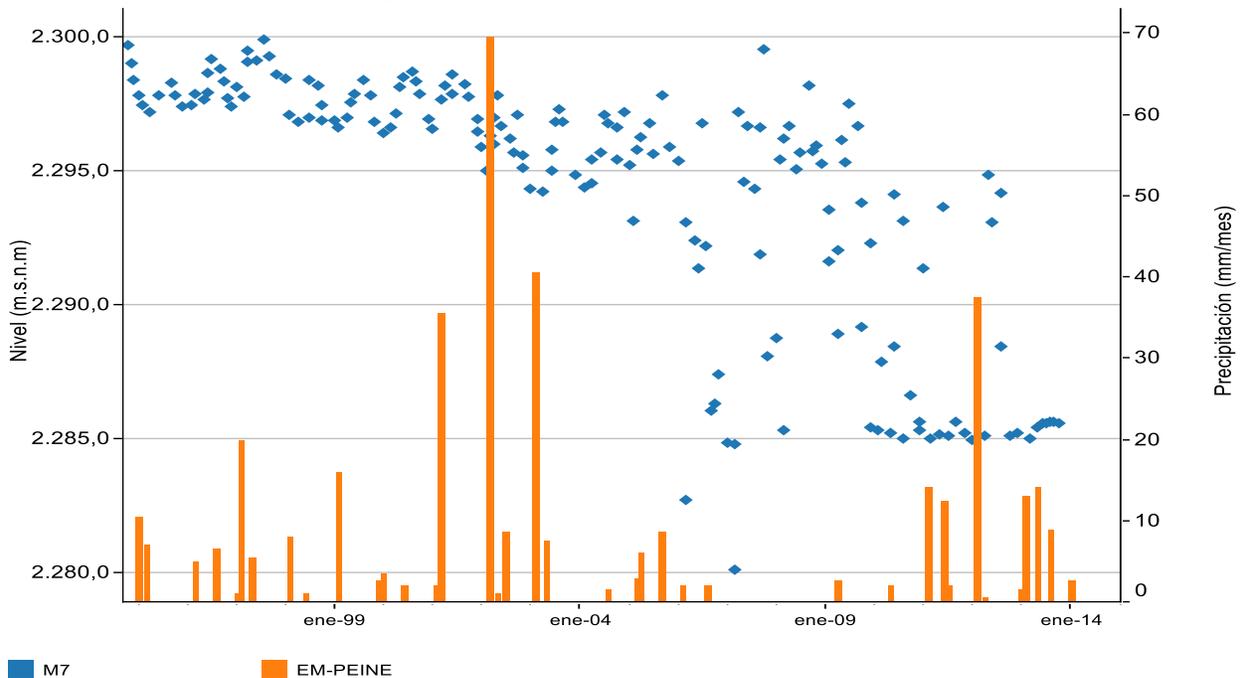
En la Figura 8-33 se presenta la evolución de niveles en pozos situados en el sur del núcleo del Salar, la más próxima a la explotación e Rockwood. El Punto S-4 presenta registros desde 1989 y permite observar un aumento de la tasa de descenso después de 1996. Igual que en las figuras anteriores se observa como los eventos mayores de precipitación provocan aumento de nivel en todos estos puntos.

**Figura 8-34 Evolución niveles en punto Zanja Cord. Sal**



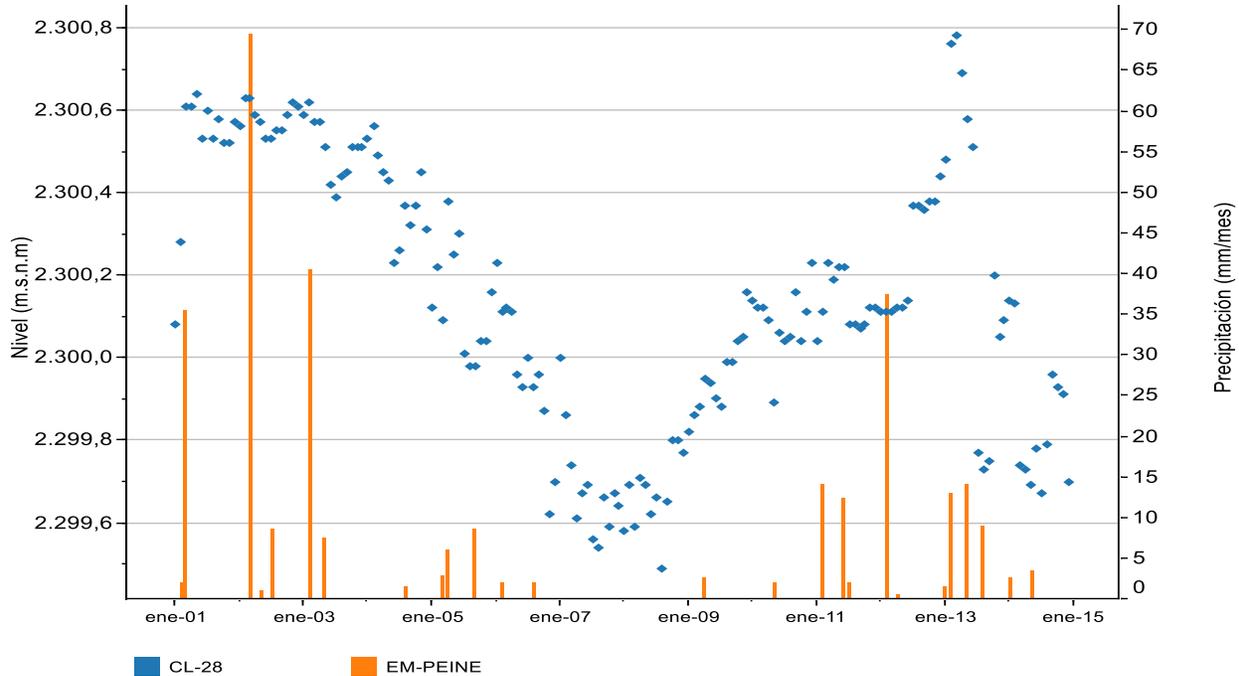
Fuente: Elaboración propia con datos de terceros

**Figura 8-35 Evolución niveles en punto M7**



Fuente: Elaboración propia con datos de terceros

**Figura 8-36 Evolución niveles en punto CL-28**



Fuente: Elaboración propia con datos de terceros

La zona central del núcleo se encuentra muy influenciada por los bombeos que existen en las áreas de extracción de salmuera (delimitadas en la Figura 8-29). Así, aquellos pozos cercanos o dentro de las zonas de extracción, presentan niveles afectados directamente por el bombeo y la influencia directa de los niveles dinámicos de alrededor. Por ejemplo, el pozo M7 (Figura 8-35) acumula aproximadamente 15 m de descenso, mientras que el CL-28 (Figura 8-36) muestra niveles que han descendido y ascendido durante el registro de datos disponible debido a periodos con y sin bombeo en este pozo, pero con un descenso acumulado de 90 cm aproximadamente. Los niveles representados en estas figuras corresponden por tanto a niveles dinámicos los descensos y aumento se deben a la operación de los pozos de bombeo.

Como se observa en las figuras anteriores, la tendencia general de evolución de niveles en el Núcleo es al descenso. Para aquellos pozos con las series más largas se observa hasta 60 cm de descenso acumulado desde 2001.

En general, se observa como los niveles descienden de manera continua y que esta tendencia al descenso se interrumpe con ciertos eventos de precipitación, que provocan aumentos bruscos en el nivel de la salmuera (de escala decimétrica). Con posterioridad al aumento de niveles como consecuencia de los eventos de lluvia, los niveles en los pozos descienden con una tasa mayor a la que se observa antes de las lluvias, para posteriormente seguir con las tasas de descenso evidenciadas en forma previa en dichos eventos. Estos ascensos de nivel se observan en todos los puntos situados en el núcleo. En aquellos

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

puntos situados en la zona central del núcleo la propagación de estos ascensos de nivel resulta muy rápida y no se observa un retardo con respecto a los situados más próximos a la Zona Marginal.

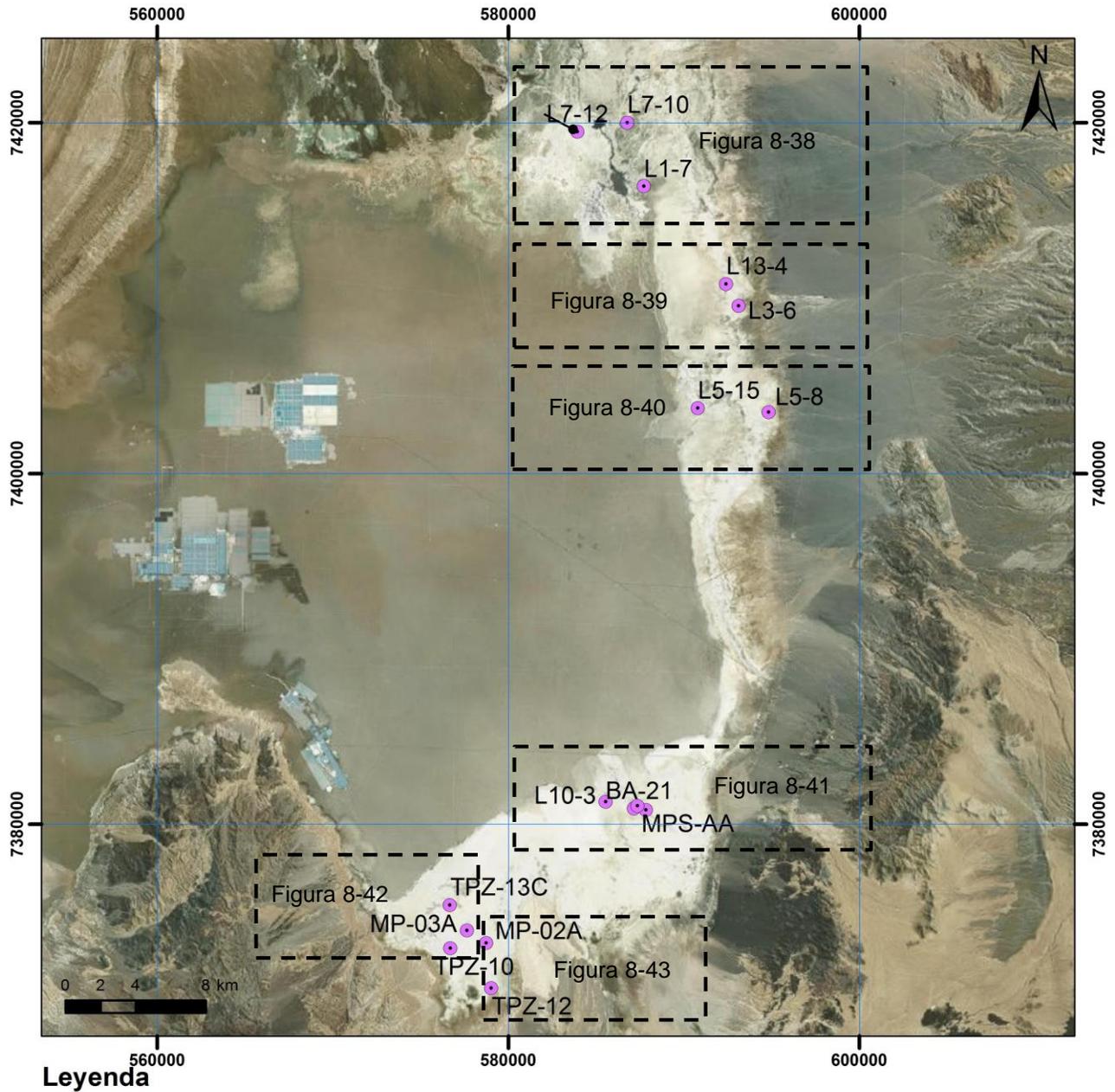
Los ascensos en el núcleo se explicarían principalmente por el aporte de precipitación directa, aunque también puede influir, en menor medida, la llegada escorrentía superficial procedente de partes más altas de la Cuenca que atraviesan la Zona Marginal.

### *8.3.2.2 Evolución de niveles en la Zona Marginal*

En la Zona Marginal existen zonas declaradas como reservas naturales debido al valor ambiental de los ecosistemas palustres que se encuentran en ella. Para asegurar la protección de estas áreas existen numerosos puntos de monitoreo de nivel de agua y salmuera, cuyos registros de evolución de niveles disponible para este estudio se puede consultar en el "Apéndice G: Registro histórico de niveles" incluido en este Anexo.

Desde la Figura 8-38 hasta la Figura 8-42 se muestran los registros del nivel en algunos puntos representativos distribuidos en la Zona Marginal, cuya ubicación se ha representado en la Figura 8-37.

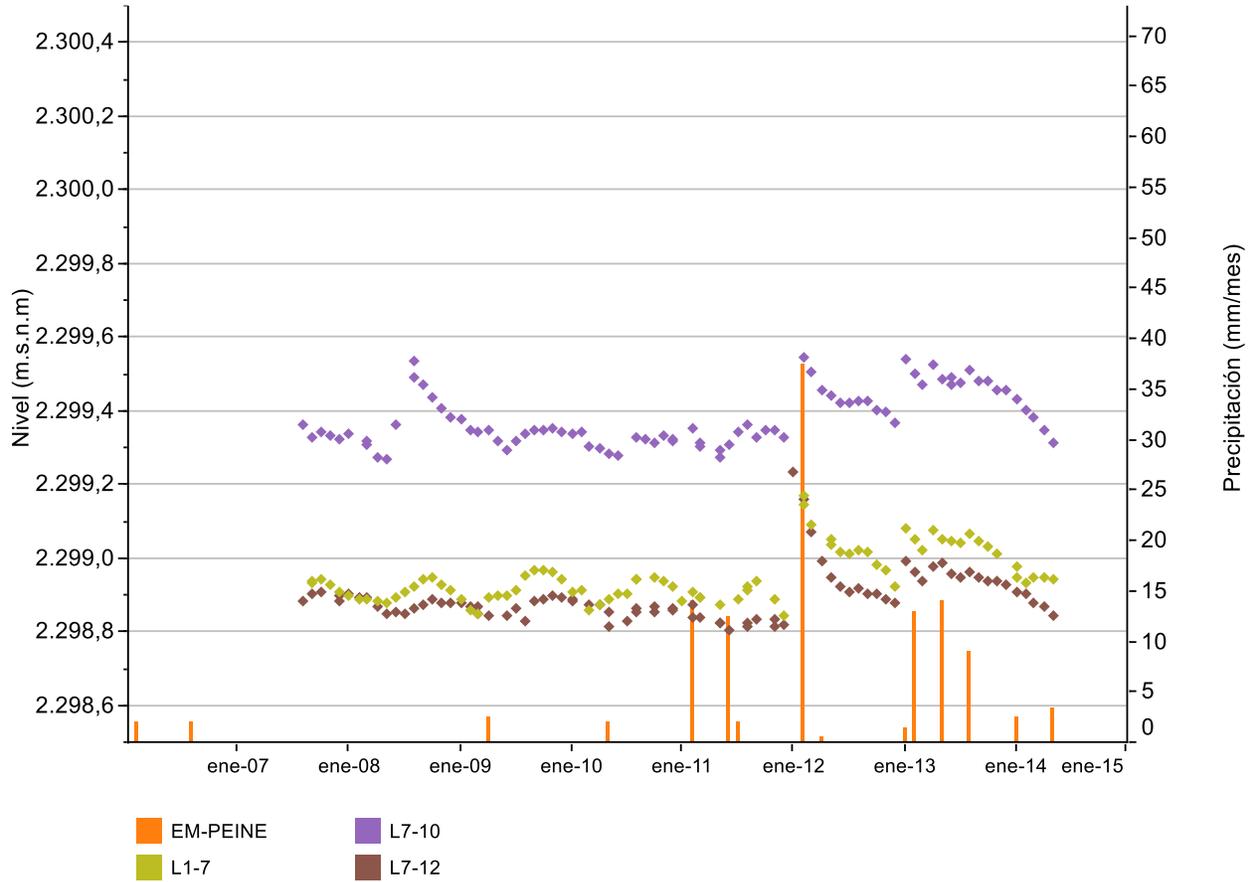
**Figura 8-37 Ubicación pozos analizados con registro histórico de niveles en la Zona Marginal**



● Puntos en el la Zona Marginal

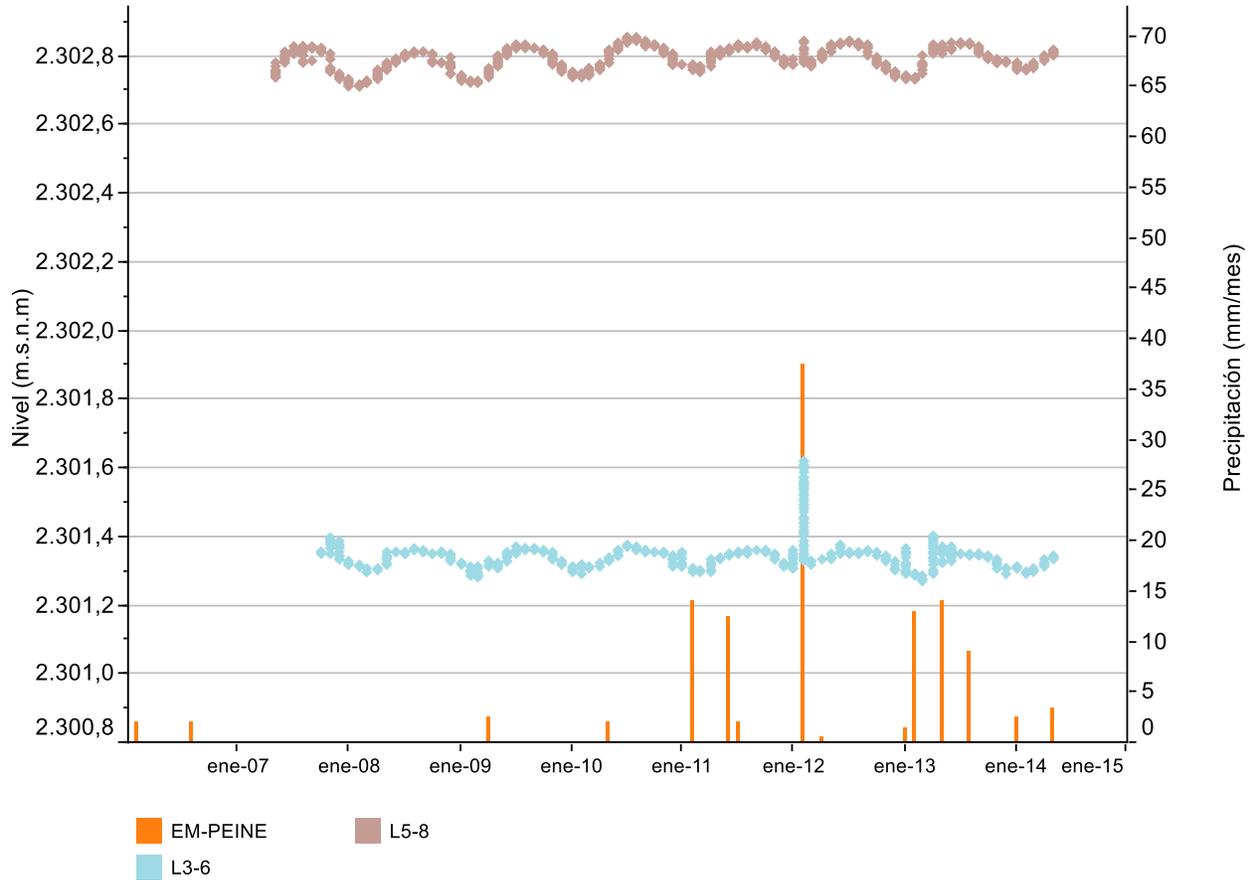
Fuente: Elaboración propia

**Figura 8-38 Evolución niveles de Zona Marginal**



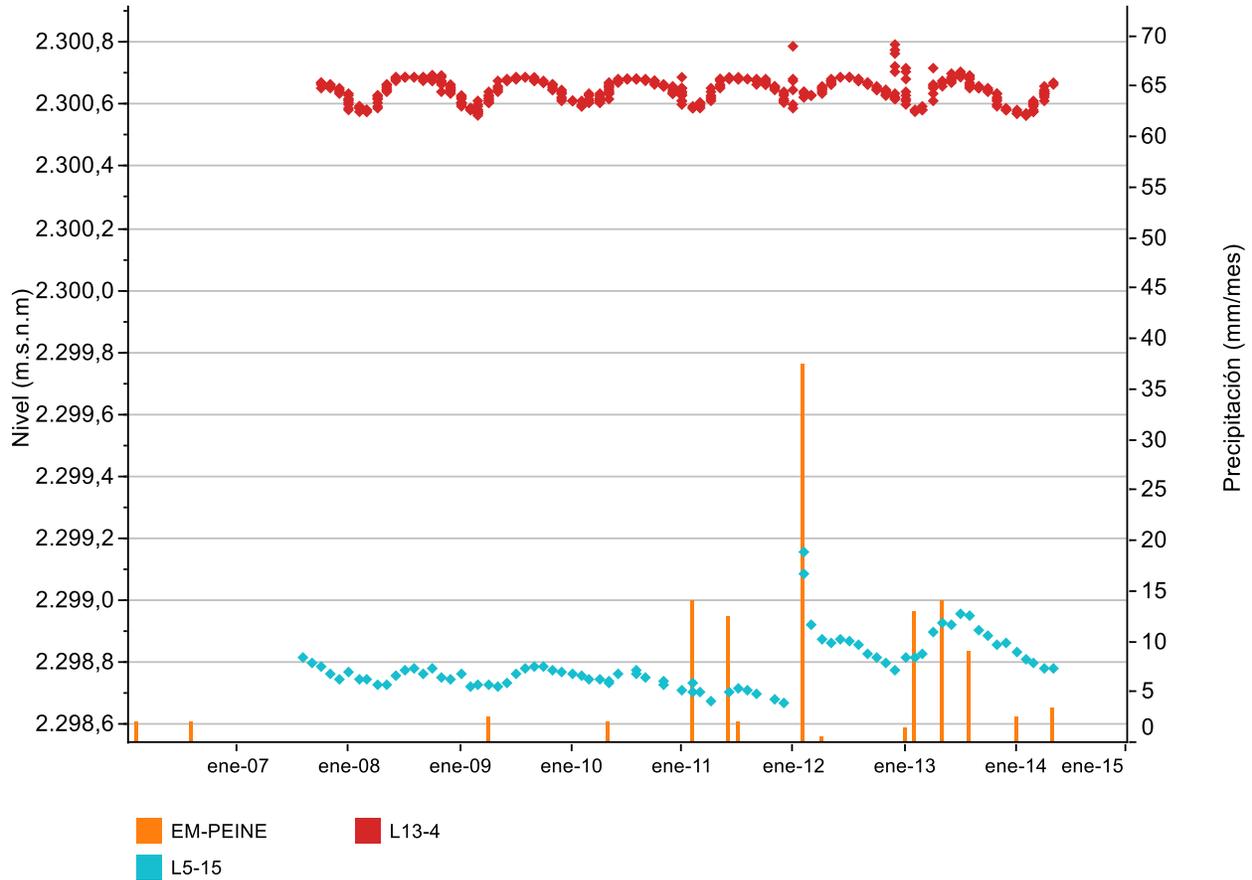
Fuente: Elaboración propia con datos de terceros

**Figura 8-39 Evolución niveles de Zona Marginal (2)**



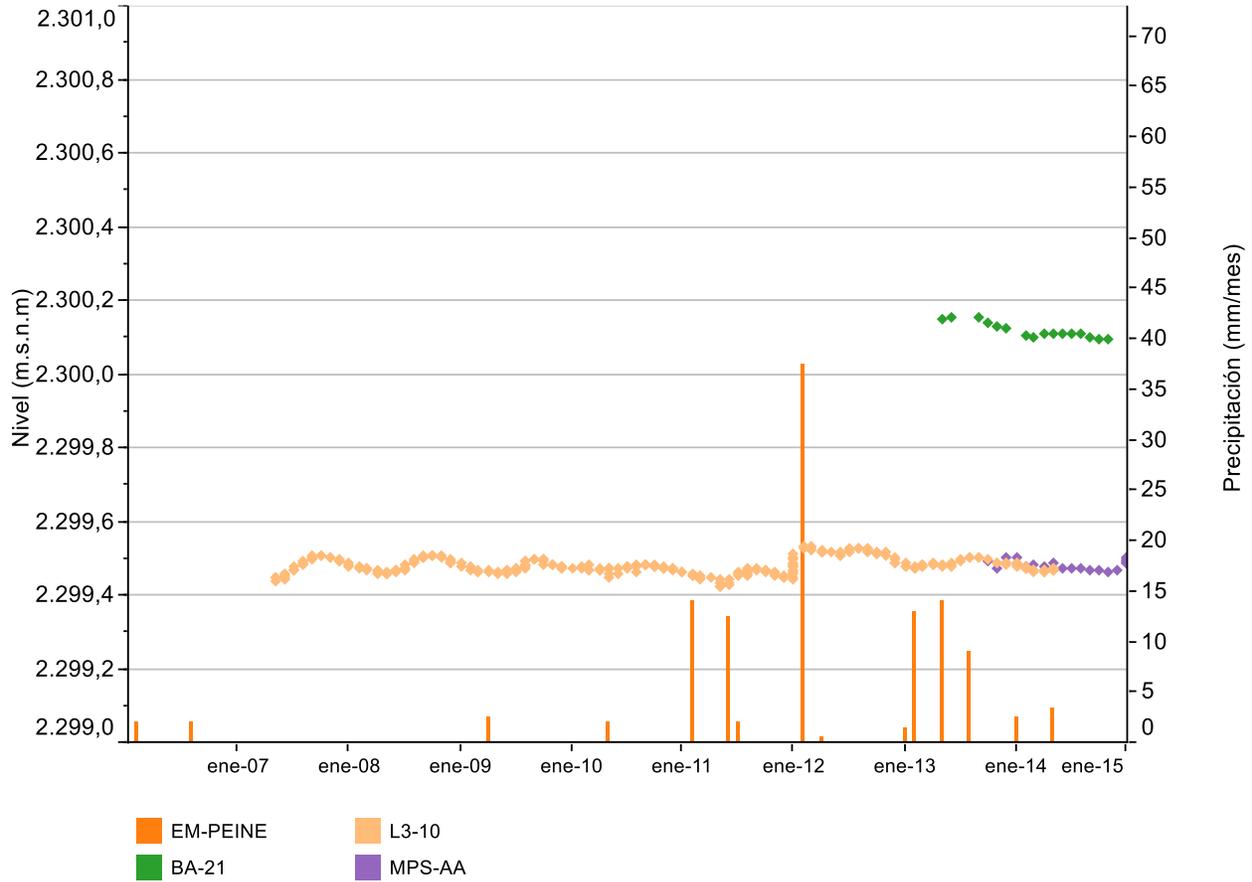
Fuente: Elaboración propia con datos de terceros

**Figura 8-40 Evolución niveles de Zona Marginal (3)**



Fuente: Elaboración propia con datos de terceros

**Figura 8-41 Evolución niveles de Zona Marginal (4)**



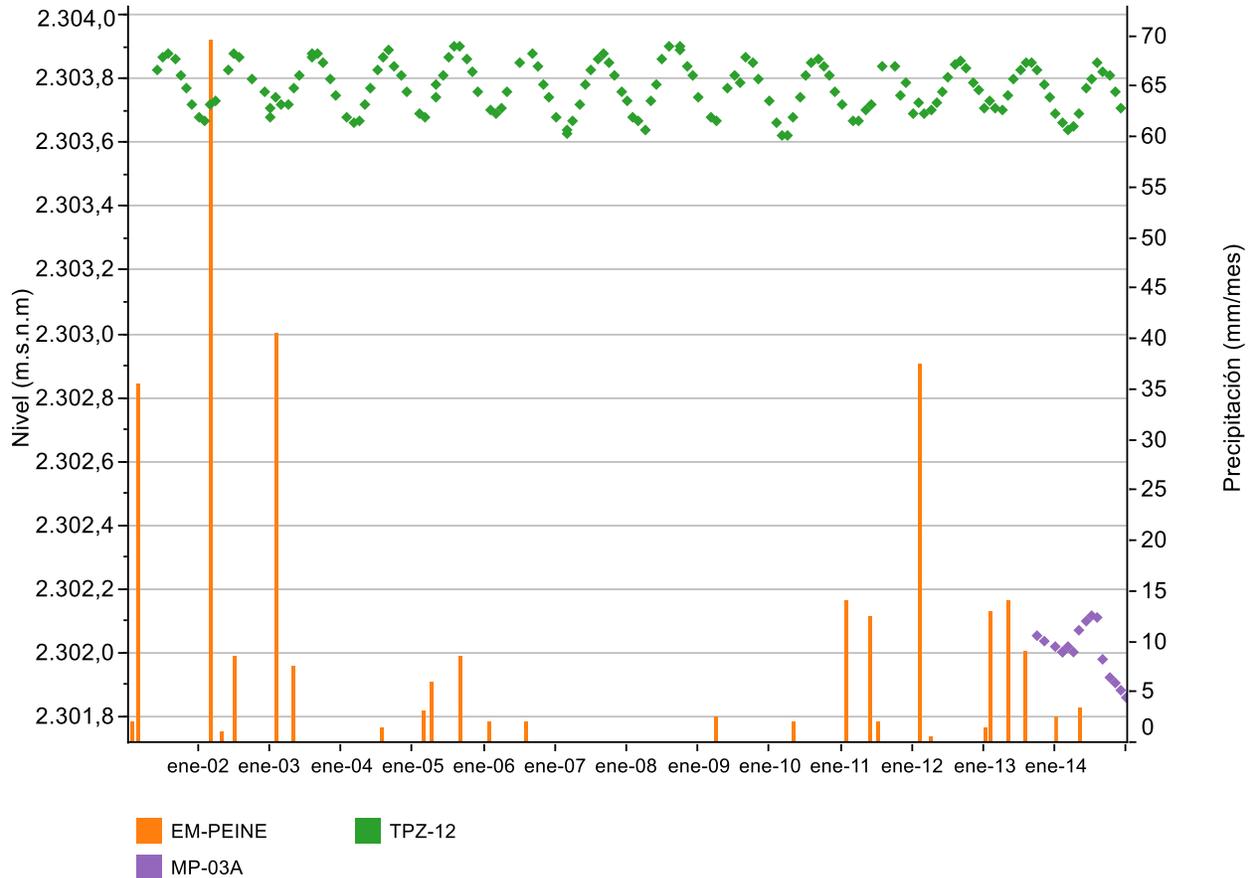
Fuente: Elaboración propia con datos de terceros

**Figura 8-42 Evolución niveles de Zona Marginal (5)**



Fuente: Elaboración propia con datos de terceros

**Figura 8-43 Evolución niveles de Zona Marginal (6)**



Fuente: Elaboración propia con datos de terceros

En general, los niveles en la Zona Marginal se han mantenido constantes a lo largo del tiempo de registro, con un comportamiento estacional muy marcado con máximos en los meses de invierno y mínimos en verano. Este comportamiento se debe a que en esta zona el nivel freático se encuentra muy próximo a la superficie del terreno, quedando fuertemente expuesto a la evaporación, cuya tasa es mayor en verano haciendo descender los niveles en este período. En la Zona Marginal las precipitaciones, generalmente no provocan variaciones importantes en los registros de nivel en la mayoría de los puntos estudiados.

Está marcada estacionalidad, es menos clara en algunos puntos situados en lugares próximos al contacto con el Núcleo, situados en la salmuera, como en los puntos próximos al sistema lagunar Soncor y sistema lagunar Peine (Figura 8-38, Figura 8-41), donde la precipitaciones si suponen aumentos en el nivel.

Una excepción es el punto L3-6 (Figura 8-39) que muestra un gran aumento de nivel instantáneo en respuesta a un evento mayor de precipitación en el año 2012. De todas formas, el ascenso no es duradero y vuelve al valor habitual de forma igualmente instantánea, lo cual fue posible registrarlo ya que el punto está equipado con un sensor de nivel continuo. En los puntos no habilitados con registro continuo no es

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

posible registrar estos eventos debido a su escasa duración y a la dificultad de acceso a la zona durante las precipitaciones.

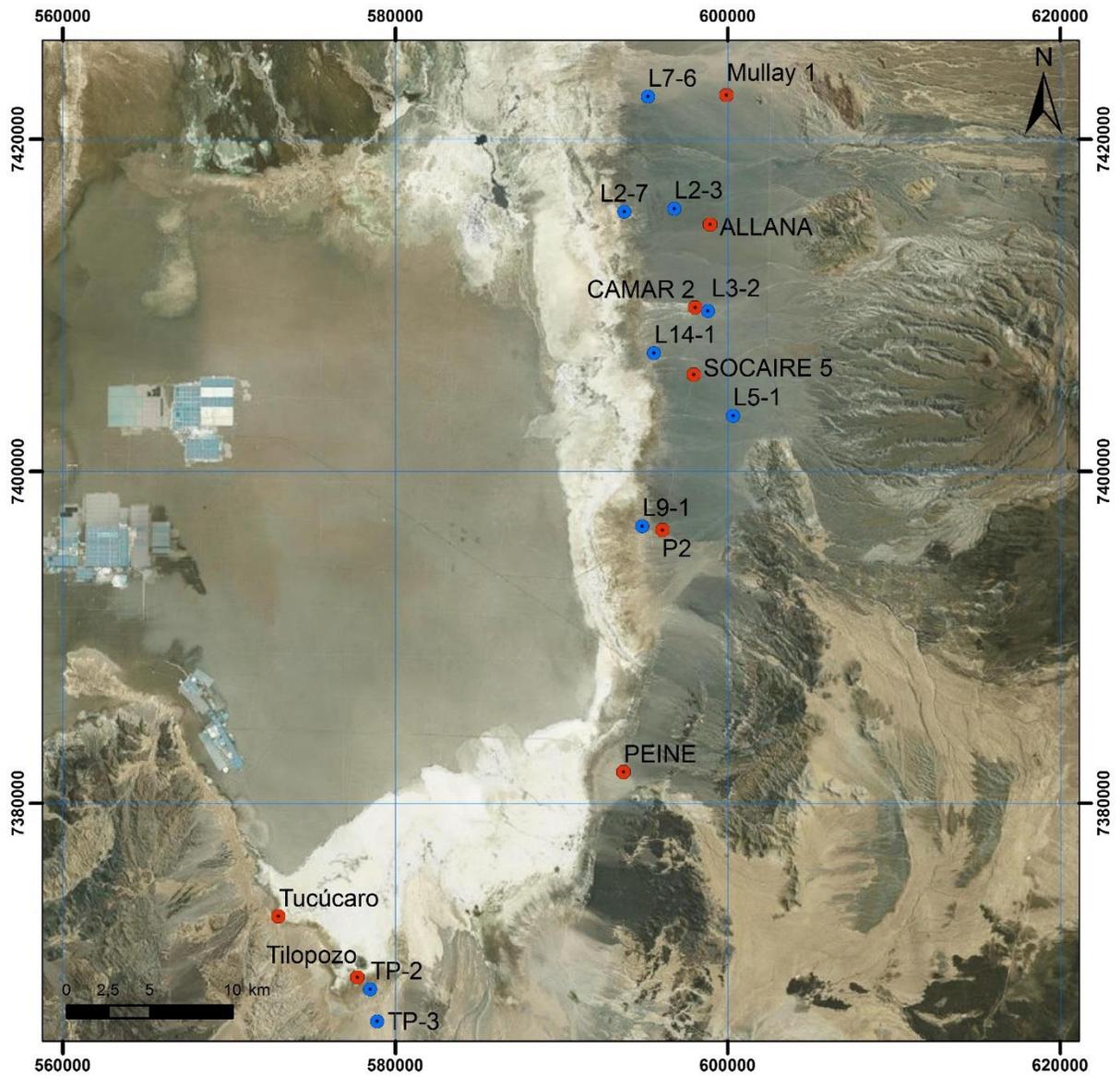
En resumen, la mayoría de los puntos presentan niveles son estables, con oscilaciones estacionales de entre 5 y 10 cm que no se ven afectadas por las precipitaciones. Sin embargo, en algunos puntos como L7-10 y L7-12 (Figura 8-38) situados próximos al sistema lagunar Soncor, se observa como los niveles tienen comportamiento más irregular con influencia de las precipitaciones.

### 8.3.2.3 Evolución de niveles en Acuíferos detríticos del Borde Este y Sur

En los acuíferos aluviales del Este y Sur del Salar se produce la extracción de agua para el abastecimiento de agua potable, agricultura y procesos productivos mineros. En el acuífero del borde Este se encuentran los pozos de bombeo que SQM utiliza en sus procesos, mientras que en el Borde Sur, en la zona de Monturaqui y Negrillar, se encuentran los campos de pozos de las mineras Escondida y Zaldívar. Los registros de evolución de niveles del gran número de puntos en los que se monitorea el nivel de agua en estos acuíferos aluviales han sido recopilados en el "Apéndice G: Registro histórico de niveles" incluido en este Anexo.

En la Figura 8-45 y la Figura 8-46 se muestran los registros del nivel en algunos pozos distribuidos en el Borde Este y Sur de la cuenca, cuya ubicación se ha representado en la Figura 8-44.

**Figura 8-44 Ubicación pozos analizados con registro histórico de niveles en depósitos Aluviales Este y Sur**

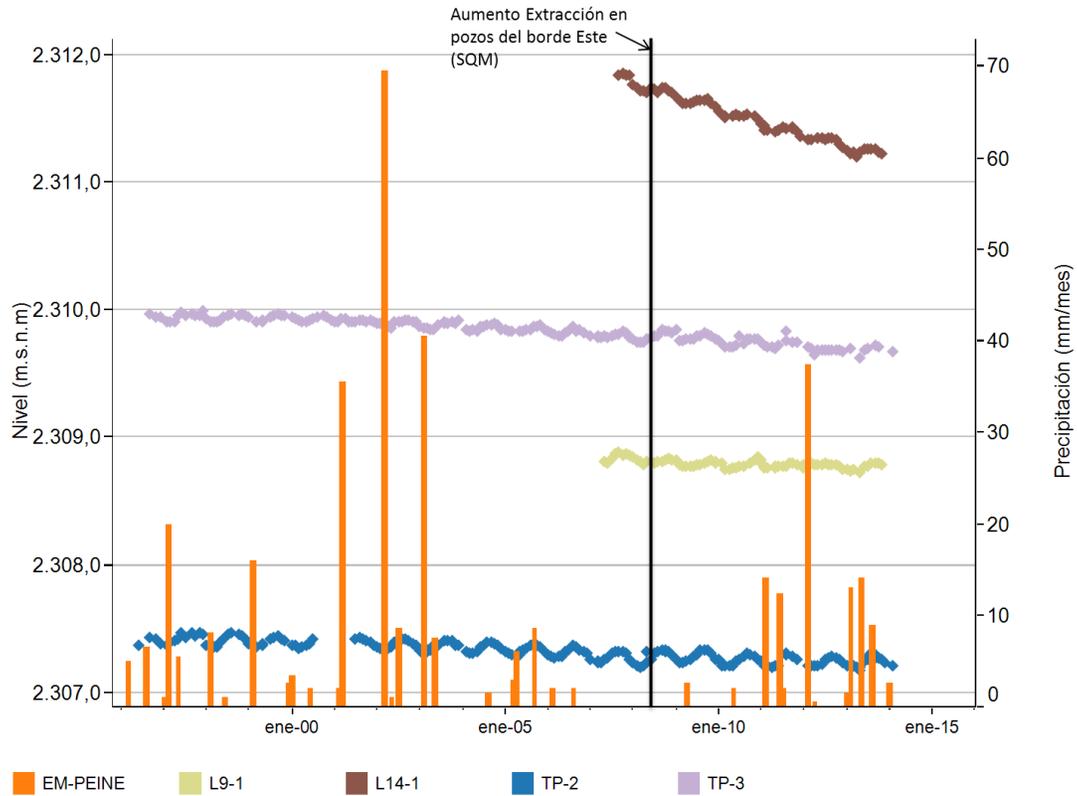


**Leyenda**

- Puntos en depósitos aluviales
- Puntos extracción de agua industrial

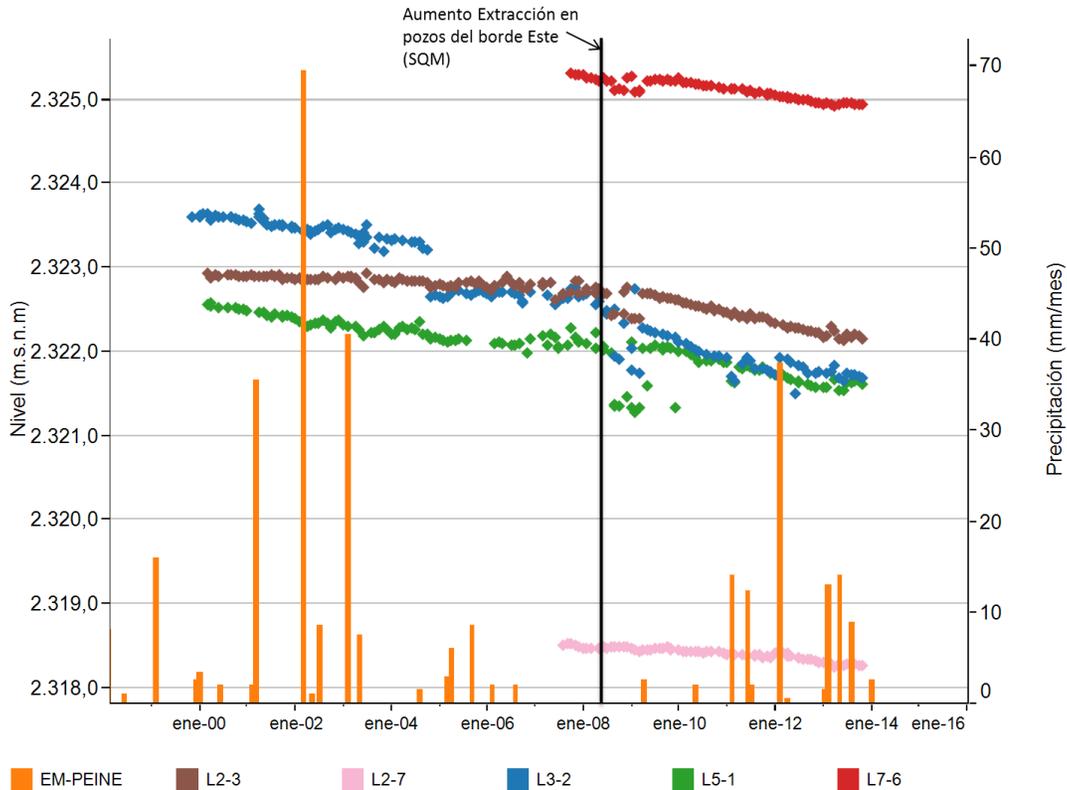
Fuente: Elaboración propia

**Figura 8-45 Evolución niveles depósitos aluviales**



Fuente: Elaboración propia con datos de terceros

**Figura 8-46 Evolución niveles depósitos aluviales (2)**



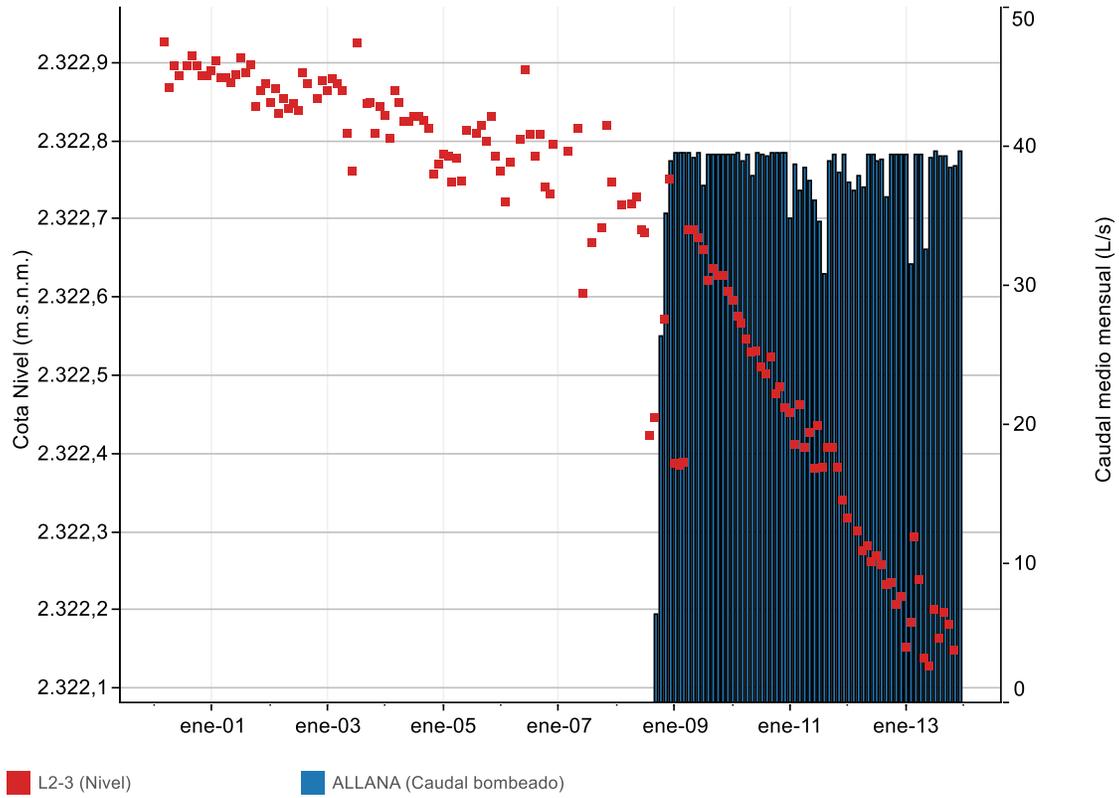
Fuente: Elaboración propia con datos de terceros

El comportamiento general de la evolución de niveles en este sector es al descenso, si bien la tasa de cada uno de los pozos es muy distinta. En muchos casos se observa también la influencia del efecto estacional, con registros de nivel más bajos en verano y más altos en invierno, lo que se observa claramente en los pozos L14-1 y TP-3 (Figura 8-46), entre otros. Estos pozos están situados en las proximidades de la Zona Marginal, por lo que este comportamiento se interpreta como un reflejo del comportamiento de niveles en esta zona.

En algunos casos, la tendencia descendente de niveles está relacionada con la explotación histórica de estos acuíferos. En la Figura 8-45 se puede observar este efecto de una manera más acusada, ya que existe un cambio de pendiente de descenso de algunos piezómetros (p.e. L2-3, L3-2) desde 2008, que coincide con el aumento de las extracciones de agua por parte de SQM desde sus pozos de extracción. En la Figura 8-47 se observa con mayor detalle la influencia del bombeo desde el pozo de extracción denominado Allana sobre el nivel del punto L2-3.

En los pozos situados en el Borde Sur (TP-1 y TP-2) no se observan cambios en la tendencia del descenso, debido a que el periodo de registro comienza al inicio de las extracciones en 1994 en el acuífero del Sur, por las compañías Minera Escondida Limitada y Compañía Minera Zaldivar.

**Figura 8-47 Nivel L2-3 y caudal bombeado en Allana**



Fuente: Elaboración propia con datos de terceros

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

### 8.3.3 Superficie freática

En el Salar de Atacama, los materiales porosos en su zona saturada están ocupados bien por salmuera, en el Núcleo y en la Zona Marginal aguas abajo de la interfase, o bien por agua salobre con una gradación en las concentraciones de sólidos disueltos, que aumenta desde los acuíferos de los bordes de la cuenca hacia la Zona Marginal. Esta situación provoca la existencia de una interfase salina debido a la diferencia de densidad de ambos fluidos, y cuyo estudio y análisis se desarrolla en el punto 8.4 de este capítulo.

De esta manera, resulta necesario considerar que debido a la densidad variable las curvas isofreáticas no permiten inferir las direcciones de flujo de manera directa y no se pueden dibujar redes de flujo en el global de la cuenca, pero sí allí donde en toda la columna de fluido tenemos un solo líquido, de una sola densidad.

De todas formas, la superficie freática, es la superficie real que separa la zona saturada de la no saturada. Por lo tanto condiciona los procesos hidrogeológicos ya que la distancia de la misma con la superficie topográfica, controla fenómenos como la evaporación e infiltración. Por estos motivos su construcción es de interés en un estudio hidrogeológico, que además desarrolla un modelo numérico.

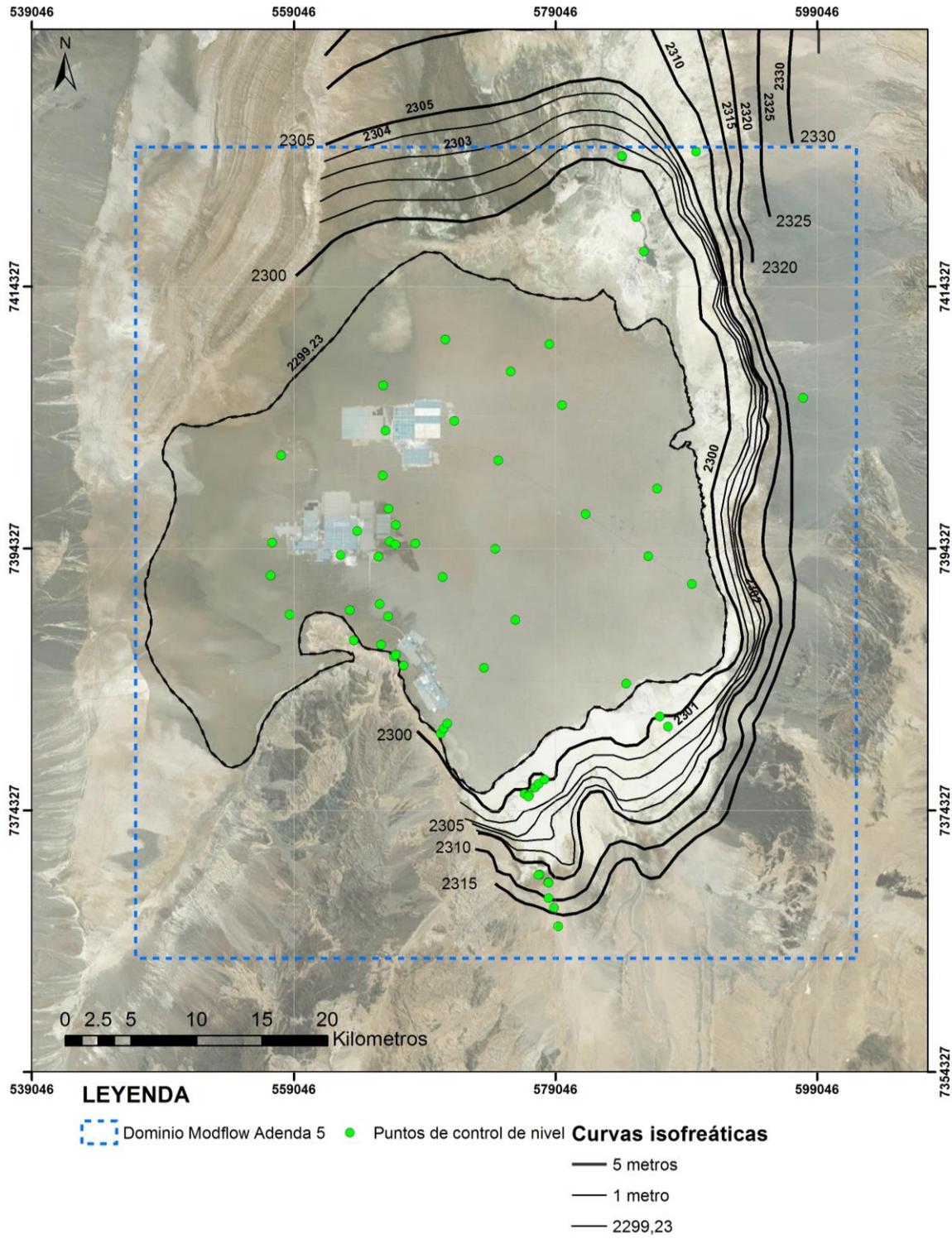
Diversos autores han confeccionado mapas de curvas isofreáticas, regionales o locales, en el Salar de Atacama, a partir de la información disponible, que ha ido creciendo durante la explotación del Salar y mayor entendimiento de su funcionamiento hidrogeológico.

En el marco de este EIA, también se han elaborado dos mapas que muestran la superficie freática para los años 1997 y 2013, ver Figura 8-48 y Figura 8-49 respectivamente los puntos de control de nivel utilizados se encuentran en la Tabla 8-4 y la Tabla 8-5.

Para elaborar estos mapas de isofreáticas se han revisado mapas de isofreáticas existentes, los que se indican a continuación:

- Dalannais, 1979 (también citado como CORFO, 1977 en otros estudios), Mapa isofreáticas borde este del Salar en 1977
- Hydrotechnica, 1987 Mapa isofreáticas del núcleo en 1987
- Mardones, 1997 Mapa isofreáticas borde este del Salar en 1984
- AC ingenieros consultores, 1996, Mapa isofreáticas del núcleo en 1995
- McCartney, 2001 Mapa isofreáticas en la zona de Tilopozo, borde Sur y Zona Marginal Sur en 2001
- Fock, 2009, Mapas Isofreáticas en el Borde Este del Salar, frente al sistema Aguas de Quelana en 2009
- Salas et al., 2010 Mapa isofreáticas del Salar de Atacama en 2008

**Figura 8-48 Superficie freática elaborada por Rockwood correspondiente al año 1997**



Fuente: elaboración propia

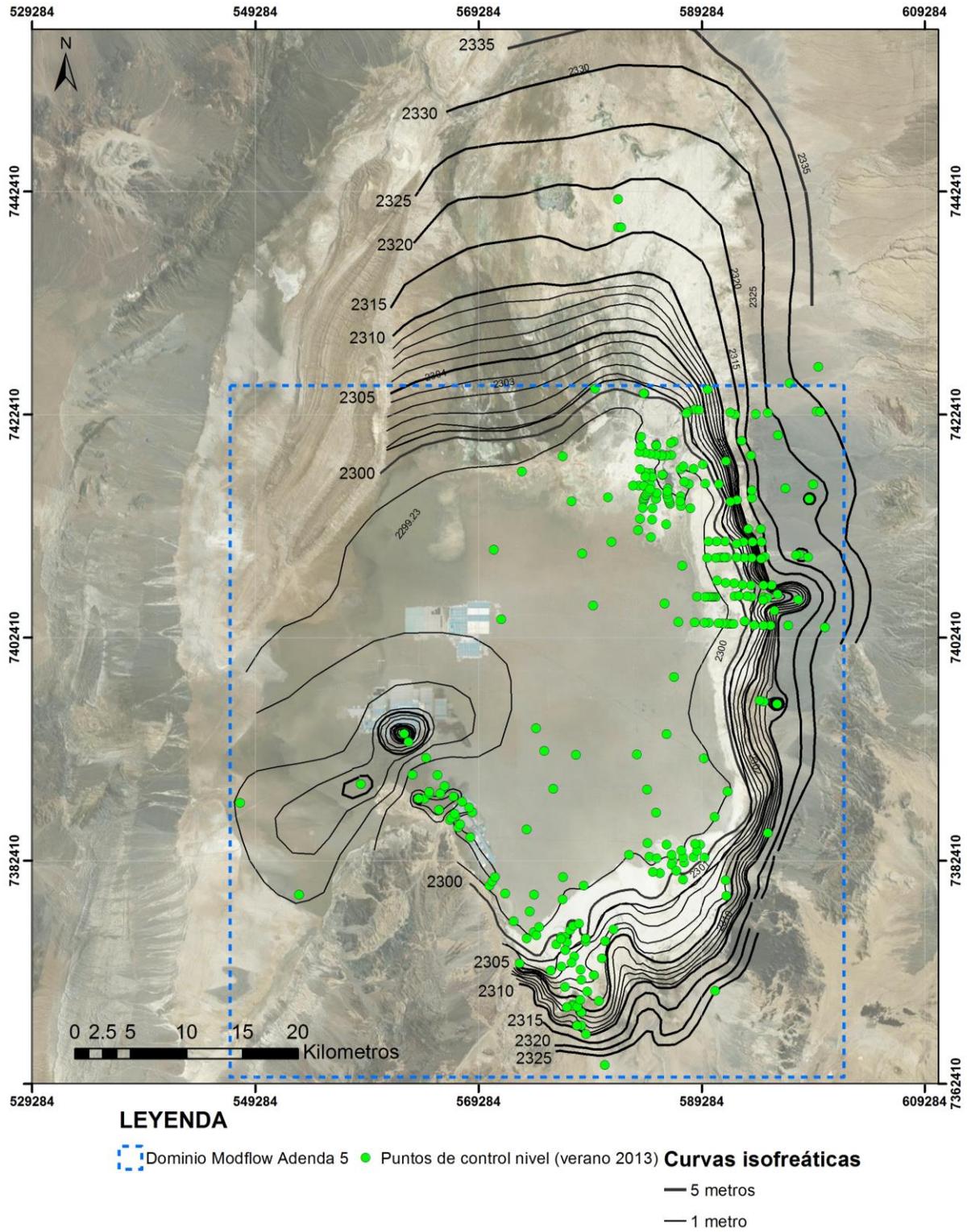
	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

**Tabla 8-4 Puntos de control de nivel 1997**

Puntos de control de Nivel			
1027	SAT-2/D6	CATA-13	M1-C
A	SOCAIRE 5	CL-11	M2-C
B	Tilopozo Reglilla	CL-12	M3-C
Barros Negros (Reglilla)	TP-1	CL-13	M6
Burro Muerto Reglilla (CONAF)	TP-2	CL-18	M7
C	TP-3	CL-2	S-1
Chaxa Reglilla	1024	E-100	S-2
CL-14	1028	E-85	S-3
D	2008	E-87	S-4
E	2009	E-88	SOPM-10
F	2013	E-93	SOPM-11
H	2027	E-94	SOPM-12C
Laguna Salada (Reglilla)	2028	E-97	SOPM-2
Laguna Saladita (Reglilla)	2030	E-98	SOPM-4
PC-1200	2038	LS	SOPM-5
Puente San Luis Reglilla (Antigua)	2040		

Fuente: elaboración propia

**Figura 8-49 Superficie freática elaborada por Rockwood correspondiente al año 2013**



Fuente: elaboración propia

**Tabla 8-5 Puntos de control de Nivel 2013 (Verano)**

Puntos de control de Nivel				
1001	L10-1	L2-16	L5-9	S-3
1024	L10-10	L2-17	L5-G3 Pozo	S-4
1027	L10-11	L2-18	L5-G3 Reglilla	SAMPLE-4
1028	L10-12	L2-19	L7-1	SOCAIRE 5
1906	L10-13	L2-2 (Allana-viejo)	L7-10	SOPM-10
2018	L10-14	L2-20	L7-11	SOPM-11
2021	L10-15	L2-21	L7-12	SOPM-12C
2028	L10-16	L2-22	L7-13	SOPM-13
2037	L10-17	L2-23	L7-14	SOPM-14
2040	L10-2	L2-24	L7-15	SOPM-2
A	L10-3	L2-25	L7-2	SOPM-4
A-71	L10-4	L2-26	L7-3	SOPM-5
ALLANA	L10-5	L2-27	L7-4	SOPM-7
ASC-4	L10-6	L2-28	L7-5	SOPM-9
B	L10-7	L2-3	L7-6	TE-1
Barros Negros (Pozo)	L10-8	L2-4	L7-7	Tilopozo
Barros Negros (Reglilla)	L10-9	L2-5	L7-G1	Tilopozo Reglilla
Burro Muerto Pozo	L1-1 (MULLAY-1)	L2-7	L7-G2 Pozo	TM-2
Burro Muerto Reglilla (CONAF)	L1-10	L2-8	L7-G2 Reglilla	TP-1
C	L1-11	L2-9	L9-1	TP-2
C4-B	L11-1	L3-10	L9-2	TP-3
CAMAR 2	L1-12	L3-11	Laguna Interna (Reglilla)	TPB-2
Chaxa Pozo	L11-2	L3-12	Laguna Salada (Reglilla)	TPB-3
Chaxa Reglilla	L1-13	L3-13	Laguna Saladita (Reglilla)	TPB-4
CL-10	L1-14	L3-14	M1-C	TPB-5
CL-11	L1-15	L3-15	M2-C	TPB-6
CL-12	L1-16	L3-16	M7	TPDV-08
CL-13	L1-17	L3-2 (Camar2-viejo)	Mullay 1	TPDV-09
CL-16	L11-G1	L3-3	P1-1	TPDV-11
CL-17	L1-2 (Soncor-1)	L3-4(SOPM-8)	P1-2	TPW-1
CL-18	L12-1	L3-5	P1-3	TPZ-10
CL-2	L12-2	L3-6	P1-4	TPZ-11A
CL-26	L12-3	L3-7	P1-5	TPZ-11B
CL-27	L12-4	L3-8	P1-6	TPZ-11C
CL-28	L1-3	L3-9	P1-7	TPZ-12
CL-30	L13-1	L4-10	P2	TPZ-13C
CL-31	L13-2	L4-11	P2-1	TPZ-13E
CL-32	L13-3	L4-12	P2-2	TPZ-13O
CL-33	L13-4	L4-13	P2-3	TPZ-1A
CL-34	L13-5	L4-14	P2-4	TPZ-1B
CL-6	L13-6	L4-15	P2-5	TPZ-1C
CUÑA 1	L13-7	L4-16	PC-1200	TPZ-2A
CUÑA 2	L1-4	L4-17	Puente San Luis Pozo	TPZ-2B
CUÑA 3	L14-1	L4-3	Puente San Luis Reglilla (Ar)	TPZ-2C
CUÑA 4	L14-2	L4-4	Puilar Pozo	TPZ-3
CUÑA 5	L14-3	L4-5	Puilar Reglilla	TPZ-4
CUÑA 6	L14-4	L4-6	PZ-15	TPZ-5A
CUÑA 7	L14-5	L4-7	PZ-15B	TPZ-5B
D	L14-6	L4-8	PZ-16A	TPZ-6
D-2	L14-7	L4-9	PZ-5A	TPZ-7B
E	L1-5	L5-1	PZ-5B	TPZ-8
E-101	L1-6	L5-10	PZ-6	TPZ-9A
E-324	L1-7	L5-11	PZ-7	TPZ-9B
EIA-5	L1-8	L5-12	PZ-8	TPZ-9C
EXP-2	L1-9	L5-13	RC-1	TS-8
F	L1-G4 Pozo	L5-14	RC-2	Tucúcaro
First well	L1-G4 Reglilla	L5-15	RC-3	Well IK
GD-01	L2-10	L5-2	RC-4	Zanja Camino a Peine
GD-02	L2-11	L5-3	RC-5	ZAR-C-S
GD-03	L2-12	L5-4	RC-6	
GD-04	L2-13	L5-6	RC-7	
H	L2-14	L5-7	S-1	
HH-1	L2-15	L5-8	S-2	

Fuente: elaboración propia

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

Estos dos mapas (Figura 8-48 y Figura 8-49) se han elaborado por Rockwood con la información de niveles disponible para cada una de esas fechas, y han integrado datos procedentes de diversas fuentes: SQM, Rockwood, y Minera Escondida. En el caso de Rockwood y de Escondida las cotas altimétricas de los niveles han sido homologadas con un levantamiento de precisión llevado a cabo en el marco de este EIA. Sin embargo, los niveles de SQM no han podido ser homologados, debido a la ausencia de información topográfica reportada por esta empresa, Dado que la mayor parte del Salar, incluyendo el Núcleo y la Zona Marginal, está monitoreada por SQM, ha sido imposible prescindir de dicha información, y se ha utilizado, tal cual es reportada en sus informes PSAH. Este hecho puede inducir cierto grado de error<sup>8</sup> en las superficies freáticas elaboradas, que en todo caso es inferior a 1 m, lo cual coincide con la equidistancia de las curvas isofreáticas.

## 8.4 Interfase salina

### 8.4.1 Introducción

El análisis de la posición y geometría de la interfase salina (también denominada cuña salina o interfaz en otros estudios) tiene una gran importancia en el presente estudio por cuanto implica la existencia de una superficie, que desconecta hidráulicamente los flujos subterráneos de agua salobre por un lado y salmuera por otro.

A continuación se describen los antecedentes revisados y las definiciones adoptadas, para posteriormente caracterizar la interfase, definiendo su posición tridimensional en el espacio y su evolución en el tiempo.

El estudio de las relaciones entre aguas de distinta densidad es complejo, pues a las dificultades habituales del estudio del movimiento del agua subterránea se suma la existencia de un agua de una densidad diferente y miscible, presentándose además diferencias en la viscosidad y a veces en la temperatura. (Custodio y Llamas, 2001).

La superficie de contacto entre dos fluidos con características distintas se denomina interfase. En dos fluidos inmiscibles, como agua y petróleo, está claramente definido y es una superficie neta, formando una interfase; si estos dos líquidos son miscibles como el caso del agua dulce y salada, que tienen una densidad diferente, y el fluido más ligero se sitúa sobre el más pesado, esta interfase puede ser menos clara, algo difusa, denominando esta zona de transición como zona de mezcla (Escuder *et al.*, 2009). Esta zona de mezcla tiene un espesor variable desde centimétrica a métrica.

En principio, la composición química del agua en un punto dado de la zona de mezcla sería una mezcla estequiométrica de las aguas fuente, dulce y salada, pero en realidad se produce un desequilibrio químico

---

<sup>8</sup> Se han estimado diferencias de nivel entre las mediciones de SQM y Rockwood entre 30 y 60 cm en los puntos SAMPLE -4 y L12-1, que son los únicos en los que se dispone información de niveles tomada por ambas compañías coincidente en el tiempo, este análisis se desarrolla con más detalle en el capítulo 4 del presente Anexo.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

en el agua resultante respecto a la composición mineralógica del medio, dando lugar a precipitaciones y disoluciones de minerales en el medio poroso, o provocando reacciones químicas de diverso tipo (Escuder *et al.*, 2009).

El ancho de la zona de mezcla está condicionada por las características del movimiento de los dos fluidos, que indirectamente afectan a los procesos dispersivos; existiendo también una contribución de los procesos difusivos, generalmente despreciable frente a la dispersiva (Escuder *et al.*, 2009).

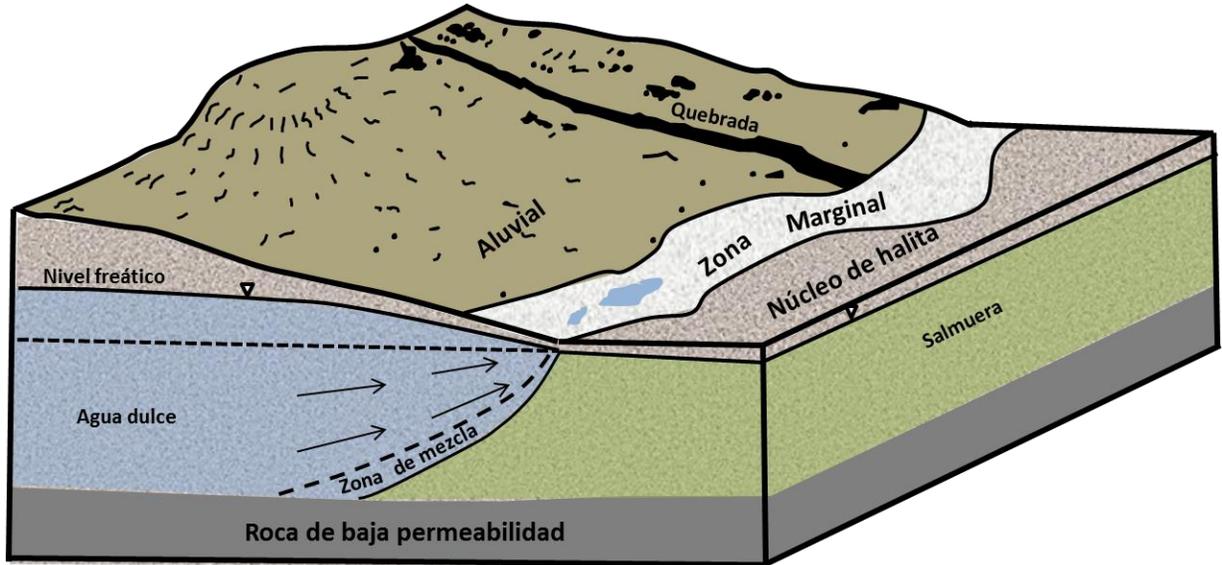
En el Salar de Atacama es posible distinguir una zona de interfase abrupta (o brusca), con una zona de mezcla relativamente estrecha, inferior a 2 m, en aquellas zonas donde el flujo subterráneo de agua dulce es más elevado, por ejemplo en el entorno de las lagunas del La Punta y La Brava. El espesor de la zona de mezcla es tanto menor cuanto mayor es el flujo y menores son los movimientos de la interfase.

La estabilidad de la interfase se garantiza cuando la velocidad del agua a ambos lados de la misma es paralela (Escuder *et al.*, 2009). Según las observaciones realizadas en el Salar de Atacama, la posición de la interfase se mantiene estable en el tiempo, por lo que se deduce que se cumple esta situación. La existencia de un flujo continuo de agua dulce permite alcanzar una situación estática en la que queda contenido el avance de la salmuera.

Inclinación de la interfase: si las aguas salobres y la salmuera se encontraran en reposo se generaría una interfase horizontal, sin embargo, dado que el agua procedente de los acuíferos de las subcuencas aportantes, presenta un flujo continuo en dirección hacia el centro del Salar, la interfase adquiere una forma inclinada (cuña salina), que adquiere mayor inclinación cuanto mayor es la velocidad del flujo de agua dulce respecto a la salmuera subyacente.

En la Figura 8-50 se muestra un diagrama del funcionamiento de la interfase en el Salar de Atacama.

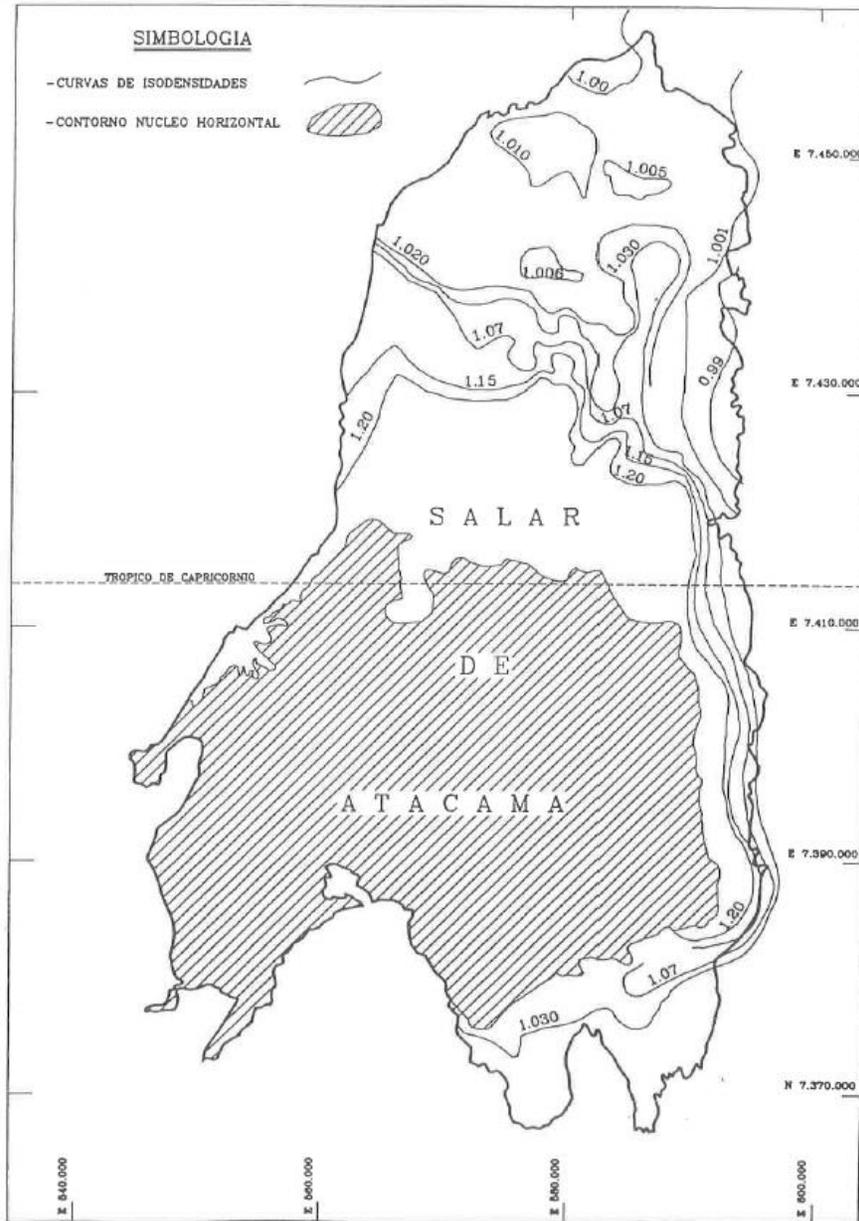
**Figura 8-50 Diagrama interfase**



Fuente: Modificado de Custodio y Llamas 2001

En el Salar se encuentra una interfase brusca en los bordes Este y Sur. En el Norte sin embargo el gradiente hidráulico es bajo y la distancia recorrida por las aguas es mayor, por lo que el aumento de salinidad es progresivo y la zona de mezcla es muy extensa. Esto provoca que no exista un contraste de densidad y por lo tanto el flujo no adquiere una componente vertical. Lo anterior es corroborado por Mardones (1997), al generar el mapa de isodensidades que se muestra en la Figura 8-51. En esta figura se puede apreciar que el gradiente de densidad en el Este y Sur, es bastante más pronunciado que en el Norte.

**Figura 8-51. Plano de isodensidades en el Salar de Atacama**



Fuente: Mardones, 1997.

A diferencia de la situación en un acuífero costero, donde el volumen de agua de mar se puede considerar infinito, el volumen de salmuera en el Salar de Atacama es limitado, y está sujeto a variaciones en función del equilibrio hídrico que se establezca en cada momento. Por lo tanto, se podrían producir cambios en el nivel de la salmuera que afecten la posición de la interfase.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

El caudal de recarga, así como la salinidad del agua, que llega al acuífero salobre desde las subcuencas aportantes también condiciona la geometría y posición de la interfase, por lo que también podría inducir variaciones en la posición de la interfase.

#### 8.4.2 Información disponible para definir la posición de la interfase salina

Como se ha indicado la interfase salina se define como la superficie de contacto entre dos fluidos con densidad diferente, que para el caso del Salar de Atacama son el agua salobre y la salmuera. La diferenciación entre estos dos fluidos se define según el criterio que se muestra en el capítulo 7.

Como es sabido, la densidad de un fluido está relacionada directamente con la cantidad de sólidos disueltos que contiene (TDS), que a su vez se relaciona también directamente con la conductividad eléctrica del fluido (CE).

De esta manera, para este estudio la posición de la interfase se ha medido mediante:

- Perfiles de conductividad eléctrica en pozos. Ver Capítulo 7.
- Geofísica de superficie mediante técnicas geofísicas electromagnéticas TEM y NanoTEM. La información relativa a la geofísica se encuentra en el punto 3.2.
- Relación Densidad-Conductividad eléctrica: a partir de análisis hidroquímicos in situ y de laboratorio de TDS, densidad y CE. Ver Capítulo 7 y "Apéndice F: Análisis Físicoquímico".

##### 8.4.2.1 Perfiles de conductividad eléctrica

Los perfiles de conductividad eléctrica son realizados periódicamente por Rockwood, SQM y Minera Escondida en diversos pozos situados en la Zona Marginal del Salar.

Rockwood realiza perfiles de conductividad eléctrica y temperatura del fluido en 8 piezómetros, a saber: MP-01C, MP-02C, MP-03C, MP-04C, MP-05C, MP-06C, MPS-AC y MPS-CC, con frecuencia mensual desde mediados de 2013. Estas mediciones se efectúan con una sonda piezométrica TCL 107, que mide la Conductividad eléctrica y temperatura del fluido. El procedimiento consiste en el descenso de la sonda por el pozo, hasta que la sonda detecta el nivel del agua dentro de la perforación. Desde esa profundidad se registran las lecturas de conductividad y temperatura a través de la columna de agua. Los intervalos de medición están sujetos a la variación de la conductividad. La metodología de medición se explica en el capítulo 7.

Se dispone de la información de 9 y 3 puntos perfilados por SQM y Minera Escondida respectivamente. La información de los puntos de SQM ha sido extraída del Informe N° 14 del PSAH, mientras que la información de Minera Escondida ha sido extraída del Informe N°13 del PAT para el Acuífero Monturaqui–Negrillar-Tilopozo.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

En la Tabla 8-6 se muestran todos los puntos en los que se realizan los perfiles de conductividad eléctrica junto a la profundidad de la interfase medida en Diciembre de 2013, excepto el MP-01C y MP-03C que fue medida en Noviembre de 2013. Para establecer la profundidad de la interfase en los pozos en los que se observa una zona de mezcla amplia, se ha considerado su posición en la mitad de dicha zona de mezcla.

**Tabla 8-6 Puntos de perfilado de conductividad eléctrica y su profundidad a Nov-Dic 2013**

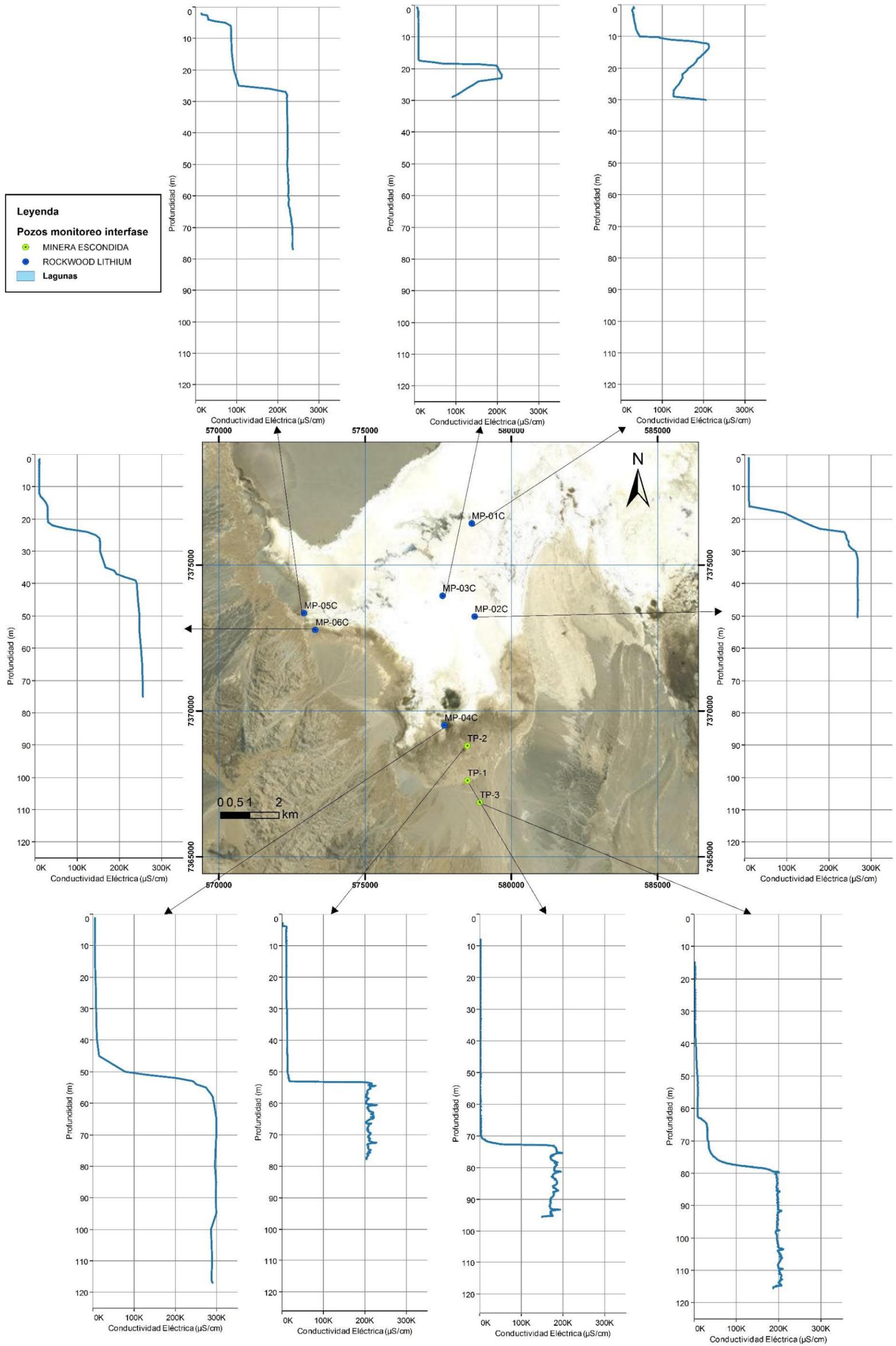
Punto	UTM WGS 84		Cota Terreno (m.s.n.m)	Profundidad interfase (m)	Cota interfase (m.s.n.m)	Propietario
	Este	Norte				
MP-01C	578.646	7.376.429	2.300,73	11	2.290	Rockwood
MP-02C	578.748	7.373.235	2.302,76	20	2.283	Rockwood
MP-03C	577.650	7.373.947	2.302,07	18	2.284	Rockwood
MP-04C	577.713	7.369.510	2.308,11	50	2.258	Rockwood
MP-05C	572.916	7.373.355	2.302,72	25	2.278	Rockwood
MP-06C	573.299	7.372.779	2.304,81	28	2.277	Rockwood
MPS-AC	587.361	7.381.052	2.299,75	5	2.295	Rockwood
MPS-CC	586.726	7.382.313	2.299,13			Rockwood
CUÑA 1	588.568	7.417.529	2.299,50			SQM
CUÑA 2	589.378	7.417.927	2.300,00			SQM
CUÑA 3	592.855	7.420.073	2.318,02	100	2.218	SQM
CUÑA 4	594.818	7.406.013	2.304,50	57	2.247	SQM
CUÑA 5	593.338	7.406.136	2.300,83	24	2.277	SQM
CUÑA 6	591.500	7.379.267	2.305,00	55	2.250	SQM
CUÑA 7	587.699	7.382.245	2.300,00	5	2.295	SQM
L4-3	596.089	7.406.291	2.309,00	40	2.269	SQM
L10-1	591.439	7.380.663	2.304,39	38	2.267	SQM
TP-1	578.503	7.367.615	2.319,27	73	2.246	MEL
TP-2	578.497	7.368.805	2.310,87	54	2.257	MEL
TP-3	578.925	7.366.868	2.325,66	78	2.248	MEL

Fuente: Elaboración propia

Las cotas de los puntos de Rockwood y Minera Escondida han sido levantadas en terreno mediante estación total por Rockwood (ver "Apéndice A: Topografía"). Sin embargo, dado que SQM no reporta la cota de terreno de sus pozos, la cota de los puntos Cuña 3, Cuña 4 y Cuña 5 se han sido extraídas de Fock 2009 y para en el resto de puntos de SQM se presenta una aproximación basada en el nivel reportado.

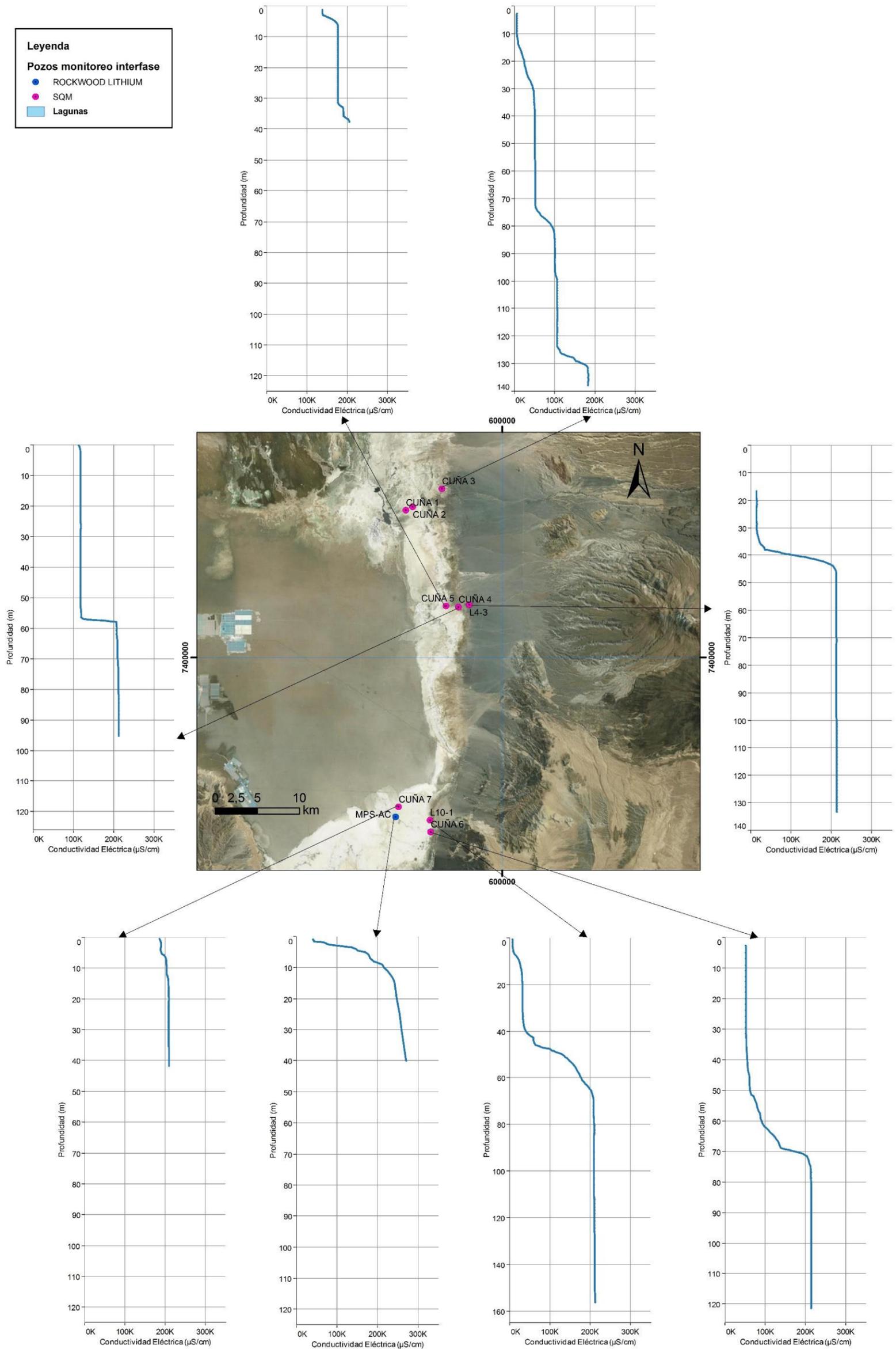
En la Figura 8-52 y Figura 8-53, se muestra la ubicación de estos puntos junto a los perfiles de conductividad eléctrica realizados en Diciembre de 2013, excepto para el MP-01C y MP-03C que corresponde a Noviembre de 2013. Los puntos MPS-C, Cuña 1 y Cuña 2 no se han representado ya que no interceptaron la interfase.

**Figura 8-52 Perfiles de conductividad eléctrica al Sur del Salar**



Fuente: Elaboración propia

**Figura 8-53 Perfiles de conductividad eléctrica al Este y Norte del Salar**



Fuente: Elaboración propia

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

En la Figura 8-52 se muestran los puntos en los que han realizado perfiles de conductividad eléctrica en la zona de las lagunas de La Punta-La Brava y las vegas de Tilopozo. Se observa como la profundidad a la que se ubica la interfase crece al hacia el Sur y el Oeste (Cordón de Lila) debido a la mayor columna de agua dulce. En la Figura 8-53 se observa como de forma similar, en general la profundidad de la interfase crece hacia el Este.

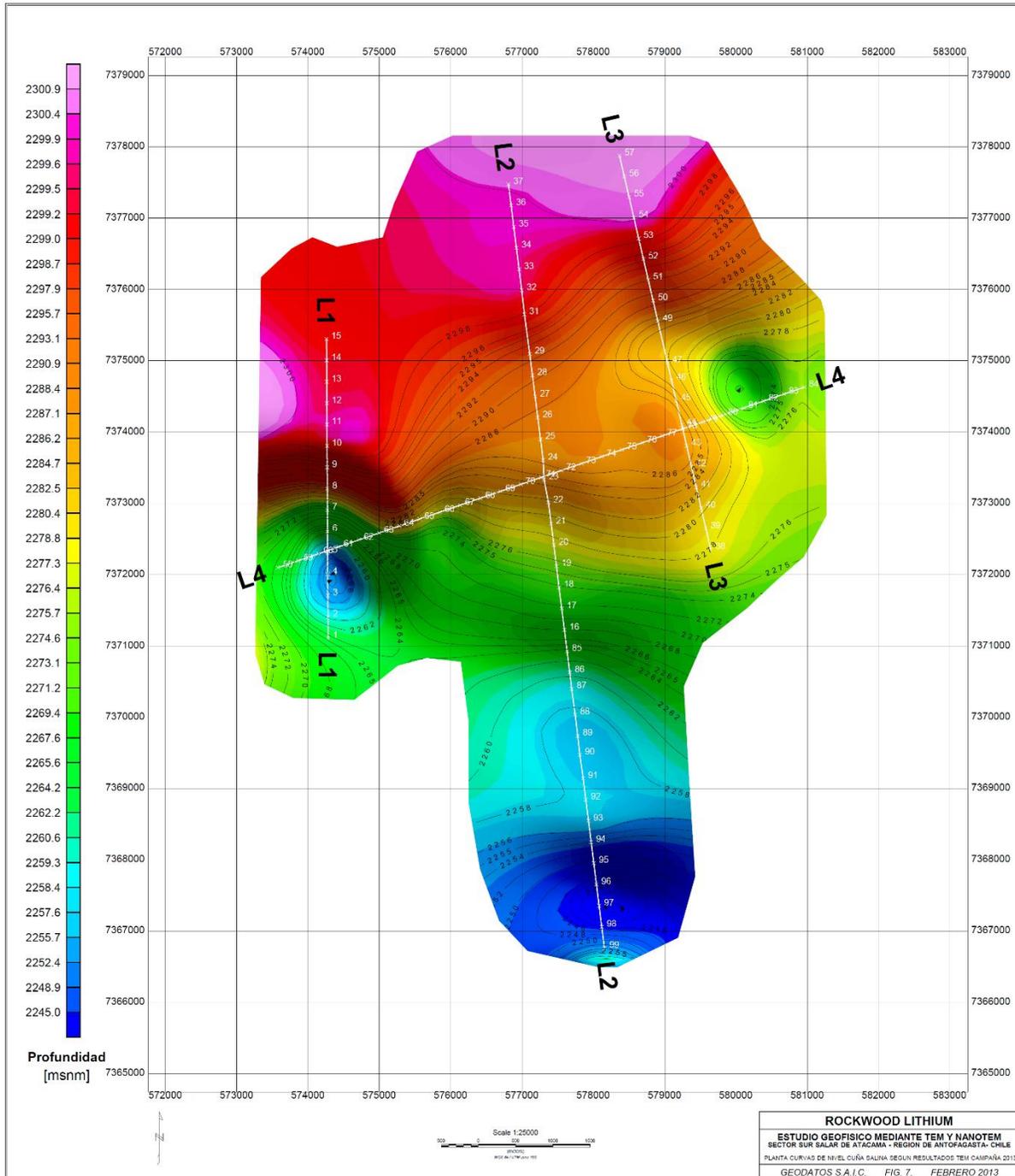
#### 8.4.2.2 Geofísica de Superficie

Para conocer la ubicación de la interfase salina mediante métodos geofísicos, se utilizaron los métodos de Transiente electromagnético (TEM y NanoTEM), que funcionan en el dominio de tiempo.

Las diferencias de resistividad que entregan estos métodos están influenciadas por las características geológicas del terreno, la porosidad y la conductividad eléctrica del fluido intersticial. Es decir, no permiten identificar directamente la posición de la interfase, es necesario pues correlacionar la respuesta geofísica con los perfiles de conductividad eléctrica en los piezómetros o con la conductividad eléctrica obtenida de análisis hidroquímicos en muestras de aguas subterráneas. Por lo tanto, si se dispone de información de estas características, como es el caso de este estudio, una vez identificada la respuesta del cambio de densidad de los fluidos en los perfiles geofísicos, éstos permiten conocer la posición de la interfase en áreas grandes mediante perfiles en dos dimensiones o mallas tridimensionales como la que se presenta en la Figura 8-54.

Para este análisis se revisó toda la información referente a las distintas campañas de geofísica realizadas por Rockwood, las que se encuentran descritas en mayor detalle en el punto 3.2 de este Anexo. Además, de manera complementaria, también se analizó la información de geofísica levantada por las empresas SQM (SQM, 2005 y Conama, 2003) y SLM NX Uno de Peine (2008) lo que permitió completar el análisis de la posición de la interfase salina.

**Figura 8-54 Profundidad de la interfase estimada por TEM en el Sector La Punta La Brava**

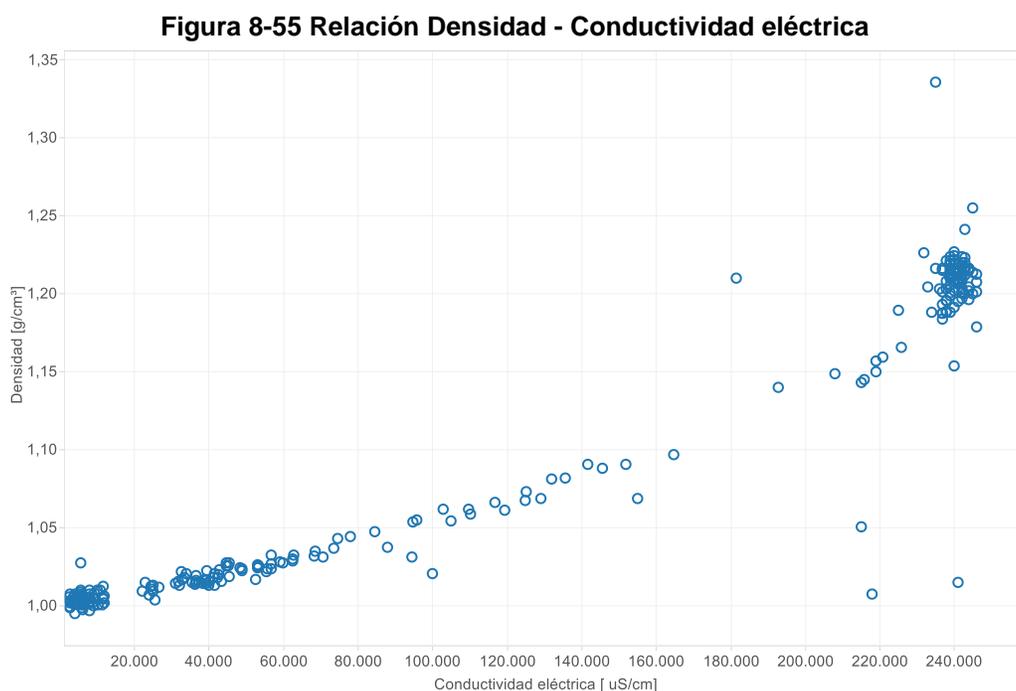


Fuente: Geodatos, 2013

### 8.4.2.3 Relación Densidad- Conductividad eléctrica

Entre los análisis hidroquímicos realizados por Rockwood, se determina la densidad específica por picnometría y la conductividad eléctrica por método potenciométrico. Además se realiza la determinación de la conductividad eléctrica en terreno con un equipo multiparámetro Hanna, Modelo HI 9828.

En la Figura 8-55, como ejemplo, se muestra la relación entre la densidad del agua y la conductividad eléctrica medida a 25°C, de los análisis realizados por ALS, para los muestreos entre Marzo y Diciembre de 2014.

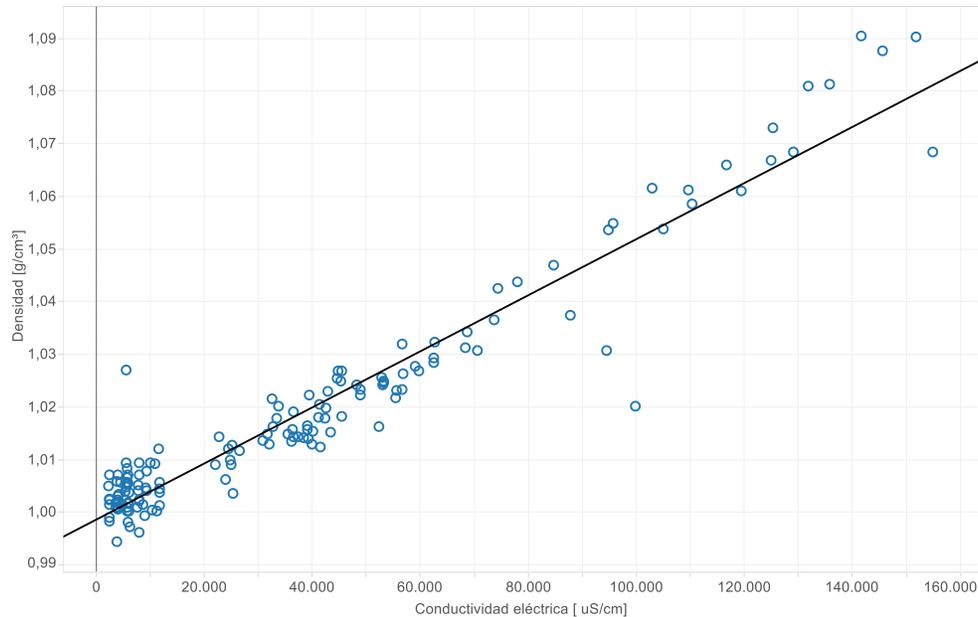


Fuente: Elaboración propia

Se observa que el aumento de la densidad se correlaciona con el aumento de la conductividad eléctrica. Hasta 160.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  aproximadamente la relación es lineal, mientras que por encima de este valor la densidad aumenta en mayor proporción que la conductividad. Esto ocurre debido a que en soluciones tan densas próximas a la saturación, incrementos en la concentración de iones disueltos ya no producen los mismos incrementos en la capacidad conductora del fluido, como sí lo siguen haciendo en la densidad. Además, en estas muestras más concentradas, se aprecia una mayor dispersión de los resultados de estos parámetros. Esto se debe a la mayor dificultad analítica para determinar valores altos de conductividad eléctrica.

Por esta razón se han seleccionado únicamente las medidas hasta 160.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y se han proyectado de nuevo en un gráfico, ver Figura 8-56, donde se observa el ajuste de una recta

**Figura 8-56 Relación Densidad - Conductividad eléctrica hasta 160000  $\mu\text{S/cm}$**



Fuente: Elaboración propia

La ecuación que define esta relación lineal es la siguiente:

$$\gamma = 5,38 \cdot 10^{-7} CE + 0,998$$

Donde:

$\gamma$ = densidad ( $\text{g/cm}^3$ )

CE= conductividad eléctrica ( $\mu\text{S/cm}$ )

Esta expresión permite aproximar la densidad del fluido de manera precisa a partir de datos de conductividad eléctrica. Por lo tanto, aquellos puntos en los que se disponga de información de CE del fluido podrán ser clasificados como salmuera ( $>200000 \mu\text{S/cm}$ ), agua salobre ( $4000-200000 \mu\text{S/cm}$ ) o agua dulce ( $<4.300 \mu\text{S/cm}$ ) (ver capítulo 7), y por tanto servirán para definir la posición de la interfase, tanto en superficie, como en profundidad.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

### 8.4.3 Geometría de la interfase salina

Para definir la posición y geometría de la interfase se ha integrado toda la información existente referente a perfiles de conductividad eléctrica en pozos, geofísica y medidas directas de conductividad eléctrica, cuya fuente sea directamente Rockwood o bien de terceros, como MEL o SQM.

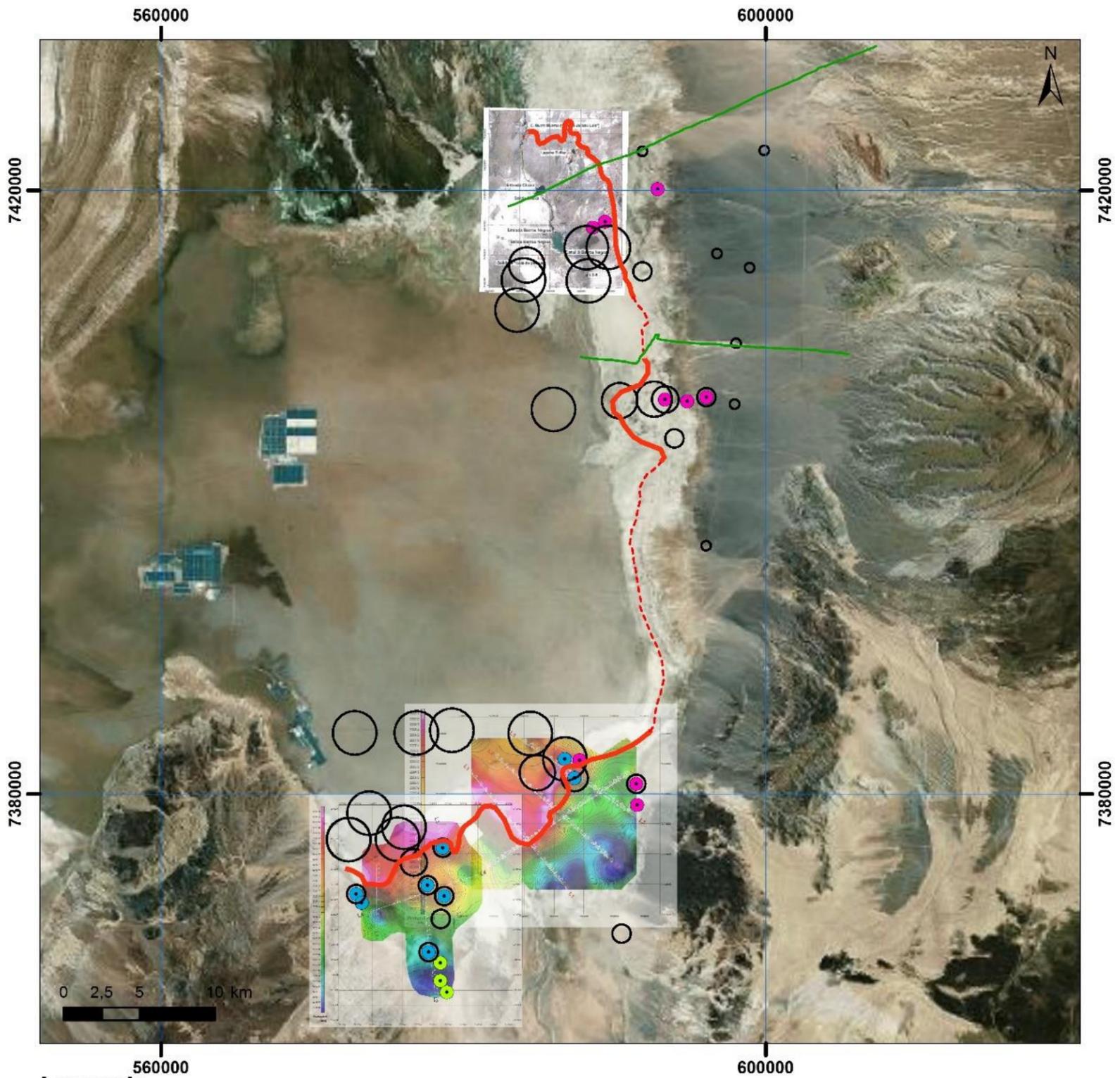
#### 8.4.3.1 Ubicación de la interfase en superficie

La interfase alcanza la superficie del terreno y define una línea que separa un área cuya zona saturada se encuentra rellena completamente por salmuera de otra rellena, al menos en superficie, por agua de menor salinidad.

- En el Sur del Salar se dispone de varios puntos de monitoreo de la interfase y numerosos perfiles geofísicos.
- Al Este del Salar debido a que no se dispone de información propia se ha utilizado la interpretación de la geofísica levantada por SQM y SLM NX-UNO de Peine (No representada en la Figura 8-57), dado que no se dispone de los datos brutos generados por dichas empresas. Se han utilizado, además los de los resultados de los análisis hidroquímicos, los perfiles de conductividad eléctrica reportados por SQM.
- En el Noreste (Sistema Soncor) se ha tomado la posición de la Interfase de Salas, J. et al., 2010. “Hidrogeología del Sistema Lagunar del Margen Este del Salar de Atacama (Chile). Boletín Geológico y Minero, 121 (4): 357-372”, en la figura 4 de dicho informe se muestra la posición de la interfase. Para comprobar que este límite sigue siendo válido, y es concordante con el criterio utilizado por Rockwood, se ha verificado con los valores de conductividad más recientes reportados por SQM (Informe N°14 PSAH) así como con el promedio de los valores reportados (Promedio de las muestras posteriores a Julio de 2008).

La línea de la interfase en superficie se ha representado en la Figura 8-57 junto a la información utilizada para dibujarla, las líneas punteadas indican las zonas donde existe mayor incertidumbre debido a la menor cantidad de información. Los valores de conductividad eléctrica representados corresponden al promedio de los valores reportados, que en el caso de SQM el promedio de las muestras posteriores a Julio de 2008, y en el caso de Rockwood el promedio de los análisis realizados por el laboratorio ALS de los muestreos realizados en el marco del presente EIA (ver Capítulo7).

Figura 8-57 Posición de la interfase salina en superficie



**Leyenda**

- |                          |                         |                                   |
|--------------------------|-------------------------|-----------------------------------|
| ----- Interfase estimada | <b>Promedio CE</b>      | <b>Puntos monitoreo interfase</b> |
| — Interfase medida       | ○ < 5000 uS/cm          | ● ROCKWOOD LITHIUM                |
| — Geofísica L3 L7 SQM    | ○ 5000 - 50000 uS/cm    | ● MINERA ESCONDIDA                |
|                          | ○ 50000 - 100000 uS/cm  | ● SQM                             |
|                          | ○ 100000 - 200000 uS/cm |                                   |
|                          | ○ > 200000 uS/cm        |                                   |

Fuente: Elaboración propia

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

#### 8.4.3.2 Ubicación de la interfase en profundidad

Para conocer la geometría en profundidad de la interfase en la zona de estudio, se han empleado la metodología antes descrita, consistente en la revisión y correlación de perfiles de conductividad eléctrica y geofísica de superficie (calibrada con los perfiles verticales y la hidroquímica).

Para los sectores en que no existía información, se ha calculado la posición teórica de la interfase a partir de la fórmula de Ghijben Herzberg.

Las hipótesis en las que se basan los trabajos de Ghijben Herzberg (Escuder *et al*, 2009) son:

1. El flujo de agua es perfectamente horizontal (hipótesis de Dupuit-Forchheimer). Esto es equivalente a suponer que el potencial es constante a lo largo de cualquier vertical.
2. No existe flujo de salmuera.
3. La interfase es brusca, equivalente a decir que no existe zona de mezcla.

Asumiendo estas tres hipótesis se obtiene una expresión para el cálculo de la profundidad de la interfase en cualquier punto A según el esquema de la Figura 8-58. Esta expresión toma en cuenta dos puntos cualquiera, uno en la interfase (A) y otro en la salmuera (A'), donde en el punto A se debe equilibrar la presión de agua dulce ( $P_d$ ) y la de la salmuera ( $P_s$ ).

Según la hipótesis 1, la presión de agua dulce se puede obtener como el peso de columna de agua que tiene por encima del punto A, tal como se muestra en la siguiente expresión.

$$P_d = (h + z)\gamma_d$$

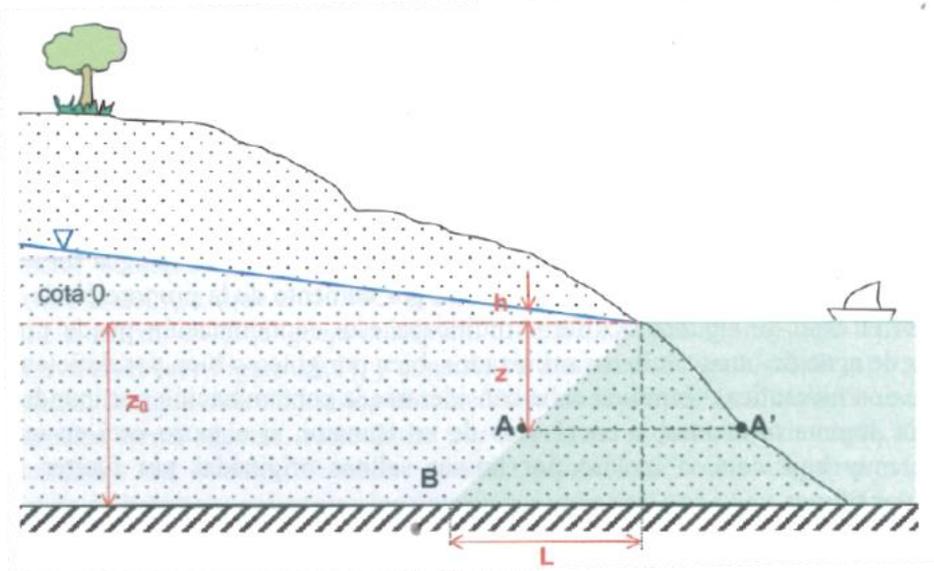
Siendo:

h= cota sobre el nivel de base en la vertical del punto A

z= profundidad de la interfase bajo el nivel de base en el punto A

$\gamma_d$ = Densidad del agua dulce

**Figura 8-58 Posición de la interfase según las hipótesis de Ghijben-Herzberg**



Fuente: Escuder et al, 2009

Para obtener la presión de la salmuera se asume la hipótesis 2. De esta manera, en ausencia de flujo de salmuera, la presión en A y A' debe coincidir. En A' esta expresión se obtiene de modo semejante al anterior, sobre la base de que la ausencia de flujos verticales implica que la presión se puede obtener como el valor hidrostático para el fluido de densidad  $\gamma_s$ .

$$P_s = z \gamma_s$$

Si ahora igualamos ambas presiones ( $P_d = P_s$ ) y despejamos z, tenemos:

$$z = \frac{\gamma_d}{\gamma_s - \gamma_d} h = h\alpha$$

Siendo  $\alpha$  (adimensional), el llamado parámetro de contraste de densidad, que se define como:

$$\alpha = \frac{\gamma_d}{\gamma_s - \gamma_d}$$

Para comprobar la precisión de la posición de la interfase calculada mediante la relación de Ghijben Herzberg, se ha calculado la posición teórica en los puntos en los que se realizan los perfiles de conductividad eléctrica (Tabla 8-6), considerando lo siguiente:

- Los valores de nivel estático corresponden a Noviembre-Diciembre de 2013.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

- La densidad se ha calculado mediante la relación descrita en el punto 8.4.2.3 ( $\gamma = 5,38 \times 10^{-7} \text{ CE} + 0,998$ ). La conductividad eléctrica utilizada corresponde al promedio de los valores medidos y reportados, en los casos en los que no se reporta corresponde de manera aproximada a la de la parte superior del perfil de conductividad eléctrica.
- Se asume la densidad de salmuera  $1,22 \text{ gr/cm}^3$ .
- Se ha tomado 2.998 m.s.n.m. como nivel de base para la salmuera (cota 0 en la Figura 8-58).

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 8-7

**Tabla 8-7 Cálculos posición interfase con la relación de Ghijben Herzberg**

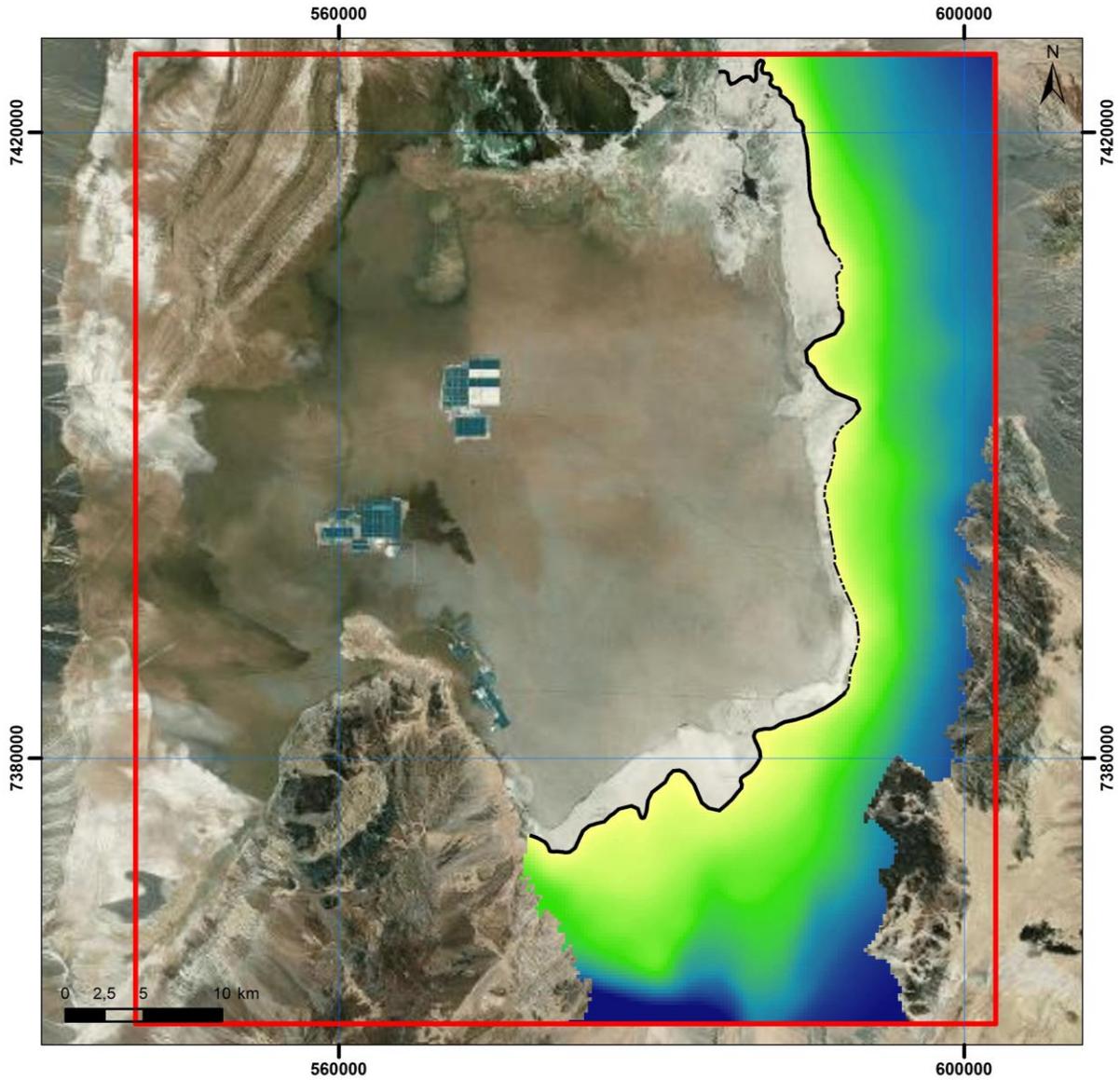
Punto	CE uS/cm	Cota nivel (m.s.n.m)	$\gamma_d$	$\alpha$	z	Cota interfase calculada (m.s.n.m)	Diferencia cota real- calculada (m)
MP-01C	23.975	2.300,74	1,011	4,85	13,3	2.285	5
MP-02C	11.689	2.302,40	1,005	4,67	20,5	2.277	5
MP-03C	7.952	2.302,04	1,003	4,62	18,6	2.279	5
MP-04C	5.002	2.307,15	1,001	4,57	41,8	2.256	2
MP-05C	45.856	2.301,62	1,023	5,20	18,8	2.279	1
MP-06C	10.500	2.303,92	1,004	4,65	27,5	2.270	6
MPS-AC	59.242	2.299,47	1,030	5,43	8,0	2.290	4
Cuña 3	5.000	2.318,21	1,001	4,57	92,5	2.206	13
Cuña 4	110.000	2.305,28	1,058	6,51	47,4	2.251	3
Cuña 5	85.000	2.300,23	1,044	5,94	13,2	2.285	8
Cuña 6	50.000	2.304,21	1,025	5,27	32,7	2.265	16
L4-3	19.410	2.303,07	1,009	4,78	24,2	2.274	11
L10-1	19.137	2.304,40	1,009	4,78	30,5	2.267	1
TP-1	3.000	2.309,64	1,000	4,55	52,9	2.245	1
TP-2	12.000	2.307,23	1,005	4,67	43,1	2.255	2
TP-3	3.000	2.308,59	1,000	4,55	48,2	2.250	2

Fuente: Elaboración propia

Las diferencias entre la interfase medida y la calculada están entre 1 y 16 m, con una diferencia promedio de 5 m, siendo el error del cálculo mayor en los pozos en los que hay una zona de mezcla amplia (Figura 8-52 y Figura 8-53). Esto se debe a que efectivamente estos puntos son los que menos cumplen la hipótesis 3, de no existencia de zona de mezcla, o de la hipótesis 1, que supone flujo perfectamente horizontal.

Con la integración del análisis de la información anteriormente expuesta y estos resultados, se ha representado en la Figura 8-59 la posición de la interfase en profundidad. Para esta representación se utilizó el software ArcMap para interpolar las profundidades de forma de obtener una superficie continua.

**Figura 8-59 Superficie de la interfase**



**Legenda**

Dominio Modflow Adenda 5

**Cota altimétrica interfase (msnm)**

2300

2035

**Interfase Salina en superficie**

Interfase salina medida

Interfase salina estimada

Fuente: Elaboración propia

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

Como se puede observar, la superficie de la interfase salina se profundiza hacia el Sur y hacia el Este. En el Oeste y Suroeste la salmuera estaría en contacto directo con el basamento hidrogeológico, mientras que en la zona norte se estima la presencia de con una zona de mezcla muy amplia de varios kilómetros de ancho.

#### 8.4.4 Evolución temporal de la interfase

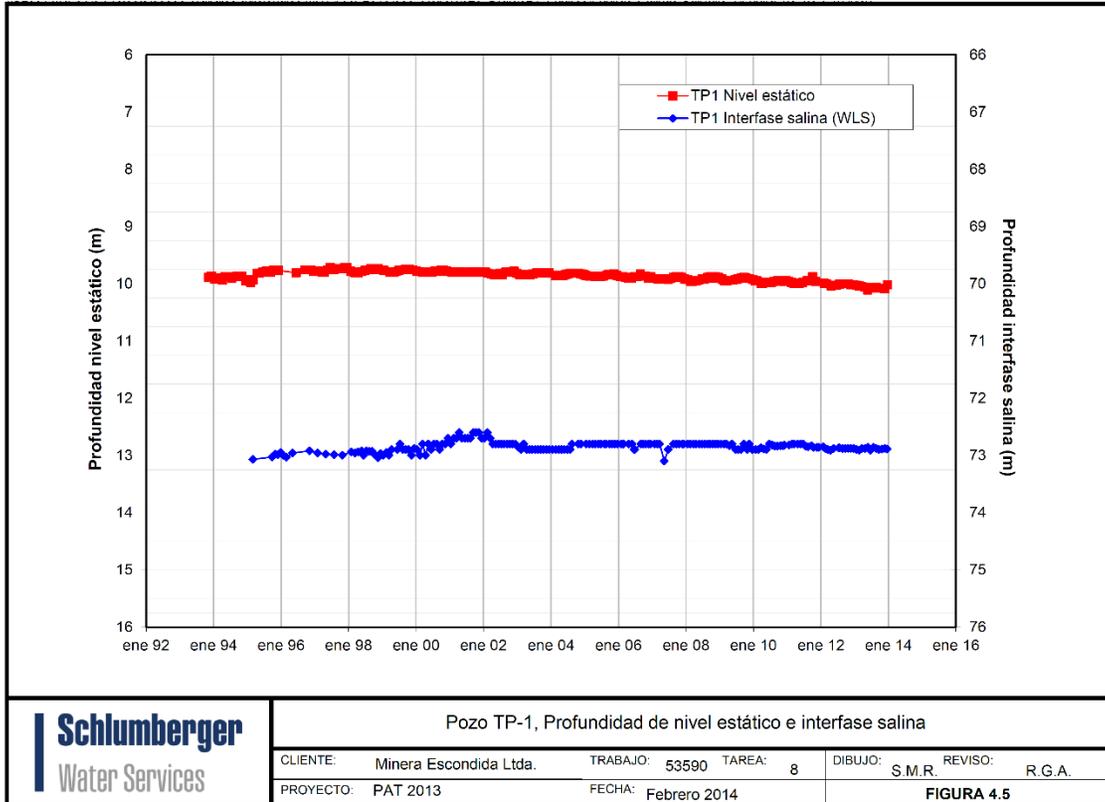
Como se ha indicado anteriormente, la posición de la interfase se debe a un equilibrio dinámico entre la presión del aguas de distinta densidad. Las compañías Minera Escondida Ltda y SQM monitorean la posición de la interfase, desde los años 1994 y 2010, respectivamente, mientras Rockwood lo ha iniciado en el año 2013 en el marco del presente EIA.

Rockwood realiza estas mediciones en 8 puntos ubicados en el de la Zona Marginal Sur frente a las lagunas del sistema La Punta-La Brava y el sistema Peine (ver Figura 8-52). Los perfiles conductividad realizados por Rockwood desde Octubre de 2013 a Noviembre de 2014 se muestran en el punto 7.4 de este informe. Las medidas son realizados mediante una Solinist modelo TLC-107.

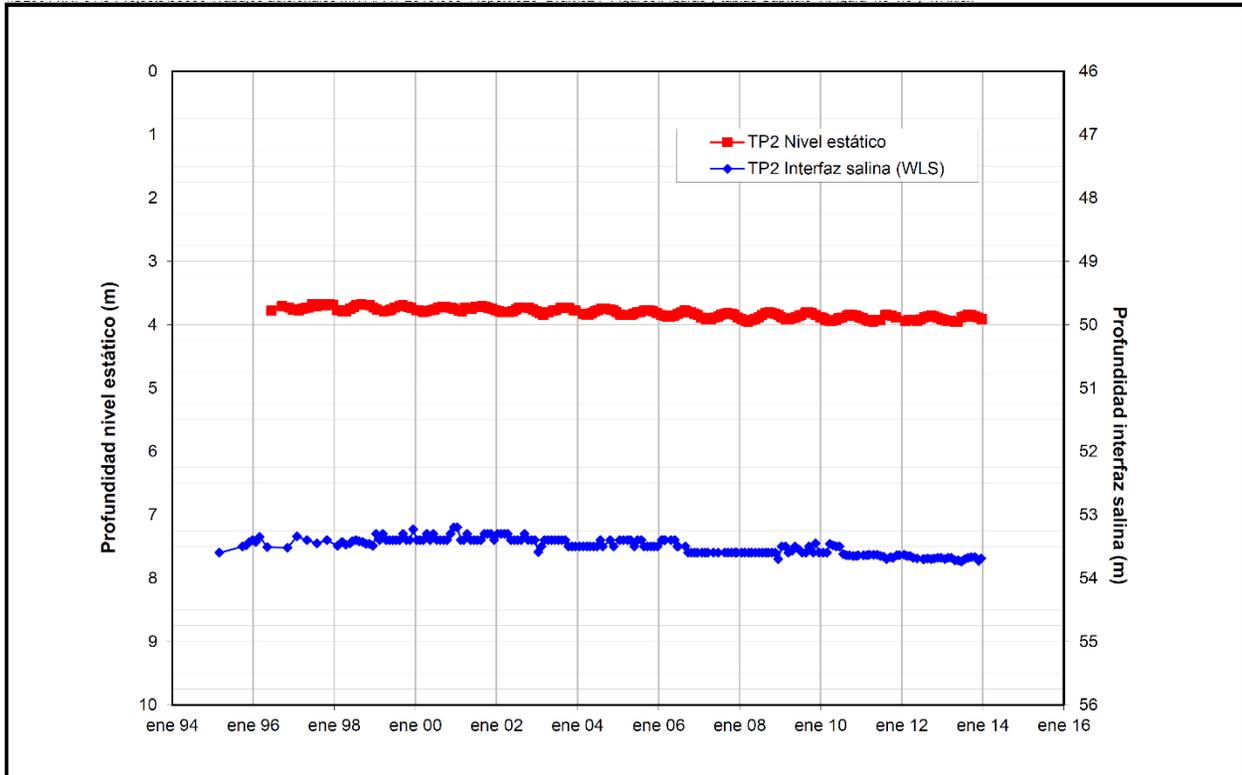
Los perfiles realizados muestran como la posición de la interfase no ha variado, es decir la posición del quiebre de conductividad se mantiene. El rango de medidas de la sonda TCL-107, alcanza sólo hasta 80.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , por lo que los resultados obtenidos por encima de este valor no son confiables. Sin embargo, si es posible detectar la posición de la interfase en relación a la profundidad donde se produce un cambio brusco de conductividad. Se observa una disminución de la conductividad eléctrica en el fin de los perfiles, esto se debe al contacto del sensor con el fondo de la perforación.

Minera Escondida mide la posición de la interfase en 3 puntos ubicados en el borde Sur del Salar, en el callejón de Tilopozo. En la Figura 8-60, Figura 8-61 y Figura 8-62 se la evolución de la interfase en los pozos TP-1, TP-2 y TP-3 respectivamente.

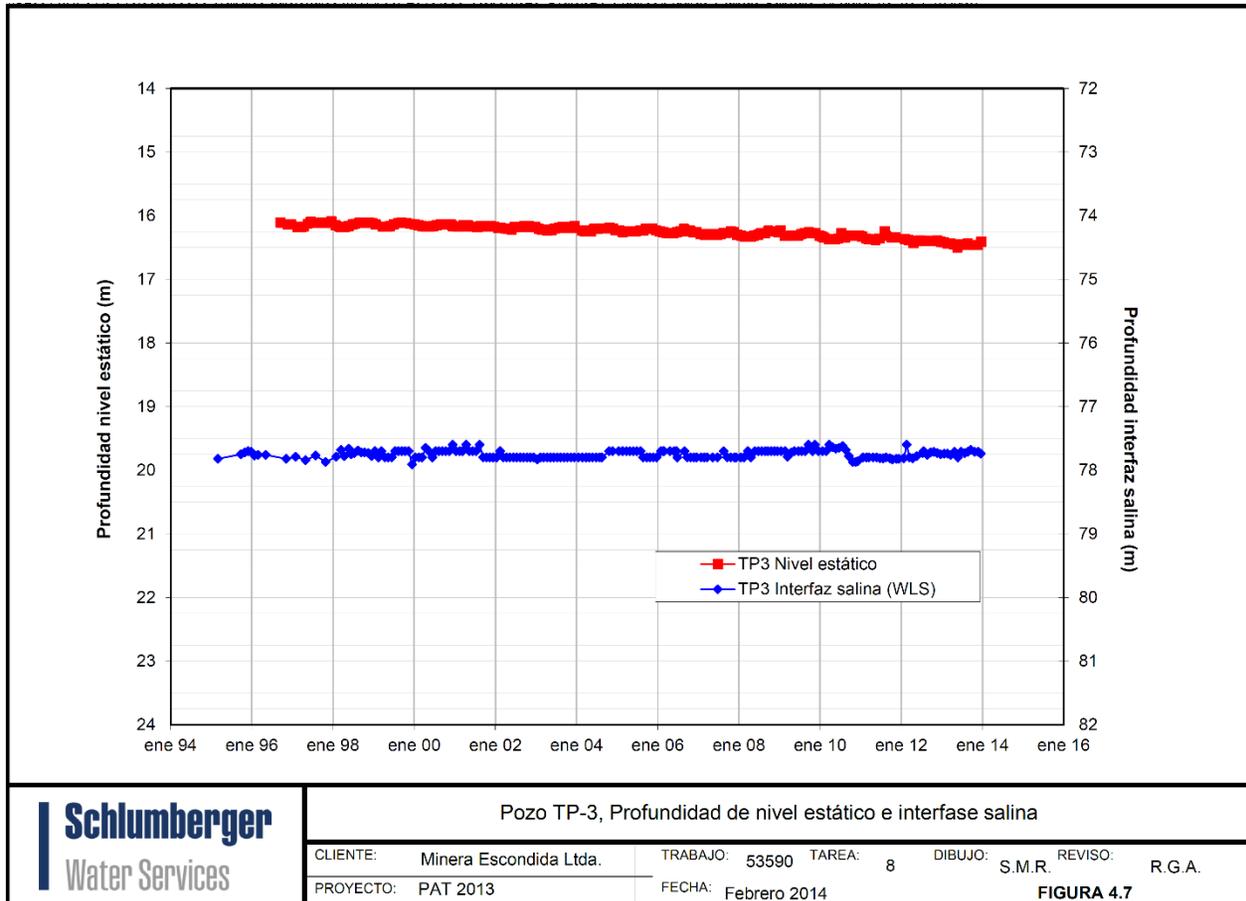
**Figura 8-60 Evolución de la posición del nivel y la interfase en el punto TP-1**



**Figura 8-61 Evolución de la posición del nivel y la interfase en el punto TP-2**



**Figura 8-62 Evolución de la posición del nivel y la interfase en el punto TP-3**

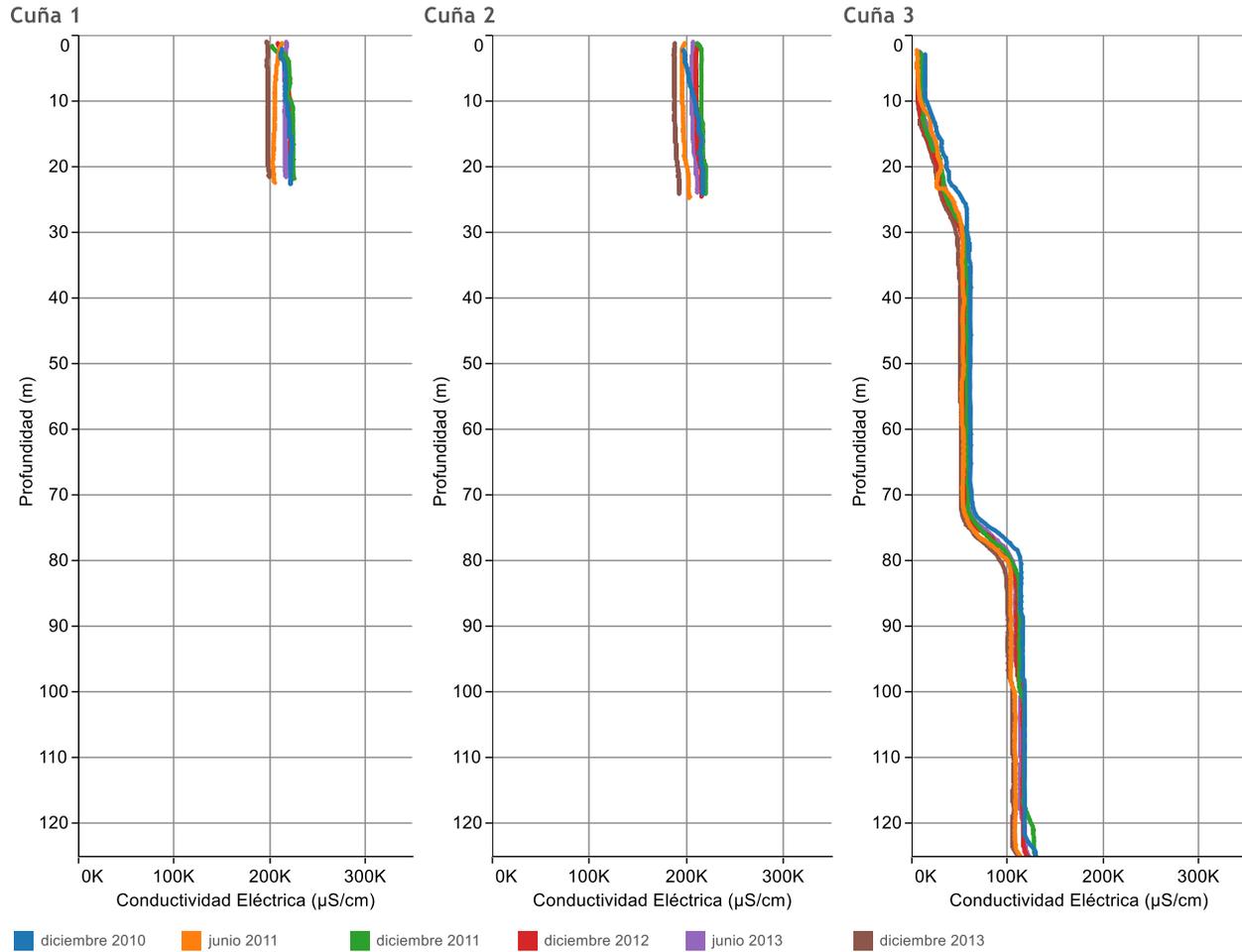


Fuente: MEL 2014

En el punto TP-1 el nivel freático desciende lentamente en el periodo de registro (total de 30 cm aproximadamente), mientras, la posición de la interfase salina asciende de 1998 hasta 2002 (20 cm aproximadamente) manteniéndose estable después de dicha fecha. En el punto TP-2 el nivel freático también desciende lentamente en el periodo de registro (10 cm aproximadamente) y la posición de la interfase desciende a la misma tasa (10 cm aproximadamente). El punto TP-3 muestra el mismo descenso que en los dos casos anteriores, de 25 cm, pero en este caso, la posición de la interfase no presenta una tendencia clara, se observan pequeños ascensos y descensos aunque la posición final no difiere de la inicial.

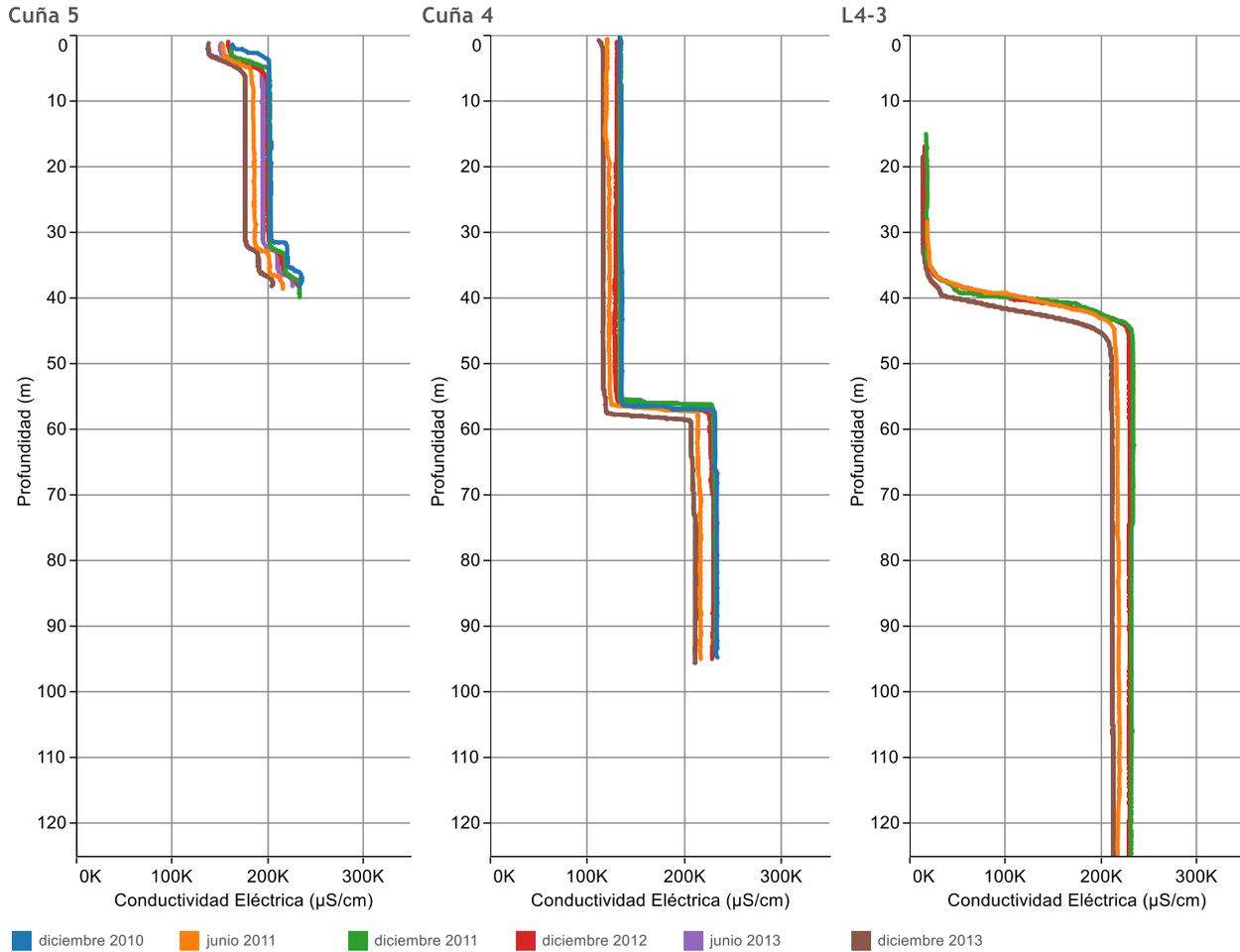
En la Figura 8-63, Figura 8-64 y Figura 8-65 se observan los pozos en los que la empresa SQM realiza monitoreo de la interfase salina en forma semestral en 9 puntos ubicados en el borde Este frente a las lagunas de Soncor, Quelana y el sistema Peine. En estas figuras se han representado los perfiles, desde Diciembre de 2010 a Diciembre de 2013. Solamente para los pozos L10-1 y L4-3, el período de medición disponible es desde Junio 2011 a Diciembre 2013.

**Figura 8-63 Perfiles de conductividad eléctrica para los pozos Cuña 1, Cuña 2 y Cuña 3 de  
Diciembre de 2010 a Diciembre de 2013**



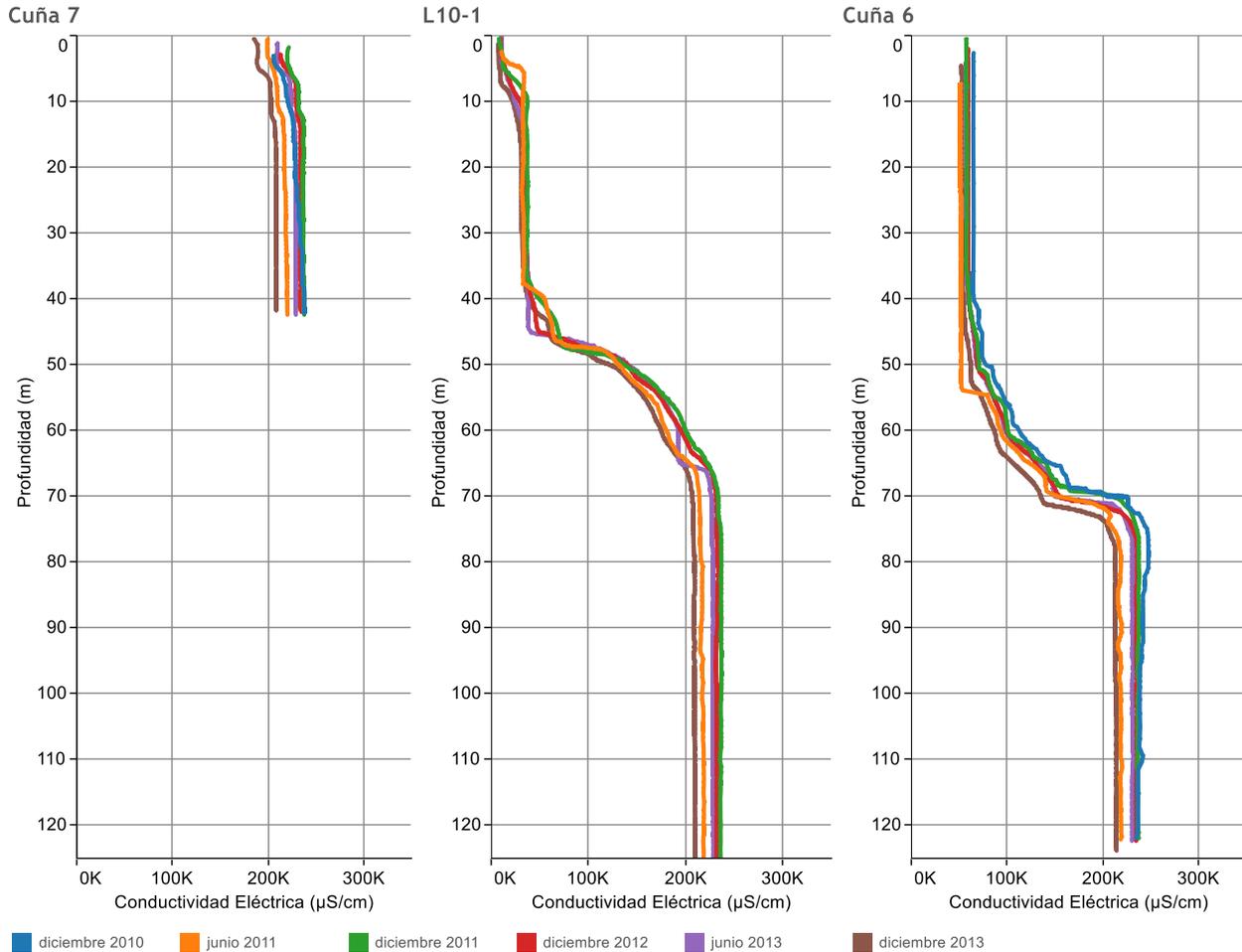
Fuente: Elaboración propia con datos de terceros

**Figura 8-64 Perfiles de conductividad eléctrica para los pozos Cuña 5, Cuña 4 y L4-3 de Diciembre de 2010 a Diciembre de 2013**



Fuente: Elaboración propia con datos de terceros

**Figura 8-65 Perfiles de conductividad eléctrica para los pozos Cuña 7, L10-1 y Cuña 6 de  
Diciembre de 2010 a Diciembre de 2013**



Fuente: Elaboración propia con datos de terceros

En todas estas figuras, se observa como los perfiles mantienen la misma forma y las profundidades a las que se producen los cambios de conductividad del agua, correspondiente a la posición de la interfase, no presentan variaciones significativas. Las pequeñas diferencias que se pueden observar están probablemente causadas por diferencias de calibración de los equipos. Se puede afirmar de esta manera que no se observa una tendencia que muestre que se haya producido un movimiento de la interfase durante el período de medición.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

## 9 MODELO CONCEPTUAL Y BALANCE HÍDRICO

### 9.1 Modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico

#### 9.1.1 Modelo conceptual de la Cuenca

El modelo conceptual que explica el funcionamiento hidrogeológico de la Cuenca del Salar de Atacama y de los sistemas lagunares existentes en la Zona Marginal ha sido desarrollado utilizando la información de terreno generada en el marco de este EIA, así como la surgida de los trabajos realizados por terceros.

La información de terreno ha consistido en perfiles geofísicos, construcción de piezómetros, análisis físico-químico e isotópico de aguas, mediciones de evaporación con domos, perfiles de conductividad en los piezómetros y monitoreo de niveles estáticos, conforme han sido descritos en los capítulos anteriores y en los Apéndices de este Anexo.

En cuanto a los trabajos realizados en la Cuenca por terceros, ha sido considerado el de Mardones 1986; el de MEL 1996; el de Ortiz et al. 2014, IGSA 2005, y el de Salas et al. 2009 y 2010, entre otros.

El modelo conceptual explica la relación existente entre la salmuera (agua del Núcleo) y los acuíferos de agua dulce-salobre<sup>9</sup>. Estos últimos abarcan las principales zonas de recarga, desde dónde escurren los flujos principales y la zona con las mayores salidas de agua en la Cuenca por evaporación y dónde se produce la formación de los sistemas lagunares de Soncor, Aguas de Quelana, Peine y La Punta-La Brava. Un mayor detalle del funcionamiento hidrogeológico de cada uno de estos sistemas, se describe en el Apéndice I: Funcionamiento hidrogeológico de los sistemas lagunares: La Punta-La Brava, Peine, Aguas de Quelana y Soncor, donde se incluye un modelo conceptual local, específico para cada sistema.

La Cuenca del Salar de Atacama es un sistema cerrado o cuenca endorreica, donde toda el agua que entra en la Cuenca por precipitación drena hacia el depocentro de la misma, sin que existan cauces superficiales que provengan de otras cuencas, ni que salgan hacia otras. Esta recarga se produce por evaporación (desde el terreno, por evapotranspiración de las plantas o en lámina libre) o como resultado de los bombeos (de salmuera, agua dulce o salobre). La cuenca endorreica, también denominada “sistema de drenaje interno”, se define a partir de la topografía y la cuenca hidrológica y corresponde al área donde el agua no tiene salida al mar.

Para las aguas subterráneas, algunos autores (Rissmann, 2015) proponen la existencia de flujos subterráneos regionales, profundos, que existirían entre las cuencas altiplánicas del área y la región. El

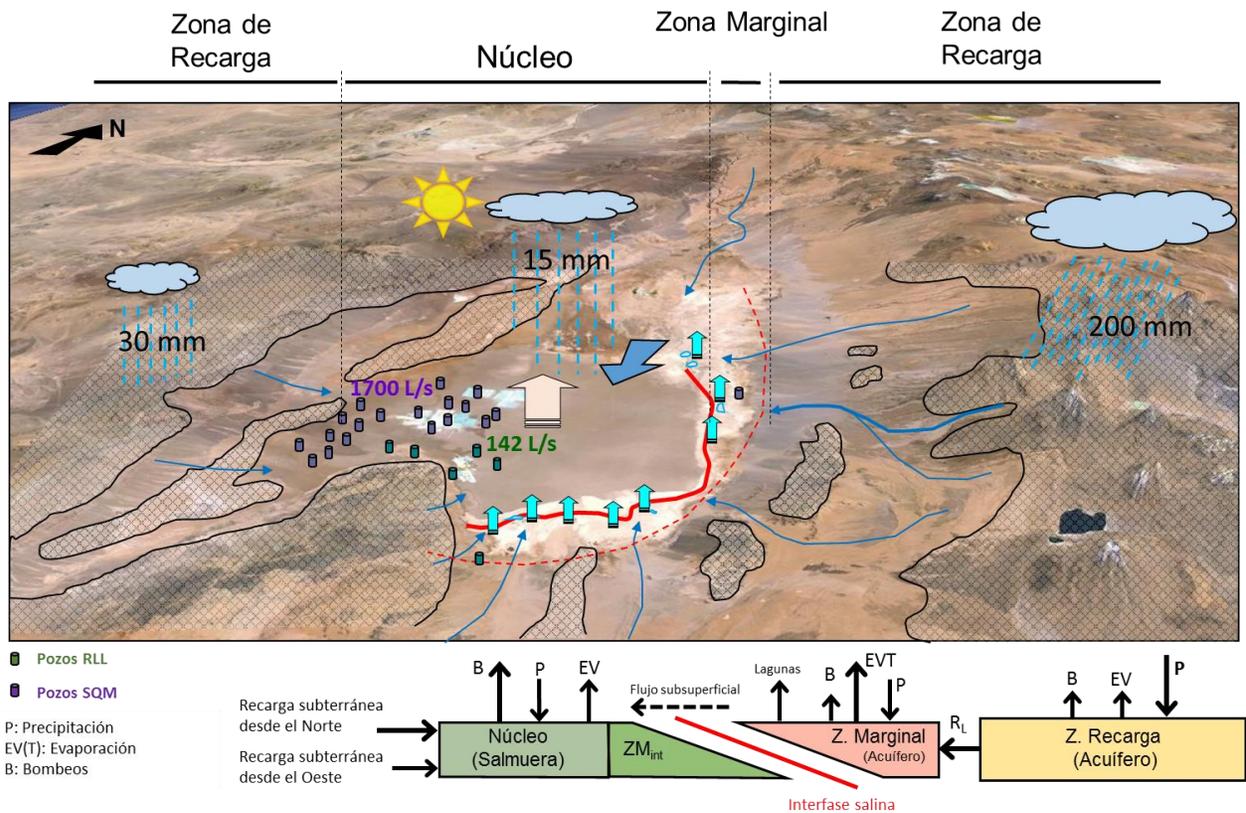
---

<sup>9</sup> Se denomina acuíferos de agua dulce-salobre, a aquellos acuíferos situados aguas arriba de la interfase salina (Este y Sureste de la misma), que presentan un gradiente de salinidad desde las zonas de recarga (aguas dulces) hasta la Zona Marginal (aguas salobres).

modelo conceptual definido para este estudio, supone que no existen flujos subterráneos entre la Cuenca del Salar de Atacama y las cuencas adyacentes, puesto que estos flujos regionales son difíciles de cuantificar, no están evaluados en la bibliografía disponible y se considera que no juegan un rol significativo en la modelación de los efectos del proyecto, si los hubiere, sobre los sistemas ambientales de interés, objeto de evaluación.

En la Figura 9-1 se muestra el esquema general del funcionamiento hidrológico de la Cuenca del Salar, en la cual se han diferenciado tres zonas principales, Núcleo, Zona Marginal, y Zona de Recarga, considerando su rol en el balance hídrico y la división en subcuencas que se describe en el punto 9.3.

**Figura 9-1 Esquema del modelo conceptual general de funcionamiento hidrológico de la cuenca del Salar de Atacama**



Fuente: Elaboración propia

Las tres zonas principales que han sido diferenciadas, se describen a continuación, así como los procesos hidrológicos que en ellas ocurren.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

- **Zona de Recarga:**

Esta área de la Cuenca corresponde a la zona aportante del Salar de Atacama (considerando Salar al Núcleo y Zona Marginal), donde se producen las mayores precipitaciones, que aumentan con la altura topográfica y fluyen de manera subterránea principalmente como recarga hacia la Zona Marginal. Las precipitaciones alcanzan valores promedio de 200 mm anuales en el borde Este de la Cuenca, y de 30 mm en el borde Oeste, que contrastan con las precipitaciones que ocurren en el Núcleo del Salar de 11,7 mm.

Las precipitaciones se producen principalmente, durante los meses de verano, en lo que se denomina el invierno boliviano, acumulándose en las altas cumbres en forma de nieve y derritiéndose durante el año. Parte de esta nieve sublima, retornando a la atmósfera, o se derrite y evapora cuando todavía es humedad en el terreno. El resto del agua escurre aguas abajo por los cursos de agua intermitentes que fluyen por las quebradas, e infiltran hacia los acuíferos que fluyen hacia la Zona Marginal, y en sector Oeste de la Cuenca, hacia el núcleo del Salar.

En la Zona de Recarga prácticamente no se produce evaporación debido a la profundidad a la que se encuentra la superficie freática respecto a la superficie del terreno. Únicamente se ha tenido en cuenta desde las escasas zonas de cultivo, bofedales y lagunas que se han identificado.

En los bordes Oeste y Suroeste del Salar, la descarga de estas aguas es directamente al Núcleo, mientras que en los bordes Norte, Este y Sureste estas aguas configuran la principal recarga de los acuíferos de agua dulce-salobre de la Zona Marginal.

- **Zona Marginal:**

Esta zona, ubicada aguas abajo de la anterior (según la dirección de flujo) y adyacente al Núcleo en sus bordes Norte, Este y Sureste, presenta una topografía relativamente plana con una ligera inclinación hacia el Núcleo. Configura la principal zona de descarga por evaporación de toda la Cuenca debido a la cercanía de los niveles subterráneos a la superficie del terreno y a la presencia de los sistemas lagunares de Soncor, Aguas de Quelana, Peine y La Punta-La Brava.

Desde un punto de vista hidrogeológico, la Zona Marginal se puede dividir en dos sectores, la Zona Marginal Norte, en la que existe una interfase salina difusa y la Zona Marginal Este y Sur, con una interfase salina brusca.

- Zona Marginal Este y Sur:

En esta zona, la interfase salina brusca obstaculiza el flujo subterráneo hacia el Núcleo empujando el agua salobre hacia la superficie del terreno formando lagunas, frente a quebradas o callejones donde el flujo subterráneo de recarga es mayor, o bien amplias zonas de “playa húmeda”, donde la evaporación desde

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

el Acuífero es también de gran magnitud. La existencia de estos sistemas lagunares se relaciona con la magnitud del flujo procedente de las zonas altas de recarga, y la presencia de la interfase salina es producto del contraste de densidades entre la salmuera del Núcleo y las aguas salobres del Acuífero.

La existencia de lagunas de carácter permanente en la Zona Marginal no está relacionada directamente con eventos o períodos de lluvia, ya que estos sistemas están presentes en períodos de baja o nula precipitación. Esto ocurre dado que existe un flujo subterráneo permanente que alimenta la Zona Marginal y el Núcleo desde los acuíferos situados en la parte alta de la Cuenca. Este flujo es regulado por el volumen almacenado en dichos acuíferos.

A partir de la información levantada en terreno en el marco de este EIA, principalmente por geofísica y perfiles de conductividad eléctrica en pozos, se ha podido definir la interfase salina en profundidad, así como el límite superficial entre la salmuera y el acuífero de agua salobre, es decir, delimitación donde la interfase alcanza la superficie del terreno. En el punto 8.4 de este Anexo se describe con detalle la Interfase Salina.

La Zona Marginal Este y Sur, queda dividida por la interfase salina en dos zonas:

- 1) Zona Marginal Acuífero, donde coexisten de forma permanente el acuífero de agua salobre por encima de la interfase y el acuífero de salmuera más profundo debajo del anterior.

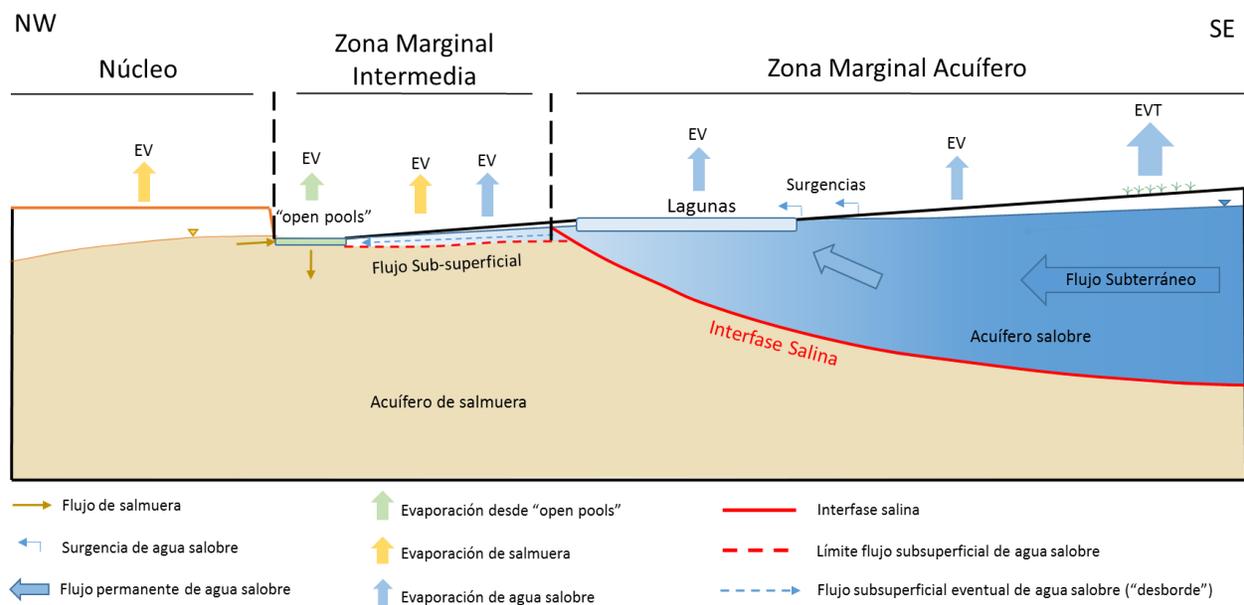
Las aguas del acuífero superficial se definen como salobres dados los rangos de conductividades que presentan y que aumentan a lo largo de las líneas de flujo hacia el Núcleo, o depocentro de la Cuenca, desde valores de 5.000 hasta 200.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Este incremento de la salinidad de sus aguas se debe principalmente a dos factores:

- i. Proceso de evaporación que experimentan las aguas del acuífero debido a que el nivel freático está próximo a superficie. Este fenómeno es mayor en verano que en invierno, dada la variación estacional de los parámetros meteorológicos que se relacionan con la evaporación (temperatura, horas diarias de sol, viento, humedad del aire, etc.), resultando en oscilaciones estacionales en los niveles piezométricos someros, así como en algunos parámetros químicos e isotópicos de las aguas.
  - ii. Interacción con las sales (sulfatos, carbonatos, y cloruros) de los niveles evaporíticos presentes en esta zona que, por la capacidad de disolución del agua, incrementan la concentración de elementos disueltos en las mismas.
- 2) Zona Marginal Intermedia, situada entre la interfase en superficie y el límite de la costra de cloruros (Núcleo) que contiene salmuera.

En profundidad, el acuífero de la Zona Marginal Intermedia está constituido únicamente por salmuera. Sin embargo en la zona superficial del mismo, existe un nivel de extensión variable y de espesor inferior a 2 metros, en el que se observa la presencia de agua salobre.

En la Figura 9-2 se muestra esquemáticamente el modelo conceptual de funcionamiento de la Zona Marginal Este y Sur.

**Figura 9-2 Esquema de modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico de la Zona Marginal Este y Sur**



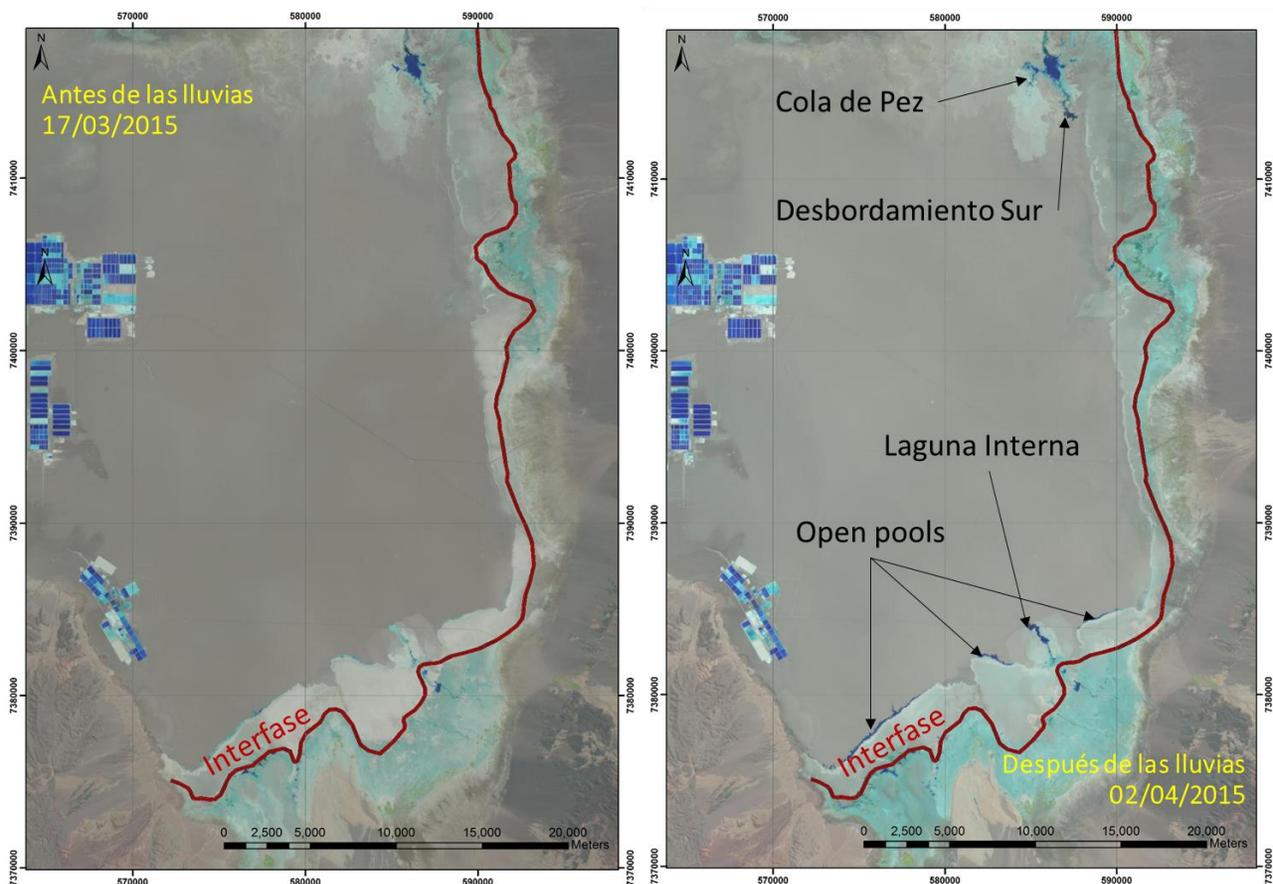
Fuente: Elaboración propia

En ocasiones, cuando existen eventos de precipitación importantes, o bien durante la temporada invernal cuando la evaporación es menor, se genera un flujo sub-superficial o de “desborde” de aguas salobres desde la Zona Marginal Acuífero, por encima de la interfase salina hacia el Núcleo. Estas aguas de desbordamiento se evaporan en gran medida directamente desde el terreno en la Zona Marginal Intermedia, dado el escaso espesor de la zona no saturada y fluyen hacia el centro del Salar disolviendo sales de la costra convirtiéndose finalmente en salmuera que recarga el acuífero del Núcleo del Salar. Cuando el flujo de desbordamiento sobre la interfase es de mayor magnitud, se forman cuerpos de agua superficiales, de carácter eventual, denominados en este estudio “open pools”.

Este fenómeno, difícil de cuantificar, se ha tenido en cuenta en los cálculos del balance hídrico, considerando que en la Zona Marginal Intermedia se produce evaporación tanto de salmuera como de agua salobre procedente de la Zona Marginal Acuífero.

La formación de los “open pools” se observa claramente en las proximidades de los sistemas lagunares de La Punta-La Brava y de Peine. A partir de mediciones en terreno y de análisis de imágenes satelitales LANDSAT se ha observado, en el límite entre la costra de cloruros y la costra de sulfatos, la presencia de estos cuerpos de agua temporales que se manifiestan en los meses de invierno, cuando la evaporación es menor, o bien tras eventos de precipitación importantes, que suelen ser mayores en verano. En la Figura 9-3 se muestran dos imágenes tomadas antes y después de las lluvias que tuvieron lugar en marzo de 2015.

**Figura 9-3 Presencia de agua salobre en la Zona Marginal Intermedia**



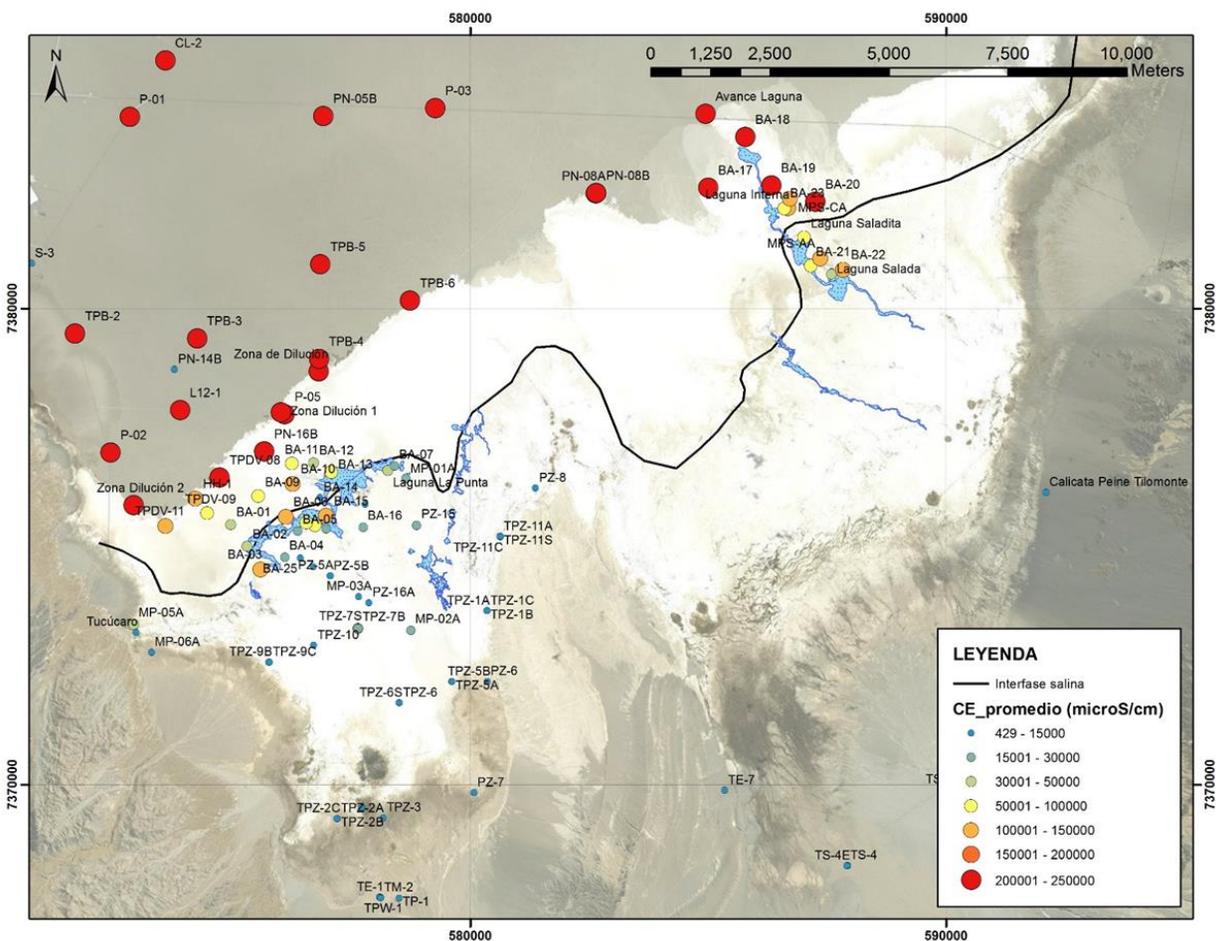
Fuente: Elaboración propia a partir de imágenes LANDSAT

En el caso de la laguna Interna, la disolución de la costra de cloruros después de cada evento de “desborde” produce un cambio en la morfología de la costra (aplanamiento) favoreciendo el avance de aguas salobres hacia el Núcleo en cada evento posterior. Aparte del desarrollo de “open pools” en la zona sur, también se han observado crecimientos importantes en el sistema lagunar de Soncor (Cola de Pez y Desbordamiento Sur).

Los resultados de los análisis químicos e isotópicos de estas aguas muestran efectivamente que son aguas salobres, recientes y que por efecto de la evaporación y probablemente de la disolución de la costra de sal, terminan convirtiéndose en salmuera e infiltrando en el Núcleo.

Para confirmar el hecho de la presencia de aguas salobres en superficie en la Zona Marginal Intermedia, se ha analizado la composición de las aguas a partir de los datos de la red de monitoreo de Rockwood. En el mapa de la Figura 9-4, se muestran los valores promedio de conductividad eléctrica de los puntos de monitoreo de agua subterránea y se observa que, en los sistemas de La Punta-La Brava y de Peine, en diversos puntos de profundidad inferior a 2 m situados hacia el norte de la interfase, donde sería esperable encontrar únicamente salmuera, la conductividad eléctrica promedio es inferior a 200.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , confirmando que parte de esta Zona Marginal está evaporando agua salobre.

**Figura 9-4 Distribución de conductividad eléctrica de aguas subterráneas en la Zona Marginal sur**



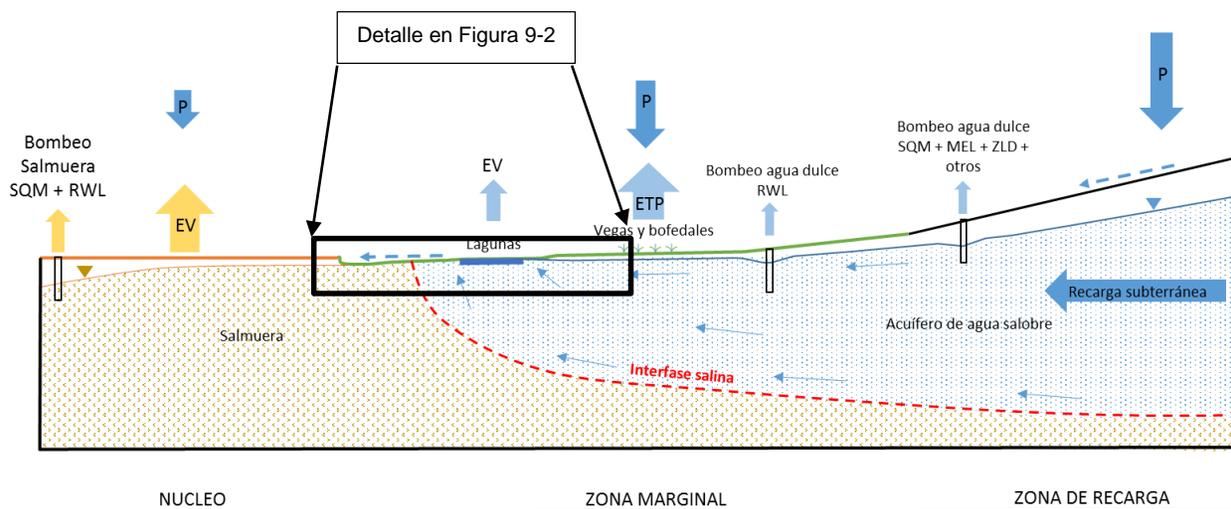
Fuente: Elaboración propia

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

El modelo hidrogeológico de funcionamiento de los sistemas lagunares se puede sintetizar con el esquema de sección transversal de la Figura 9-5. En éste se muestra cómo el afloramiento de aguas en las lagunas (La Punta-La Brava, Aguas de Quelana) se relaciona con la presencia de la interfase que hace ascender las aguas y con la topografía del terreno en relación con el nivel de agua del acuífero (Peine, Soncor).

El resumen del funcionamiento hidrogeológico de cada uno de estos sistemas, se incluye en el siguiente punto 9.1.2 y el detalle con toda la información que demuestra este comportamiento, se presenta en el Apéndice I: Funcionamiento hidrogeológico de los sistemas lagunares: La Punta-La Brava, Peine, Aguas de Quelana y Soncor.

**Figura 9-5 Esquema del modelo conceptual general – sección transversal**



Fuente: Elaboración propia

- Zona Marginal Norte

La Zona Marginal situada al Norte del Salar tiene una mayor amplitud (más de 30 km de ancho), por lo que los flujos subterráneos que provienen de la zona de recarga atraviesan, a lo largo de grandes distancias, formaciones salinas que producen la progresiva salinización de las aguas. Esto genera una zona de interfase muy amplia y principalmente difusa, que no permite la presencia del contraste de densidad necesario para que el fenómeno de la interfase salina genere flujos verticales que den lugar a sistemas lagunares importantes como los anteriormente mencionados, que suceden en el Sur y en el Este de la Zona Marginal. Esta interfase difusa permite la incorporación de la recarga de agua subterránea desde las subcuencas del Norte a través de la Zona Marginal hacia el Núcleo, a través de su salinización progresiva que las convierte finalmente en salmuera.

• Núcleo:

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

Constituido principalmente por rocas evaporíticas (halita) y salmuera, de topografía plana, constituye el depocentro de la cuenca y la zona de descarga central, tanto por evaporación en condiciones naturales como por los bombeos de explotación de salmuera ambientalmente aprobados, respectivamente, por 1.700 L/s de SQM y de 142 L/s de Rockwood.

En lo relativo a las recargas del Núcleo, debe indicarse que éstas provienen de: (a) la precipitación directa en el Núcleo, (b) las aguas que “desbordan” por encima de la interfase salina desde la Zona Marginal Este y Sur durante eventos de precipitación mayores, y(c) el flujo subterráneo proveniente del Norte y Oeste de la cuenca, desde las zonas de recarga, y que se incorporan al Núcleo directamente o a través de la Zona Marginal Norte donde se van salinizando hasta convertirse en salmuera.

En cuanto a la precipitación directa sobre el Núcleo, debe señalarse que los eventos mayores y de mayor duración, son los que generan infiltración en el Núcleo y constituyen una fuente de recarga importante en la cuenca debido a la gran extensión del Núcleo. En el caso de eventos de precipitaciones menores a 5 mm diarios, puede decirse que en general que las aguas se evaporan antes de infiltrar.

La evaporación en el Núcleo (entendido como zona de evaporación A13) tiene una magnitud importante (aprox. 1.117 L/s, referencia Tabla 6-7 del capítulo 6 de este Anexo), la cual se ha estimado en base a las mediciones realizadas por el Titular mediante el método del Domo, cuyos resultados se han contrastado y complementado con estudios anteriores (Mardones, 1986) (ver detalle en Apéndice J).

Cabe recordar que la superficie plana del Núcleo, así como la morfología rugosa de la costra de halita, están condicionadas por los fenómenos de evaporación y precipitación de halita que se producen desde la superficie freática del acuífero de salmuera, que en condiciones naturales se sitúa a menos de 1 metro de la superficie del terreno (Mardones ,1986).

### 9.1.2 Comportamiento hidrogeológico de las lagunas

En esta sección se describe el comportamiento hidrogeológico de las Lagunas Marginales situadas en el Salar de Atacama, desarrollado con más detalle en el Apéndice I Funcionamiento Hidrogeológico de los Sistemas Lagunares: Peine, La Punta–La Brava, Soncor y Aguas de Quelana, de este Anexo 1. Estas lagunas se agrupan en cuatro sistemas.

- Sistema lagunar Peine
- Sistema lagunar La Punta-La Brava
- Sistema lagunar Soncor
- Sistema lagunar Aguas de Quelana

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

Para fines de poder explicar el comportamiento hidrogeológico de las lagunas, se han considerado las siguientes fuentes de información disponibles que se resumen a continuación:

- 56 puntos de monitoreo de Rockwood de niveles, caudales, parámetros físico-químicos, perfiles de conductividad y análisis químicos e isotópicos.
- Información geológica de 9 piezómetros, 8 multipiezómetros y 25 piezómetros someros, perforados por Rockwood en el marco de este EIA (Apéndice C: Perforaciones, de este Anexo 1).
- Medición de superficie lagunar a partir de imágenes satelitales (de Rockwood y otros).
- Informes del Plan de Seguimiento Ambiental Hidrogeológico de SQM y del Plan de Alerta Temprana de Minera Escondida.
- Datos meteorológicos de la DGA.
- Publicaciones científicas y otros informes públicos disponibles.

Debe indicarse primeramente que las aguas que alimentan los sistemas lagunares descritos provienen de las precipitaciones ocurridas en la Cordillera de los Andes (hasta 6.000 msnm), las cuales recargan los acuíferos situados al Norte, Este y Sur del Salar, y que solamente en eventos de precipitaciones mayores, algunas lagunas reciben aportes por escorrentía superficial.

Los sistemas lagunares de interés se sitúan en la denominada Zona Marginal del Salar (Figura 1-3) entendida como una amplia zona relativamente plana en la que los fenómenos de evaporación de aguas subterráneas y superficiales son muy importantes, provocando una variada dinámica de procesos de disolución y precipitación de sales de distinta composición; sulfatos y carbonatos principalmente.

El modelo conceptual general desarrollado para los sistemas lagunares (Apéndice I), señala que las lagunas se alimentan del agua que alcanza la Zona Marginal procedente de las subcuencas aportantes, la cual se canaliza de manera preferente a través de “callejones” situados entre materiales geológicos de muy baja permeabilidad (rocas paleozoicas y mesozoicas). Si bien esta agua proviene de zonas más alejadas de núcleo, se caracteriza por ser un agua salobre, en atención a los procesos de disolución de sales que se produce en su recorrido hacia el borde del Salar.

Una vez que alcanza la parte topográficamente más baja de la cuenca, se encuentra con la salmuera del núcleo y de parte de la Zona Marginal. Debido a la diferencia de densidad y a la magnitud del flujo, el agua salobre se sitúa sobre la salmuera, generándose una interfase entre ambos fluidos que actúa a modo de separación hidráulica o desconexión hidráulica de flujos.

El agua salobre, que proviene de las zonas de recarga, se ve forzada a ascender, debido a la generación de la interfase salina, hasta que alcanza la superficie del terreno, y sale del sistema debido a los efectos de la evaporación, pudiendo distinguirse don situaciones: (1) La evaporación directa desde el terreno impide que el agua aflore ya que la evaporación es mayor que el caudal de descarga, caso en el cual no se forman lagunas, sino extensas áreas de evaporación con el nivel freático muy próximo a superficie. En

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

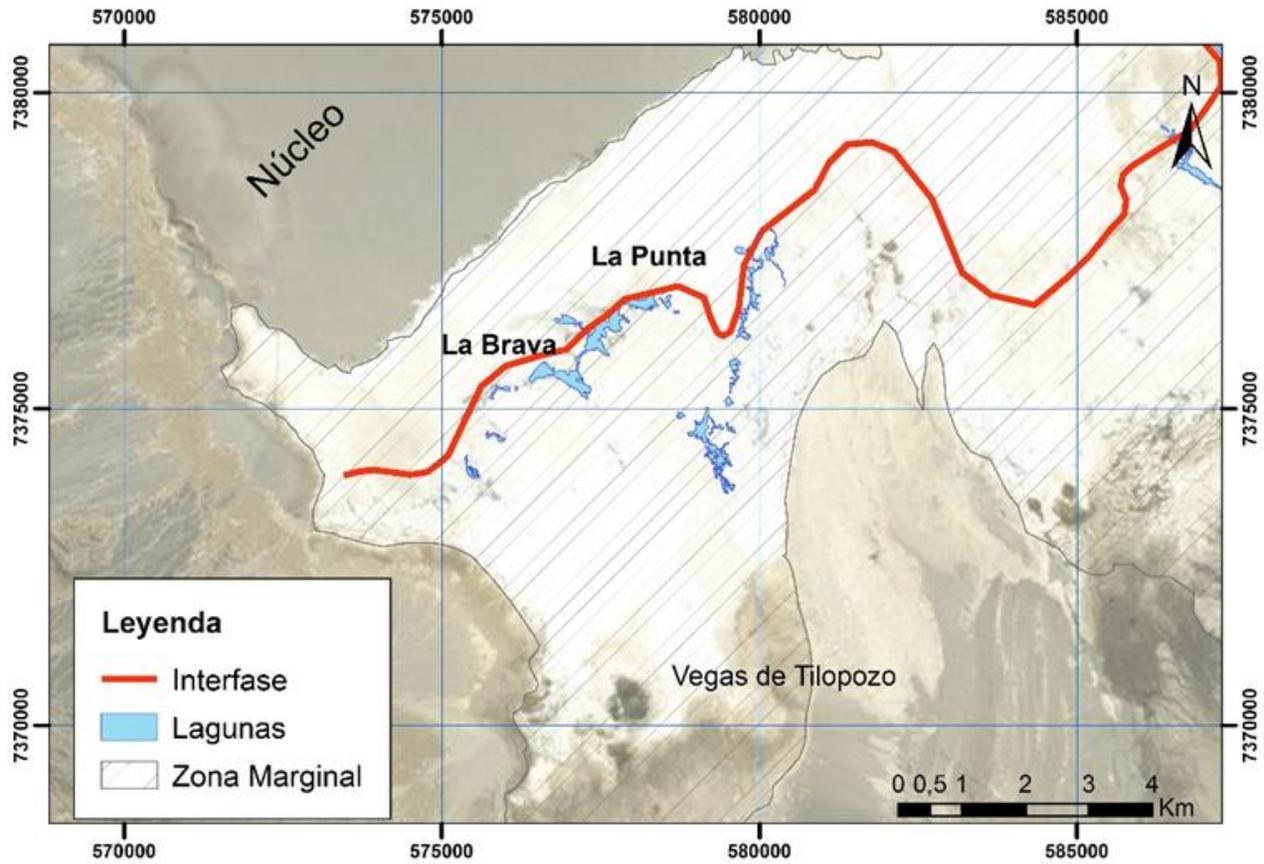
estas zonas además es donde se produce la dinámica de procesos de disolución-precipitación que generan las diferentes costras de rocas evaporíticas (carbonatos, sulfatos y cloruros); y (2) La evaporación directa desde el terreno es insuficiente para evacuar a la atmósfera toda el agua que aflora, por lo que se forman sistemas lagunares, que a su vez tendrán dos tipologías claramente diferentes:

- a. Sistemas tipo Peine: donde la fuente de alimentación de las lagunas es a través de un canal alimentado en su parte alta por las aguas del acuífero salobre.
- b. Sistema tipo La Punta-La Brava: alimentadas directamente desde el acuífero en la propia laguna o en sus bordes. A este tipo corresponden también las lagunas del Sistema Aguas de Quelana. Su morfología es también alargada y se alinean en dirección paralela a la posición de la interfase en superficie.

#### 9.1.2.1 Sistema La Punta-La Brava

Este sistema está formado por las lagunas La Punta y La Brava, según se muestra en la Figura 9-6. Debido al flujo subterráneo de agua dulce procedente del Sur (acuíferos de Monturaqui y Negrillar), se genera una interfase salina que se dispone de forma perpendicular al flujo, por lo que el agua se ve forzada a ascender aflorando en superficie, dando origen a las lagunas. Estas lagunas se localizan paralelamente a dicha interfase.

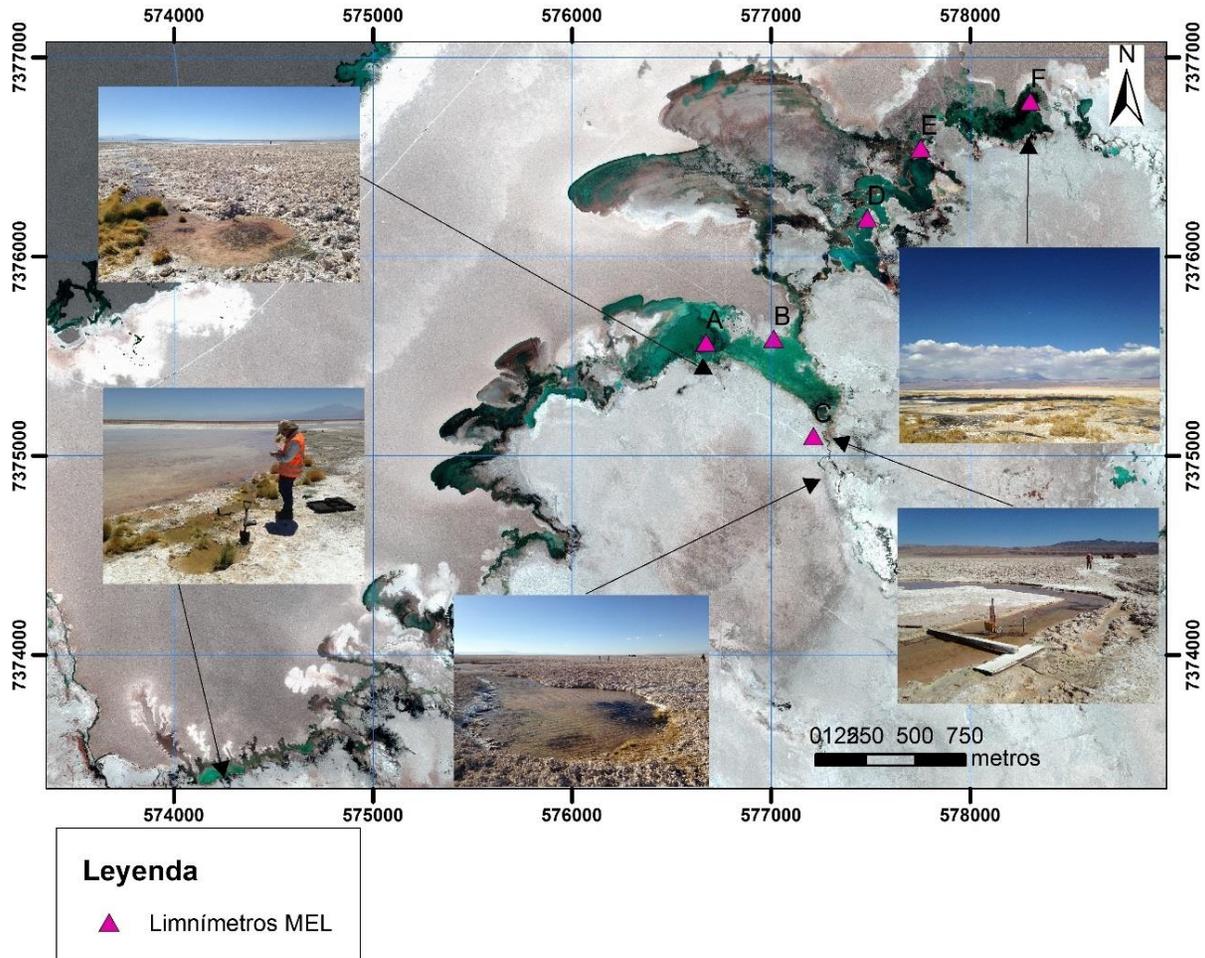
**Figura 9-6 Sistema La Punta-La Brava**



Fuente: Elaboración propia

La conexión hidráulica entre las lagunas y el acuífero de agua salobre existe en aquellas zonas donde el agua surge de forma preferente alimentando las lagunas (Figura 9-7). En el resto del área de la laguna el agua se acumula y se evapora.

**Figura 9-7 Puntos de afloramiento de agua subterránea en las lagunas de La Punta- La Brava**



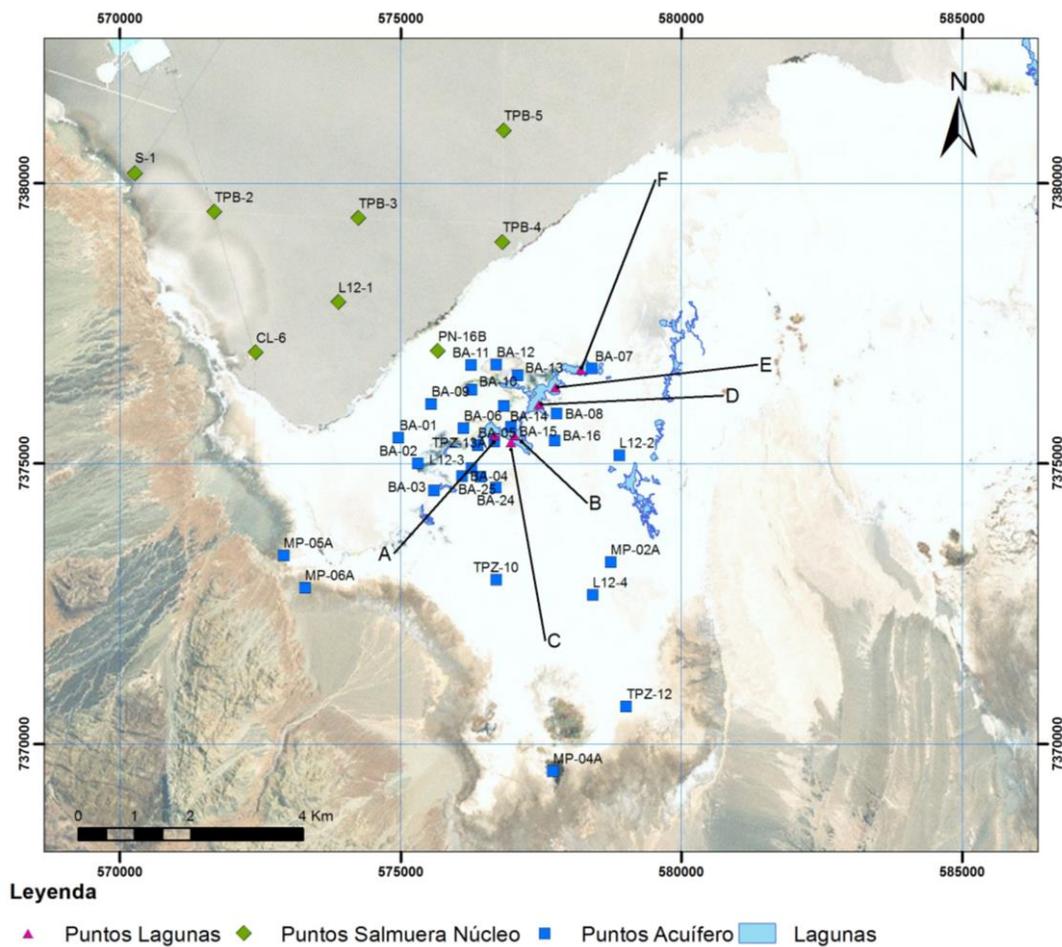
Fuente: Elaboración propia

Ocasionalmente se produce un mayor caudal de entrada a las lagunas, después de períodos húmedos y/o coincidiendo con la época invernal, lo que genera flujos sub-superficiales hacia el núcleo que alcanzan el límite de la costra de cloruros formando los llamados “open pools”, en donde se produce evaporación y disolución de la costra, enriqueciendo las aguas en sales disueltas, que se convierten finalmente en salmuera (Figura 9-10).

De acuerdo con el análisis que se realiza en el Apéndice I, puede advertirse que los pozos ubicados en la salmuera del Núcleo, más próximos al sector de las Lagunas La Punta y La Brava, muestran un descenso continuado en la serie de años monitoreados, sin perjuicio de observarse algunos ascensos bruscos coincidentes con las precipitaciones registradas en la estación de Peine en los años 2001, 2002, 2012 y 2013. Con posterioridad a tales eventos, los niveles continúan su tendencia al descenso con una pendiente cada vez menor.

En el caso de los pozos situados en la zona marginal y acuífera al Sur de las lagunas la, (pozos TPZ-13, TPZ-10, TPZ-12 de MEL), el nivel de la napa tiene el mismo comportamiento, sin tendencia general al ascenso o descenso, pero una marcada oscilación estacional, con ascensos en verano y descensos en invierno (con diferencias entre 6 y 8 cm), debido a la variación de la tasa de evaporación. El mismo comportamiento presentan los pozos L12-2, L12-3 y L12-4, ubicados también al Sur de las lagunas, pero más cercanos a éstas. En la Figura 9-8 se representa la situación de estos pozos en el entorno de las lagunas de La Punta–La Brava.

**Figura 9-8 Puntos de control de nivel en el sistema de La Punta – La Brava**

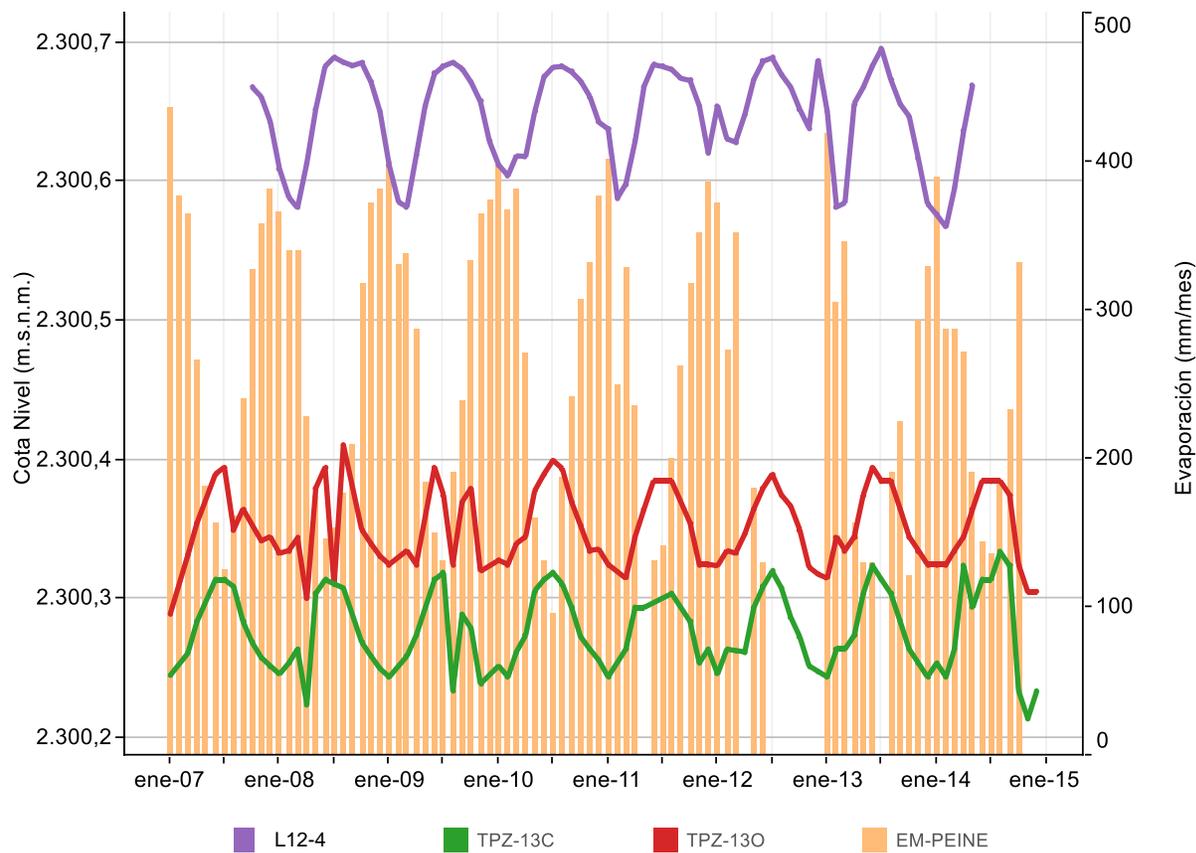


Fuente: Elaboración propia

Si se considera el análisis de la evaporación, dentro del marco conceptual, de los datos analizados en pozos cercanos a las lagunas por el lado Sur (Figura 9-9, pozos L12-4 y TPZ-13), se constata que la variación de la tasa de evaporación es inversa a la variación estacional de los niveles, lo que pone de manifiesto la relación causa efecto existente entre ambas variables. Conforme a ello puede concluirse, que

el único factor con carácter estacional que puede explicar estas variaciones de nivel “oscilatorias”, es la evaporación. Por otro lado que los niveles del acuífero se mantengan siempre oscilando entre las mismas cotas y con tendencia a la estabilidad en el tiempo, está asociada a una recarga subterránea importante.

**Figura 9-9 Evolución de niveles en pozos del acuífero y evaporación registrada en la estación de Peine.**



Fuente: Elaboración propia

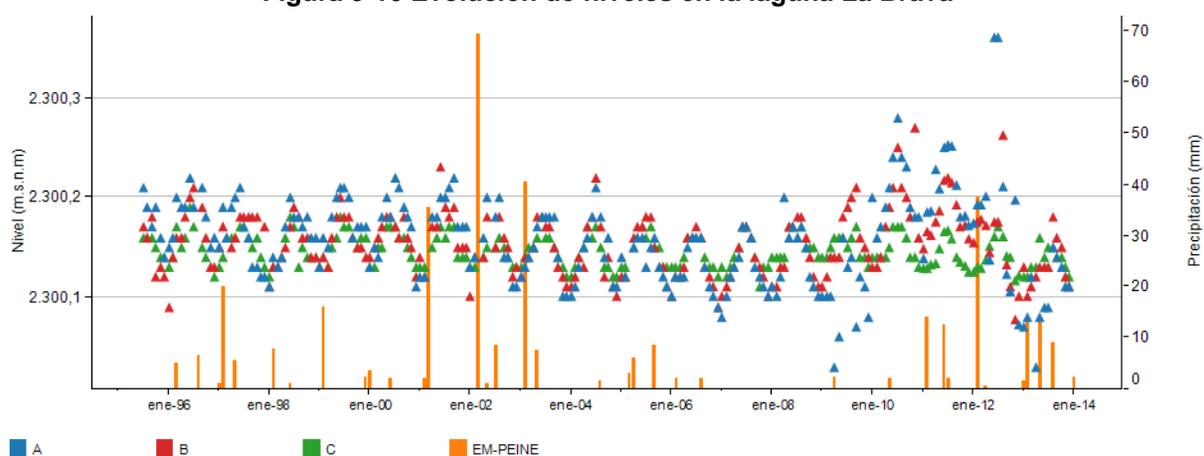
Los piezómetros someros (BA) perforados por Rockwood en las proximidades de las Lagunas del Sistema La Punta-La Brava, durante el período comprendido entre junio de 2013 y octubre de 2014, muestran la misma oscilación observada en los pozos de MEL y SQM, y una oscilación estacional de niveles, la cual sin embargo, no está relacionada con los eventos de precipitación registrados en la EM-Peine.

Adicionalmente, los niveles de los piezómetros también perforados por Rockwood, MP-01A, MP-02A, MP-03A, MP-04A, MP-05A y MP-06A, y monitoreados mensualmente desde octubre de 2013, indican que durante el período analizado los niveles en estos puntos tienen un comportamiento relativamente estable, existiendo una ligera oscilación estacional relacionada con la evaporación que se observa mejor en los puntos MP-01A, MP-02A y MP-03A, situados más cerca de las lagunas. Además, al observar los valores de las cotas en estos puntos se puede deducir que la dirección del flujo es desde el MP-04A, situado en

las Vegas de Tilopozo, siguiendo por el MP-02A a MP-03A, y finalizando en el MP-01A, que se sitúa en la orilla de la Laguna La Punta, es decir, flujos de Sur a Norte.

Si se consideran los puntos de medición en las propias lagunas (ver Figura 9-10), se puede observar, por ejemplo, que en la laguna La Brava los niveles registrados en las tres reglillas A, B y C (MEL, 2015) presentan el mismo comportamiento, con oscilaciones estacionales similares a las observadas en los pozos ubicados en el acuífero de agua salobre. Lo anterior indica una relación directa entre los flujos subterráneos bajo las lagunas los cuales estarían aportando hacia las Lagunas.

**Figura 9-10 Evolución de niveles en la laguna La Brava**



Fuente: Elaboración propia

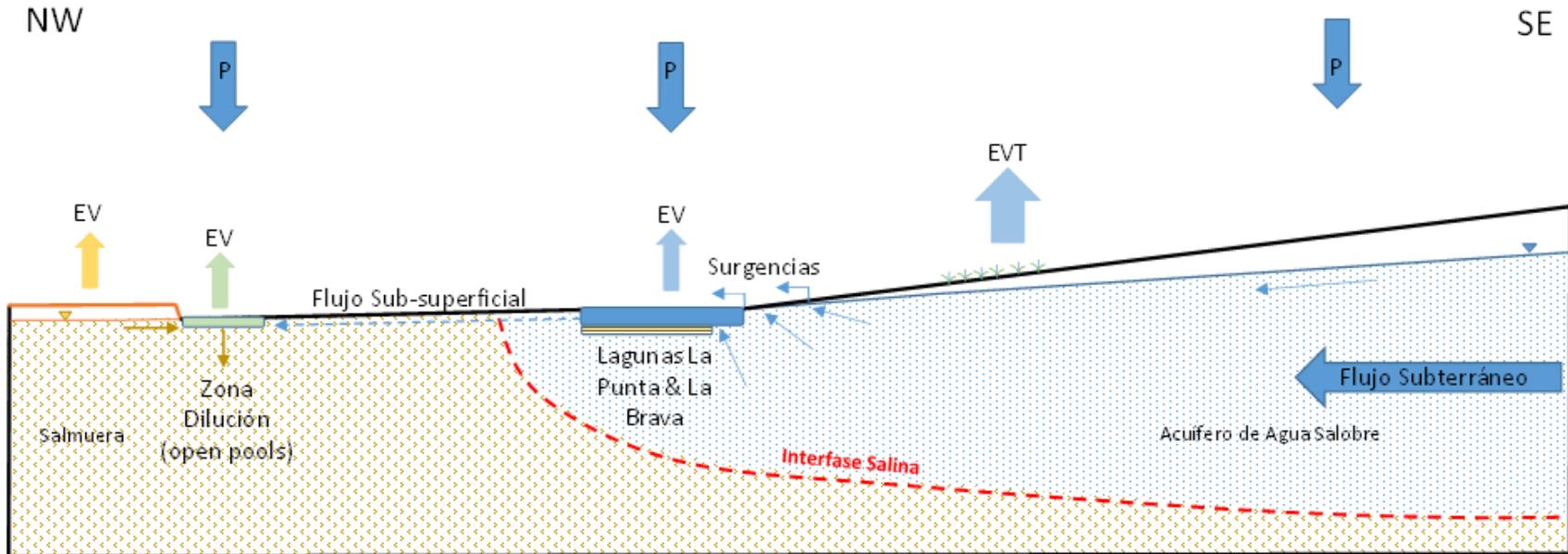
El modelo conceptual planteado para el Sistema La Punta-La Brava, se valida con los resultados de la composición química de las aguas, que demuestran que se trata de aguas de tipo clorurada y/o sulfatada sódica (ver Figura 5-22 y Figura 5-23 del Apéndice I). En efecto, tanto las aguas analizadas en los puntos del acuífero al lado Sur de las lagunas: TPZ-6S, MP-01A, MP-01B, MP-02A, MP-02B, MP-03A, MP-03B, MP-04A, MP-04B, MP-05A, MP-06B, como la de las Lagunas la Brava, Laguna La Brava Punto C y Laguna la Punta, son, tienen la misma composición. Estos resultados demuestran que los contenidos de cloruro y sodio aumentan hacia el borde del Salar, como también en profundidad.

Del análisis integrado de la dinámica de las lagunas La Punta y La Brava (Detalles en Apéndice I, punto 5.6), se concluye que en el acuífero de agua salobre existen variaciones estacionales que estarían relacionadas con la evaporación. Ello, a diferencia de los niveles al norte de las lagunas o en la salmuera, en donde se observa una marcada tendencia al descenso salvo por los eventos de precipitación que hacen que los niveles aumenten. Lo anterior refuerza el hecho de existir una desconexión hidráulica provocada por la cuña salina, generada por la diferencia de densidades entre la salmuera y el agua salobre.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

En la Figura 9-11 se presenta el modelo conceptual del funcionamiento hidrogeológico para el sistema La Punta La Brava.

**Figura 9-11 Modelo conceptual Sistema La Punta-La Brava**

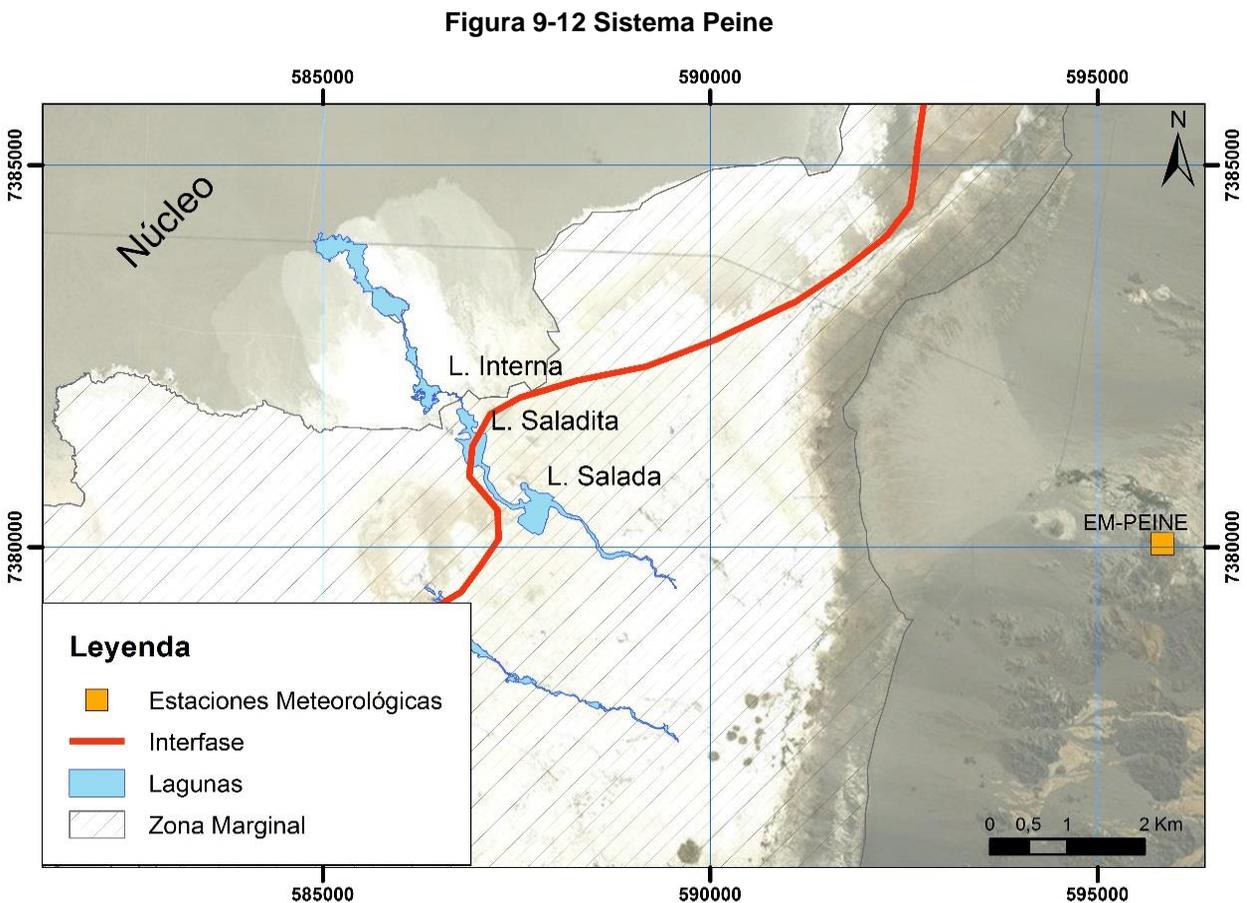


Fuente: Elaboración propia

### 9.1.2.2 Sistema lagunar Peine

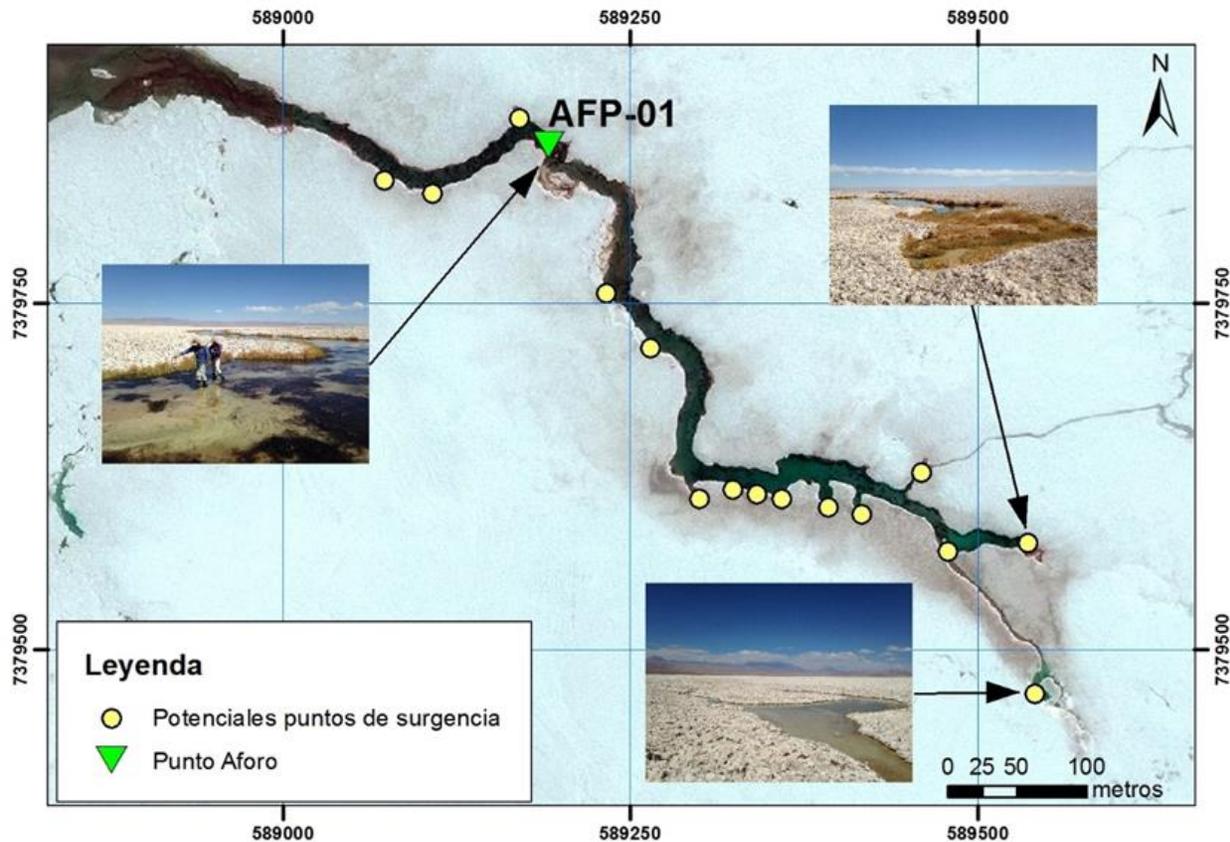
Este sistema está formado por las lagunas Salada, Saladita e Interna, dispuestas de forma perpendicular a la interfase salina y comunicadas por canales que fluyen hacia el núcleo del Salar (Figura 9-12).

Las lagunas de este sistema son alimentadas por surgencias de agua subterránea que forman un canal natural situado unos 2 km aguas arriba al Sur de la laguna Salada (Figura 9-13). Luego, el agua fluye hacia el Noroeste alimentando primero la Laguna Salada, posteriormente la Laguna Saladita y finalmente la Laguna Interna. A medida que el agua fluye hacia el Núcleo va aumentando su salinidad, debido a procesos de evaporación.



Fuente: Elaboración propia

**Figura 9-13 Nacimiento Sistema Peine**



Fuente: Elaboración propia

En la laguna Interna, el agua se adentra en el Núcleo de salmuera de manera superficial, la que al encontrarse con la costra de cloruros va disolviéndola y va enriqueciéndose en sales disueltas, hasta que finalmente, convertida en salmuera, parte de su caudal superficial inicial se incorpora en el Núcleo.

En la Figura 9-14 se presenta el modelo conceptual del funcionamiento hidrogeológico para el sistema Peine.

Del análisis de detalle que se contiene en el Apéndice I de este Anexo, puede establecerse que:

- Los niveles de salmuera, considerando tanto la información de Rockwood, como la información de SQM que analizan la evolución del nivel freático medido en los pozos de salmuera (1028, L10-12, GD-04, L10-3, L10-5, L10-14, L10-16), en todos los pozos muestran una tendencia al descenso. Sin embargo, el nivel final es similar o superior al inicial debido a que los últimos años, 2012 y 2013, han sido años con mayor precipitación. También se observan ascensos, que se explican debido a la precipitación directa sobre el núcleo, pero también por el hecho de que el agua de escorrentía que se genera en las

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

cuencas aportantes alcanza directamente el núcleo, a través de los canales naturales que se forman (ver Figuras 6-5 y Figuras 6-6 del Apéndice I).

- Los niveles en el acuífero, conforme muestran las mediciones de los pozos más alejados (CUÑA 6 y L10-1), presentan una clara variabilidad estacional, con una oscilación media de unos 12 cm, con los máximos en invierno y los mínimos en verano. Este comportamiento se asocia a la influencia de la evaporación. En el L-10-1 también se advierte esta oscilación estacional, si bien el abrupto descenso y posterior subida de niveles que se observa podría estar explicado por alguna anomalía en el pozo, más que por el comportamiento del acuífero. Sin embargo, y a diferencia con los pozos de la salmuera, la tendencia general es al ascenso de niveles, y no se observa que los niveles respondan a los eventos de precipitación.
- La información obtenida de los piezómetros someros de Rockwood (BA-21, BA-22 y MPS-AA, 2013-2014), muestra cierta oscilación estacional en el BA-22 y MPS-AA, la cual, sin embargo, no se observa en el BA-21. En cuanto a la precipitación no se observa relación con la evolución de niveles.
- En cuanto a los niveles medidos en las propias lagunas de Peine (Salada, Saladita e Interna), se observa que el nivel de las lagunas Salada y Saladita se ha mantenido relativamente estable en el periodo de tiempo que abarca desde el año 1998 hasta diciembre de 2013, ubicándose el nivel en la Laguna Salada en una cota superior, y la Laguna Saladita en una inferior, confirmándose la dirección de flujo de agua desde la primera a la segunda a través del canal que las comunica. En el período de tiempo señalado no se observa relación alguna entre el nivel medido en las lagunas y las precipitaciones registradas en la EM-Peine. Sin embargo, en la Laguna Interna se observa una tendencia al descenso desde 2004 hasta 2010, que posteriormente se estabiliza en los últimos 3 años de medidas, coincidiendo con el período de lluvias de 2012-2013. Esta laguna se sitúa sobre el núcleo de salmuera, estando definida la interfase salina subterránea entre esta laguna y la Laguna Saladita.
- El comportamiento de los niveles en las lagunas del Sistema es similar al de los puntos situados en el acuífero salobre, existiendo una oscilación estacional provocada por la evaporación. En este sentido debe decirse que el nivel medido en la salmuera muestra una tendencia al descenso, mientras que en las lagunas está prácticamente estabilizado. Esto indica que existe desconexión entre el acuífero salobre y la salmuera, por lo que se infiere que el nivel de las lagunas está condicionado por la recarga subterránea que se produce desde las cuencas aportantes, y estacionalmente influenciado por la evaporación y no por la evolución de niveles que se observa en el Núcleo.
- Los registros de aforos de caudales que fluyen hacia las lagunas Salada, Saladita e Interna, a través de sus canales naturales de alimentación, según datos tanto de SQM como de Rockwood, muestran que los registros de los caudales de entrada a la laguna Salada son mayores a los registrados en la Laguna Saladita (Figura 6-13 del Apéndice I). Este fenómeno se explica por las pérdidas ocurridas principalmente por evaporación, tanto en la superficie de la laguna Salada como a lo largo del canal

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

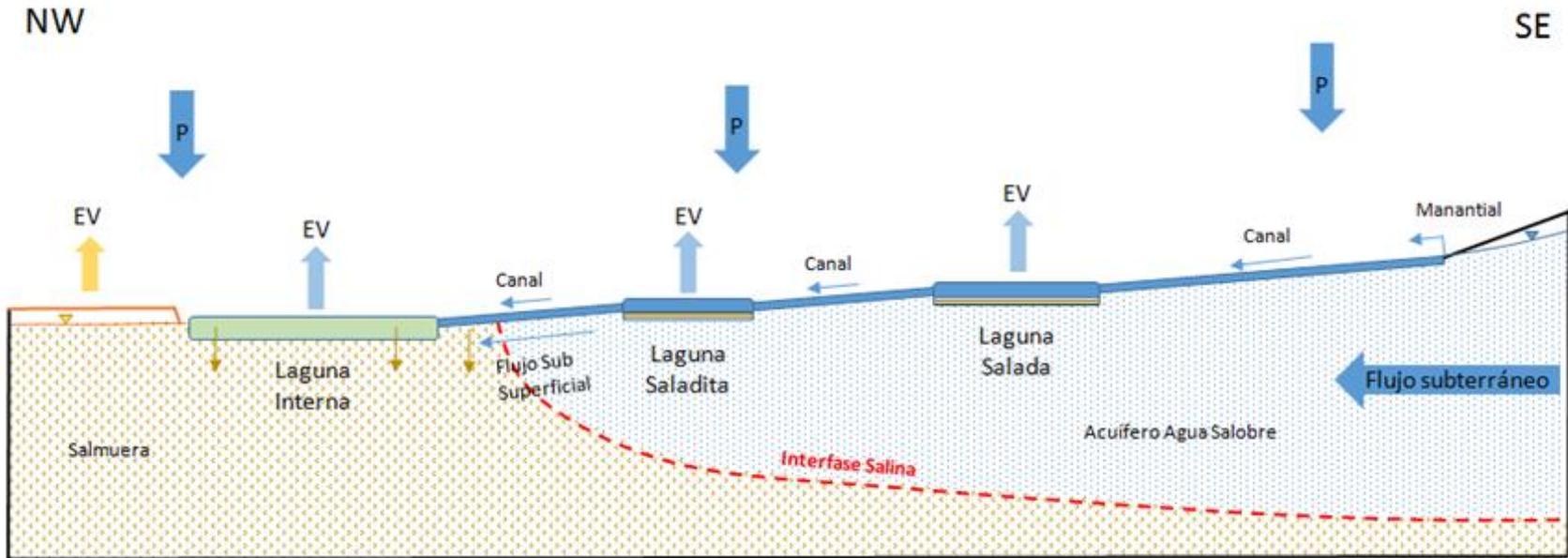
natural de entrada a la misma. La disminución de caudal hacia aguas abajo que se observa, concuerda con el modelo conceptual, que explica cómo el flujo principal que alimenta las lagunas se genera en la cabecera del arroyo situado al Sur de la Laguna Salada. Esta disminución de caudal se produciría principalmente por evaporación desde la superficie en lámina libre de lagunas y canales.

- El análisis de la superficie lagunar en Sistema Peine muestra que, en general, la superficie lagunar es mayor en temporada de invierno que en temporada de verano (ver Figura 6-14 del Apéndice I).
- Los análisis de Hidroquímica realizados a las muestras provenientes de la Laguna Salada, Laguna Saladita, Laguna Interna, que conforman el Sistema Peine, que consideran los resultados de las concentraciones químicas relativas de los aniones y cationes mayoritarios de las campañas realizadas en los meses estivales e invernales entre marzo 2013 y septiembre 2014 (piezómetros MPS-AA (somero), MPS-AB (profundo) y MPS-CB (profundo); además de las vertientes tomadas en el sector de Tilomonte y en Peine, , muestran, en primer lugar, que todas estas aguas (lagunas y acuífero) son de tipo clorurada y/o sulfatada sódica, a excepción de la vertiente Peine que tiende a ser sulfatada y/o clorurada cálcico y/o magnésica. En el diagrama de Piper de la Figura 6-22 presentado en el Apéndice I, se observa que las aguas de las vertientes son cloruradas sódicas más enriquecidas en sulfatos y calcio que las aguas extraídas de las lagunas y piezómetros, que se enriquecen en cloruros y sodio a medida que se ubican más cerca del núcleo del Salar.
- La caracterización isotópica y química del Sistema Peine, indica que en dirección Sur -Norte del Sistema Peine, existe un incremento en el contenido de cloruros y a su vez un enriquecimiento del contenido isotópico. El aumento de salinidad se atribuye a la elevada tasa de evaporación en la región y además a procesos de disolución y precipitación de minerales (clorurados y sulfatados) y a mezcla con salmueras del núcleo del Salar, cerca de la zona de interfase salina.

En resumen, todas las variables mencionadas y analizadas, indican para el Sistema Peine un comportamiento distinto respecto de 3 zonas: (1) En el Núcleo, hay una tendencia al descenso de los niveles de la salmuera, con aumentos bruscos bajo ciertos eventos de precipitaciones; (2) En la Zona Marginal, hay una marcada tendencia a la variación estacional de los niveles subterráneos con una directa relación con el efecto de la alta evaporación de la zona y en particular en las reglillas de las lagunas, una estabilidad de sus niveles principalmente para las lagunas Salada e Interna; y (3) En la zona del acuífero, hay una tendencia al aumento de los niveles de la napa.

Adicionalmente se da cuenta de la existencia de flujos subterráneos, que alimentarían las lagunas Salada y Saladita, en dirección Sur y Sureste hacia el Norte. En cuanto a la Laguna Interna, ésta sería alimentada por flujos superficiales y subsuperficiales en la misma dirección, los cuales se adentran en el núcleo de salmuera de manera superficial, disolviendo la costra de cloruros y enriqueciéndose paulatinamente en sales disueltas, se incorporan al Núcleo convertidos en salmuera.

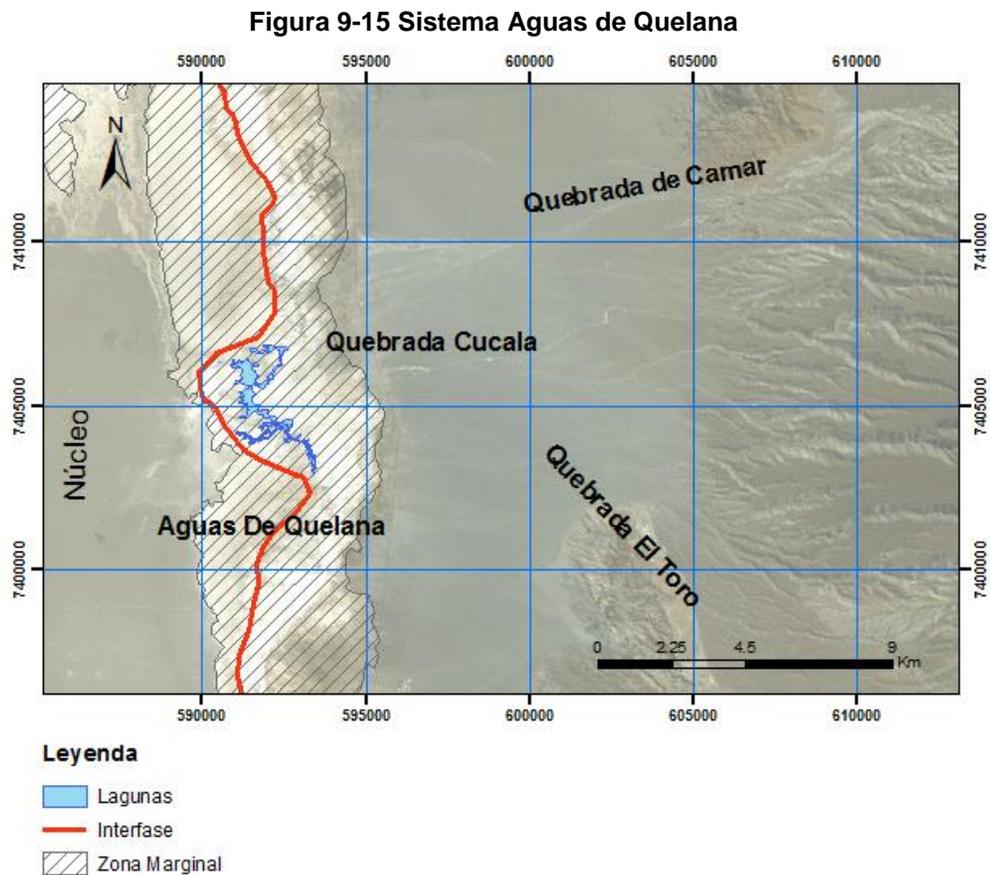
**Figura 9-14 Modelo conceptual Sistema Peine**



Fuente: Elaboración propia

### 9.1.2.3 Sistema Aguas de Quelana

Las lagunas de este sistema son alimentadas por aguas subterráneas de los acuíferos aluviales del borde Este, que a su vez son alimentados por las quebradas de Camar, Cucala y El Toro.



Fuente: Elaboración propia

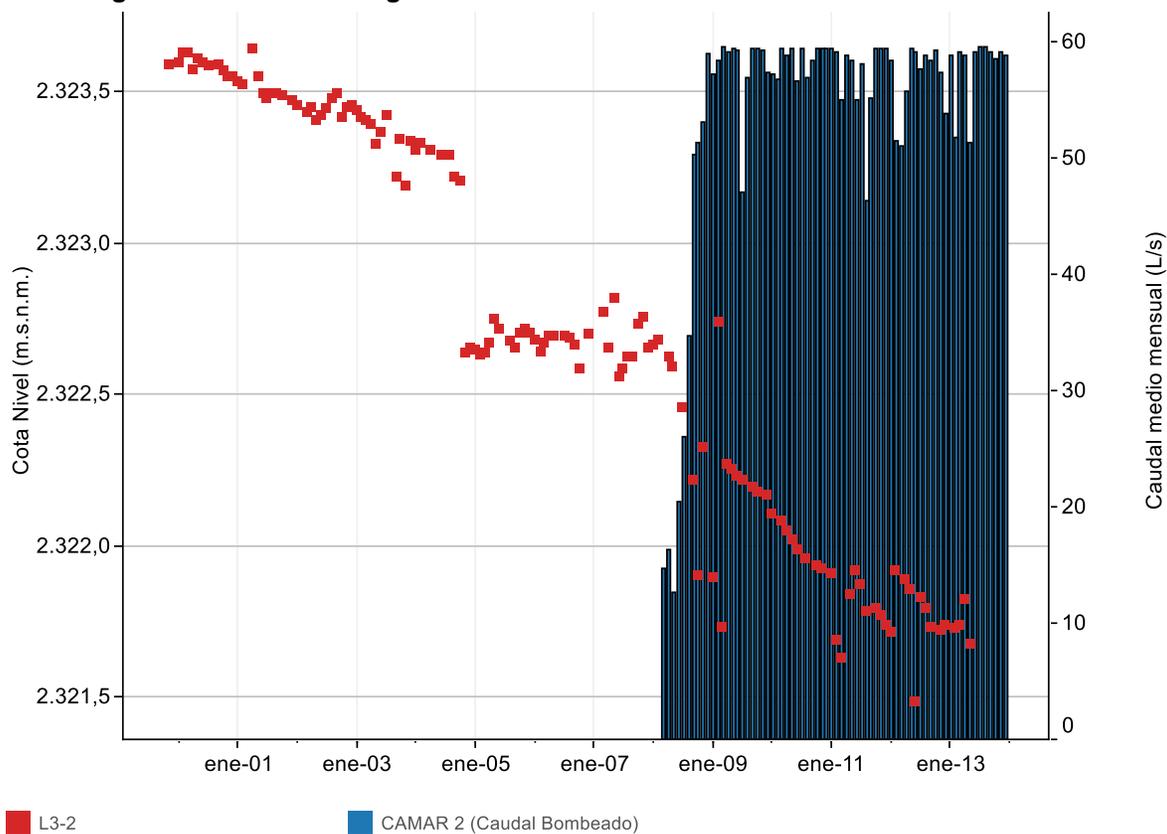
En el área donde se sitúan las lagunas, debido a la magnitud del flujo subterráneo procedente del Este, el agua salobre se ve forzada a ascender al encontrarse con la salmuera del Núcleo (interfase salina), aflorando en superficie y dando origen a las Lagunas del Sistema Aguas de Quelana, que se disponen de forma paralela a posición de esta interfase. Este comportamiento es similar al del sistema La Punta y La Brava.

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. No se observa la presencia de canales de gran longitud 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.

Los aspectos más destacados sobre el comportamiento hidrogeológico, que se analiza con detalle en el Apéndice I de este Anexo, son los siguientes:

- La evolución de los niveles en la salmuera no muestra una tendencia única, como sucede en los sistemas de Peine y de La Punta-La Brava, sino que es similar a lo que se observa en el sistema Soncor. Los pozos ubicados más próximos al núcleo del Salar (Figura 7-4 del Apéndice I), es decir hacia el Sur y el Oeste de las lagunas, presentan una clara tendencia de descenso, con ascensos asociados a eventos de precipitación.
- Los pozos situados en la Zona Marginal (Figura 7-5 del Apéndice I) se mantienen estables y muestran oscilaciones estacionales que se producen con igual intensidad en todos los años, con máximos de nivel en invierno y mínimos en verano, lo que muestra, por lo tanto, una clara influencia por la evaporación.
- En algunos de los pozos ubicados en los depósitos aluviales del Este del sistema, se observa también una influencia muy marcada de los bombeos de los pozos de agua industrial CAMAR 2 y SOCAIRE 5 de SQM. Un ejemplo de este fenómeno se muestra en el gráfico de la Figura 9-16.

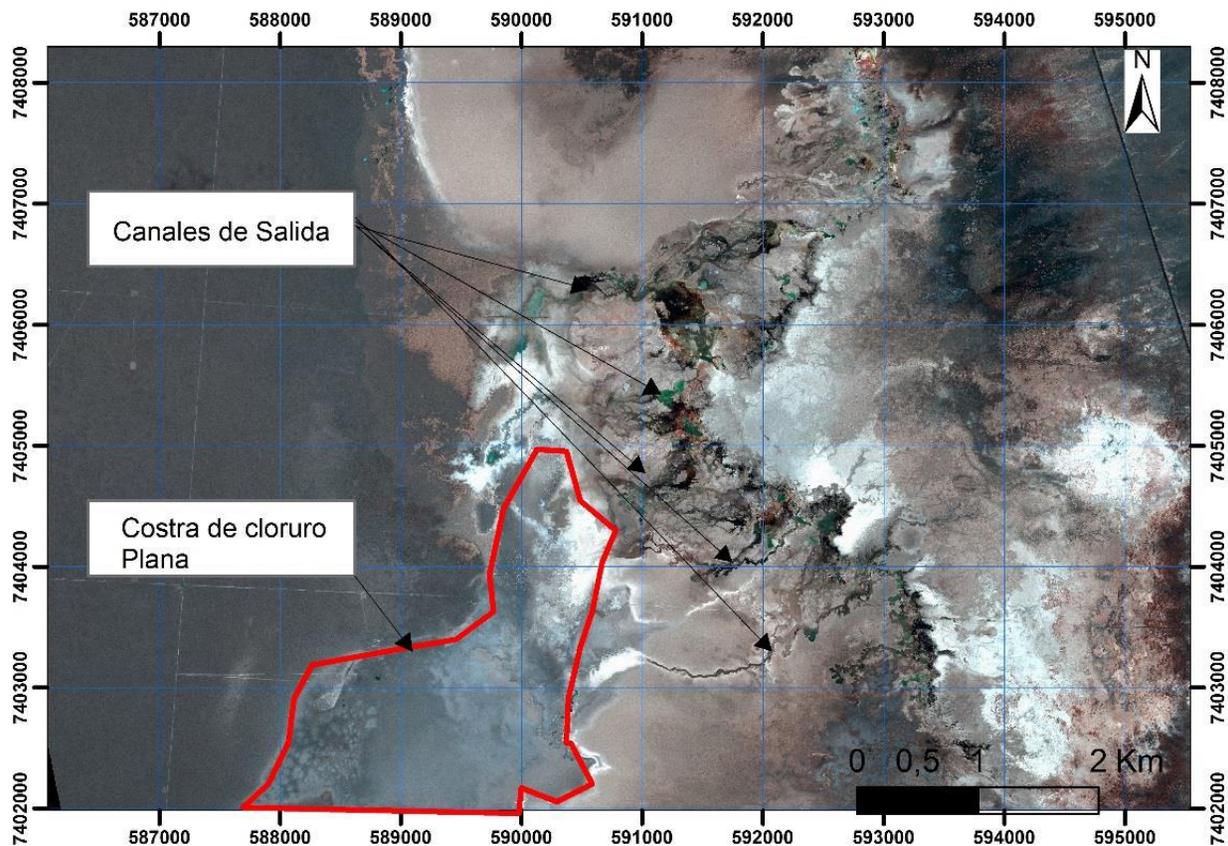
**Figura 9-16 Caudal de agua dulce bombeado en CAMAR 2 frente a nivel en L3-2**



Fuente: Elaboración propia con datos de terceros

- En las reglillas situadas en las lagunas, el nivel de agua superficial se ha mantenido constante con un comportamiento estacional similar al de las lagunas del sistema La Punta-La Brava. La oscilación de los niveles va, de valores del orden de 5 cm a otras con mayor oscilación del orden de 20 cm. Se observa que los máximos niveles (Figura 7-7 del Apéndice I) se producen en invierno y los mínimos en verano, lo que sugiere que están controlados por la evaporación.
- Del análisis de la evolución de la superficie de las lagunas se concluye que este sistema se aprecia una fuerte estacionalidad con superficies en invierno significativamente mayores a las registradas en verano.
- Ocasionalmente, después de períodos de elevada precipitación o bien durante la época invernal debido a que la evaporación es menor, se produce un mayor caudal de agua de entrada a las lagunas lo que aumenta la superficie de las mismas y en determinadas ocasiones produce desbordamientos superficiales hacia el núcleo (Figura 9-17).

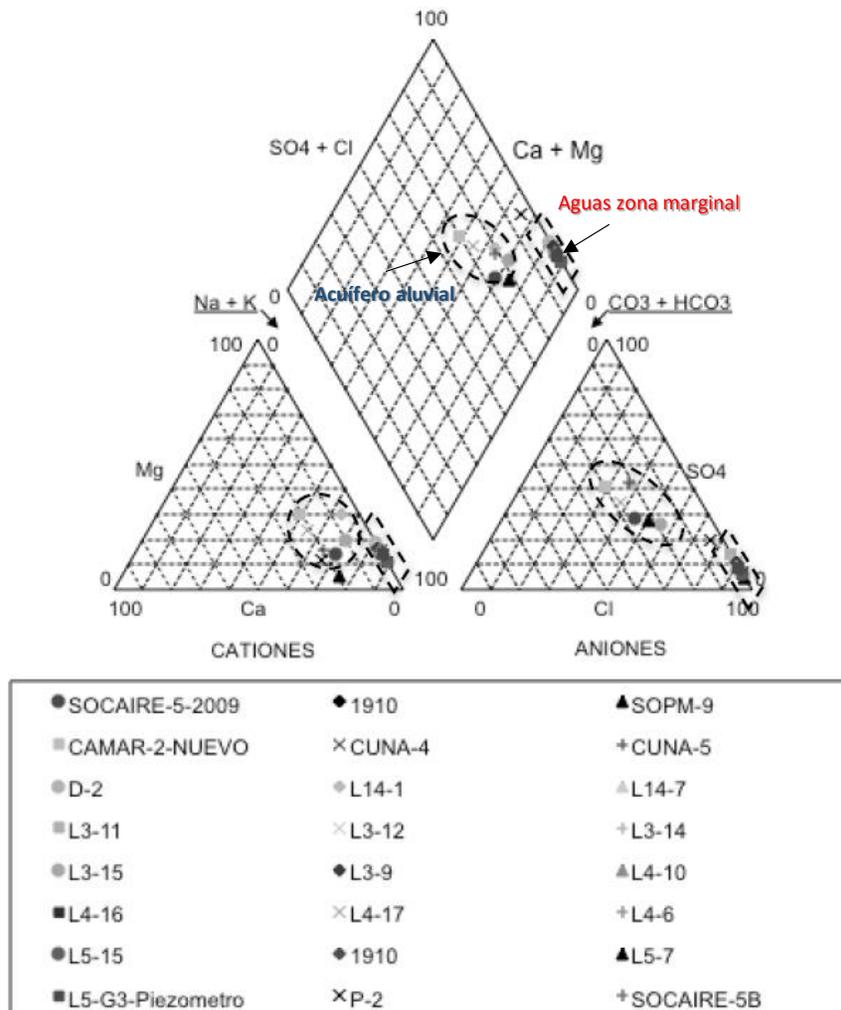
**Figura 9-17 Puntos de salida en el Sistema Aguas de Quelana**



Fuente: Elaboración propia

- Las aguas superficiales presentan una composición clorurada sódica, muy concentrada en cloruro y sodio-potasio. Las aguas de la quebrada de Camar también se clasifican como cloruradas sódicas pero con una mayor proporción de otros iones. Se interpreta que gran parte del enriquecimiento se debe a la disolución de los sedimentos evaporíticos, como sucede en el sistema La Punta-La Brava. Esto se observa en la Figura 9-18, en la que se han representado los resultados del análisis de las muestras obtenidas por Fock (2009), en este diagrama se observan claramente diferenciadas las muestras tomadas del acuífero aluvial, las que se han incluidas en una elipse, con respecto a las tomadas de puntos de la zona marginal, encerradas en un rombo.

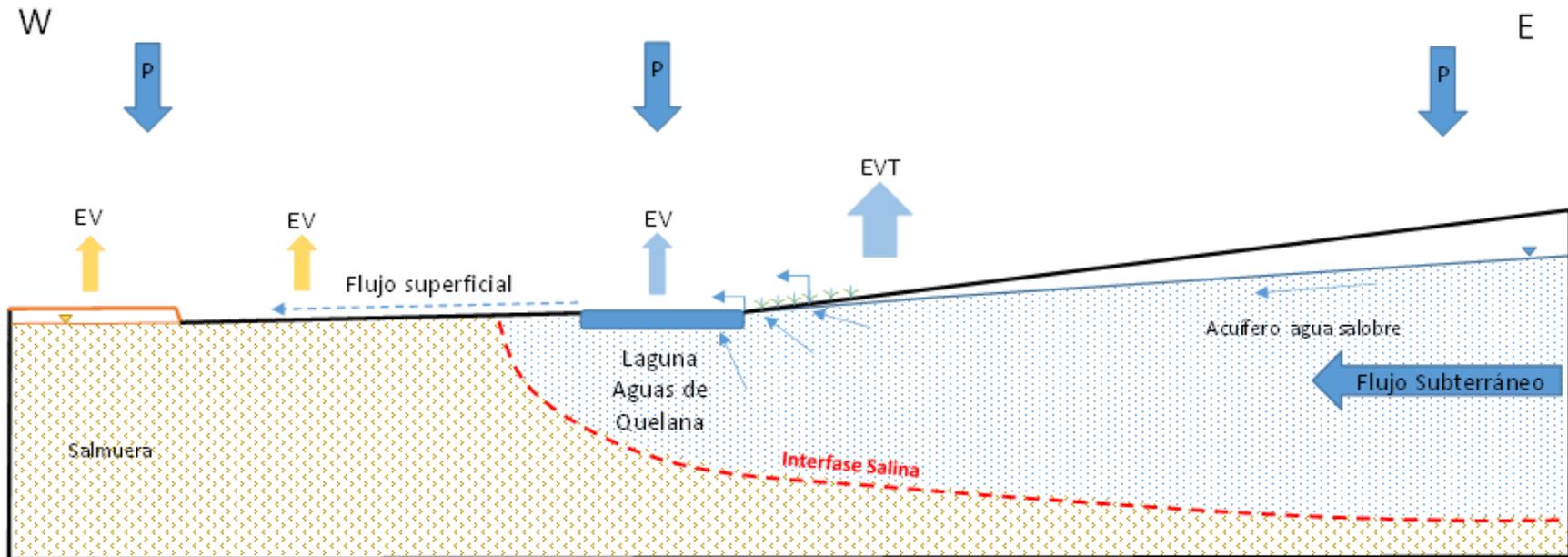
**Figura 9-18 Diagrama Piper del Sistema Aguas de Quelana 2009**



Fuente: Fock 2009

En la Figura 9-19 se presenta el modelo conceptual del funcionamiento hidrogeológico para el Sistema Aguas de Quelana.

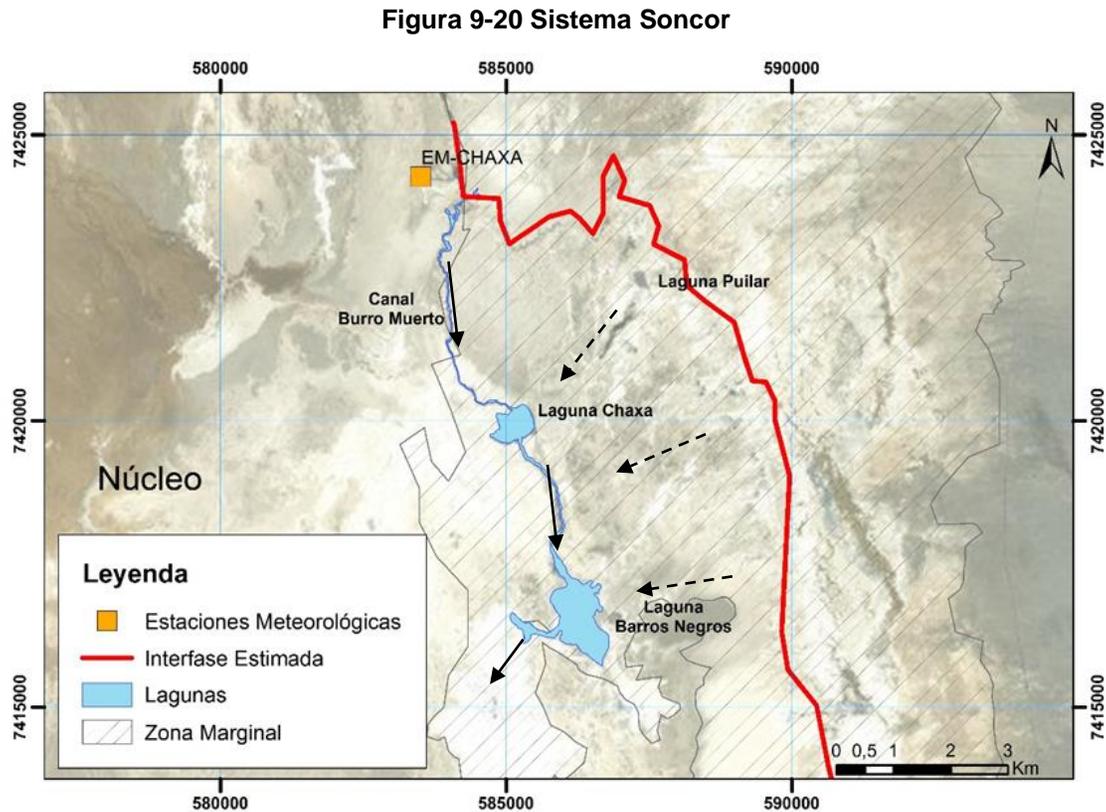
**Figura 9-19 Modelo conceptual Sistema Aguas de Quelana**



Fuente: Elaboración propia

#### 9.1.2.4 Sistema Soncor

El Sistema Soncor se compone de las lagunas Puillar, Chaxa y Barros Negros. Las lagunas de este sistema son alimentadas por agua subterránea que ingresa al sistema a través de cauces superficiales, proveniente de los acuíferos situados al Norte y Este de las lagunas.



Fuente: Elaboración propia

Al Este de las lagunas, en la zona donde la interfase salina intercepta con el terreno se producen desbordamientos de las aguas que fluyen hacia el Oeste de manera superficial y subsuperficial.

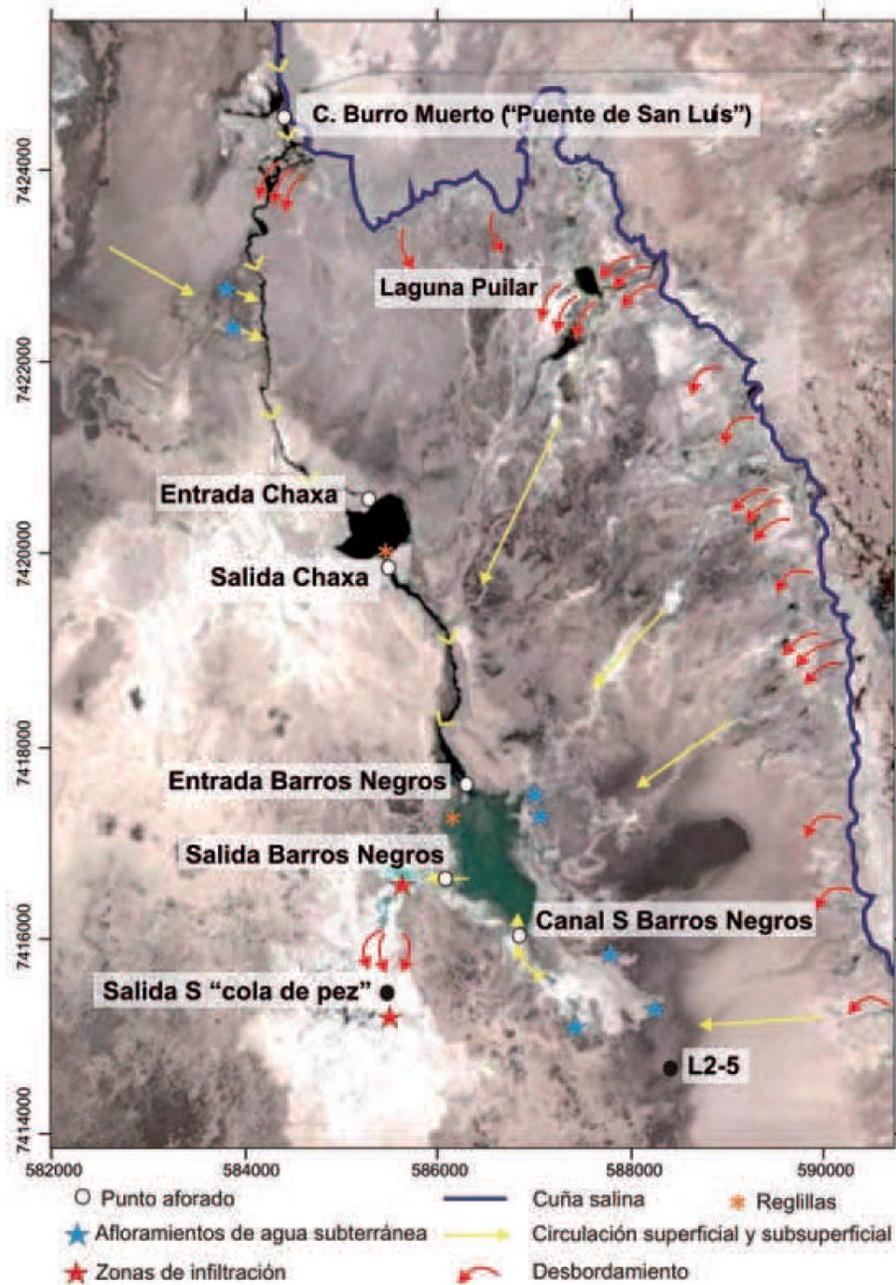
La mayor parte de estos flujos se concentran en el canal de Burro Muerto, que desemboca en la Laguna Chaxa, mientras otros desbordamientos se dirigen por el canal que une la Laguna Chaxa con la Laguna Barros Negros y la propia Laguna de Barros Negros.

Una vez que tales flujos alcanzan los canales mencionados, las aguas fluyen en dirección Sur y comienzan a experimentar un 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” en tanto que una

parte de ellas termina infiltrándose en el Núcleo. Esta infiltración generalmente tiene un carácter estacional, siendo mayor en invierno, debido a que la evaporación es menor, e inexistente en verano.

El esquema del funcionamiento del sistema Soncor, propuesto por Salas et al. 2010, se muestra en la Figura 9-21.

**Figura 9-21 Esquema de funcionamiento del Sistema Soncor**



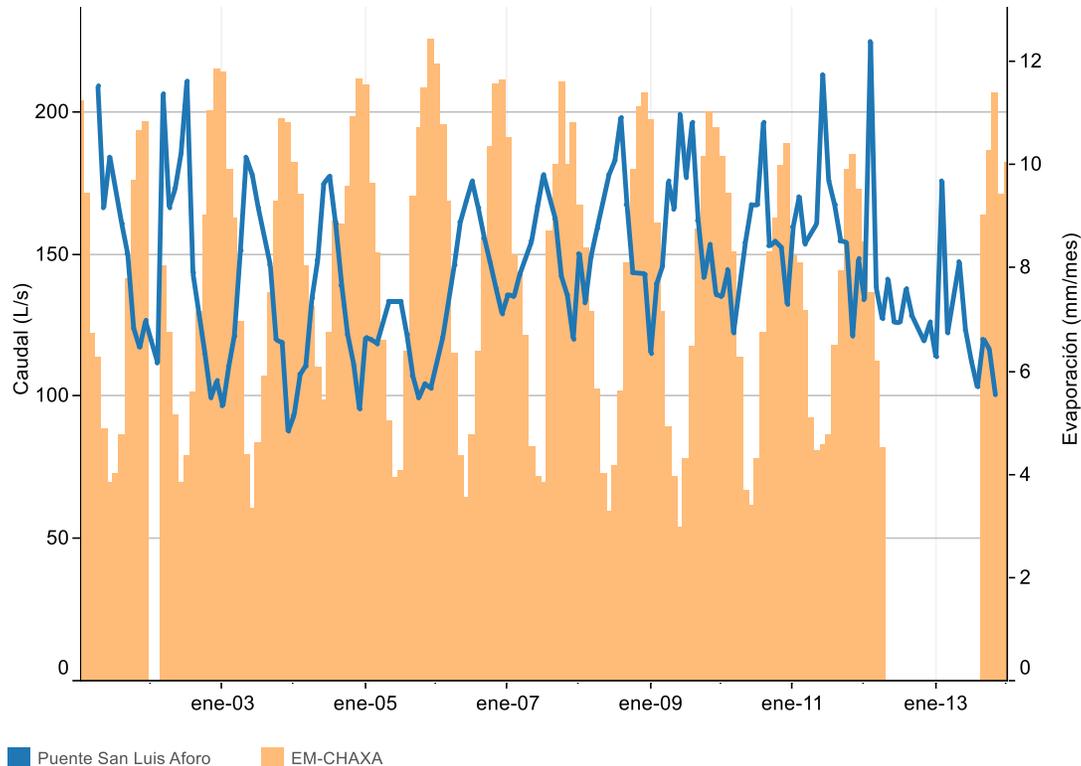
Fuente: Salas et al., (2010)

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

Los aspectos más destacados sobre el comportamiento hidrogeológico, que se analiza con detalle en el Apéndice I de este Anexo, son los siguientes:

- La evolución de los niveles de salmuera no muestra una tendencia única, como sucede en los sistemas de Peine y de La Punta-La Brava, sino que es similar a lo que se observa en el Sistema Aguas de Quelana. Los pozos ubicados más próximos al núcleo del Salar (Figura 8-5 del Apéndice I), es decir hacia el Sur y el Oeste de las lagunas, presentan una clara tendencia de descenso con ascensos asociados a eventos de precipitación.
- Los niveles en los pozos situados al Este de las lagunas (Figura 8-6 del Apéndice I), muestran una leve tendencia descendente y oscilaciones estacionales que se producen con igual intensidad en todos los años, con máximos de nivel en invierno y mínimos en verano, lo que da cuenta de una clara influencia de la evaporación.
- Los niveles en los pozos situados en sobre el acuífero salobre muestran un marcado comportamiento estacional, con oscilaciones comprendidas de unos 10 a 15 cm, sin reflejarse ningún tipo de relación con los eventos de precipitación (Figura 8-7 del Apéndice I). En los depósitos aluviales del Este se observa un descenso de niveles, con influencia de bombes de agua dulce de los pozos Mulla-1 y Allana de SQM.
- Los niveles registrados en las reglillas se han mantenido relativamente constantes, excepto en el caso de la reglilla L1-G4, situada en la zona de descarga de la laguna Barros Negros, en la que se observa una tendencia al descenso y en Barros Negros, donde aumenta de nivel en los últimos años. En la reglilla del puente San Luis se advierte una disminución de nivel posterior a la precipitación de 2012, debido a la rotura de un muro de represamiento de la estación de aforo del mismo nombre, mostrando el descenso del caudal medido tras ese evento (Figura 8-10 Apéndice I).
- Al comparar las variaciones en el caudal aforado en la estación Puente San Luis, con la tasa de evaporación registrada en la estación EM-Chaxa, se observa que las variaciones de caudal son coincidentes con las variaciones en la tasa de evaporación hasta 2012, pero de manera inversa, según se observa en la Figura 9-22. Esto pone de manifiesto que cuando se produce mayor evaporación, los caudales afluentes al sistema son menores.

**Figura 9-22 Caudal Puente San Luis comparado con la evaporación**

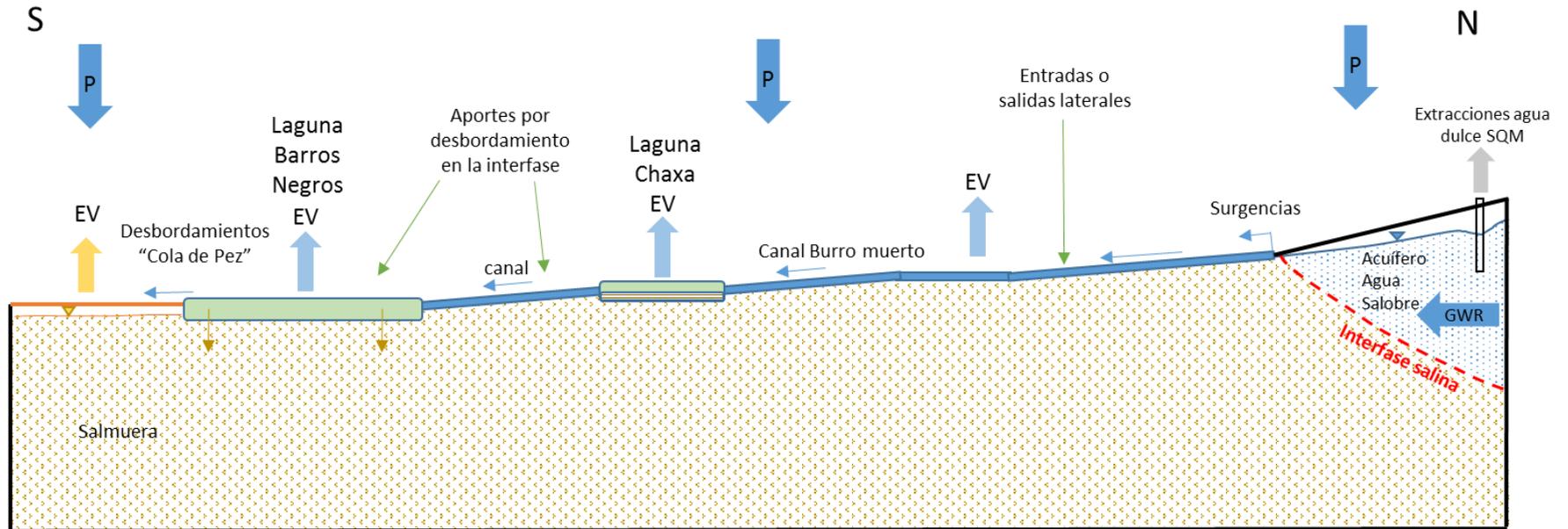


Fuente: elaboración propia con datos de terceros

- El agua de las lagunas presenta una composición clorurada sódica muy enriquecida en cloruro y sodio-potasio, mientras que las aguas más diluidas de la Quebrada de Camar, también cloruradas sódicas, presentan una mayor proporción de otros iones. Ello, permite interpretar que gran parte del enriquecimiento se debe a la disolución de los sedimentos evaporíticos. Esta hipótesis está apoyada por los datos de conductividad eléctrica aportados por SQM ya que la conductividad eléctrica aumenta muy rápidamente al llegar a la Zona Marginal.
- Respecto a los flujos superficiales que se han medido en este sistema, Salas et al. (2010) reportan que la mayor parte del agua de la Laguna Chaxa procede del Norte a través del Canal del Burro Muerto y descarga por el Sur por otro canal hacia la Laguna de Barros Negros. Entre el puente San Luis y la entrada a Chaxa, el canal del Burro Muerto recibe un aumento de caudal de entre el 25 y 30% durante la época invernal debido al aporte subterráneo, mientras que en la época estival el caudal se reduce un 35 % por evaporación e infiltración. En la Laguna Chaxa no existen evidencias de aportes laterales, ni de surgencia de aguas subterráneas o desbordamientos estacionales, por lo que el funcionamiento está controlado por el canal.

En la Figura 9-23 se presenta el modelo conceptual del funcionamiento hidrogeológico para el Sistema Soncor.

**Figura 9-23 Modelo conceptual Sistema Sencor**



Fuente: Elaboración propia

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

## 9.2 Metodología y parámetros para el cálculo del balance hídrico

### 9.2.1 Marco general

En relación con el modelo conceptual descrito y para efectos de la modelación numérica, es necesario determinar el balance hídrico, así como su cuantificación rigurosa. Este es uno de los aspectos más importantes en cualquier estudio de hidrogeología subterránea y de modelación numérica. Para elaborar el balance hídrico ha sido imprescindible conocer con detalle el funcionamiento del sistema a nivel de Cuenca pero también a nivel local. Con ello, es posible representar de la forma más adecuada cada uno de los aspectos del modelo conceptual y del funcionamiento de los sistemas lagunares, en especial, por dónde entra el agua, por dónde sale, cómo circula, sus interacciones con la roca y los límites hidrológicos.

El balance hídrico consiste en aplicar el principio de la conservación de la masa a una región definida para condiciones de borde determinadas, en un período de tiempo dado. Así se establece que la diferencia entre las entradas y las salidas del sistema, es igual a la variación de almacenamiento, respondiendo a la ecuación:

$$\text{ENTRADAS} - \text{SALIDAS} = \text{VARIACION DE ALMACENAMIENTO}$$

Previo al desarrollo del balance hídrico de la cuenca hidrográfica del Salar de Atacama, Rockwood realizó un análisis de los balances desarrollados por la DGA, identificados como DGA 2010a y DGA 2013, siendo el segundo una actualización del anterior. El objetivo del balance de estos trabajos fue realizar la estimación de la oferta hídrica en la cuenca del Salar de Atacama para el otorgamiento de derechos de aprovechamiento de aguas. Ambos trabajos consideran una conceptualización del sistema en la que el límite entre la salmuera y el acuífero, que tiene implicancias importantes en los cálculos del balance hídrico, coincide con el límite entre el Núcleo y la Zona Marginal. En ambos trabajos, además, se utilizan las tasas de evaporación medidas por Mardones en los años 1983 y 1984 para calcular los flujos de evaporación en el Salar.

En el modelo conceptual del presente estudio se presenta una diferencia de los estudios citados, en ambos aspectos. En el primer caso, el límite entre la salmuera y el acuífero no está entre el Núcleo y la Zona Marginal, sino dentro de esta última. En el segundo, con base en los trabajos de terreno realizados con ocasión de este EIA, se presentan tasas de evaporación más reales.

En relación con esta materia, debe indicarse que respecto del estudio DGA 2013, en el mismo se indicó que el balance en el Núcleo no estaba bien resuelto, lo que podría deberse a dos causas:

*“i. Es posible que la tasa estimada por Mardones de 0,005 mm/día esté subestimada dado el corto periodo de observación considerado y la limitada cobertura de los lisímetros utilizados.*

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

ii. *Es posible que una parte de la precipitación caída sobre el Salar no infiltra hacia la napa, formando charcos sobre la costra del Salar. Estos charcos evaporan rápidamente el agua contenida en ellos, a una tasa de evaporación mayor en varios órdenes de magnitud a la considerada por Mardones.”* (DGA, 2013) Sin perjuicio de ello, Rockwood procedió a calcular el balance hídrico, primeramente, utilizando las tasas de evaporación de Mardones 1983-1984, aplicándolas al modelo conceptual explicado en el punto 9.1., lo que evidenció desequilibrios en los flujos de evaporación dentro del Núcleo y en la Zona Marginal, lo que no resultaba coherente con el modelo conceptual planteado ni con las observaciones y resultados de los trabajos realizados de terreno.

Por la razón anterior, se desarrolló un balance hídrico que tiene en cuenta el modelo conceptual explicado, el cual considera las tasas de evaporación medidas por SGA-Rockwood en el marco de este EIA. Los detalles de la estimación de las tasas de evaporación, así como del análisis comparativo realizado con las tasas de Mardones se explican en el Apéndice J. Evaporación del presente Anexo, en tanto que los resultados finales a utilizar se describen en la Tabla 6-7 del capítulo 6 de Hidrología.

A este respecto debe indicarse que con el uso de las nuevas tasas de evaporación medidas con el método del domo o cámara semiesférica, los resultados del balance hídrico obtenidos sí resultan coherentes con el modelo conceptual desarrollado y con las direcciones de flujo y sus magnitudes, que pueden estimarse a partir de las mediciones y trabajos realizados en terreno. Adicionalmente, dichos resultados no presentan inconsistencias conceptuales o de cálculo de balance, tanto en la cuenca como en el área del modelación.

### 9.2.2 Subdivisión de la Cuenca

La determinación de la superficie hidrográfica aportante al Salar de Atacama y sus respectivas subcuencas, se realizó en consideración a criterios geográficos, hidrológicos e hidrogeológicos, de acuerdo a la cartografía disponible en el sector y a los estudios antes identificados (DGA 2010a y DGA 2013).

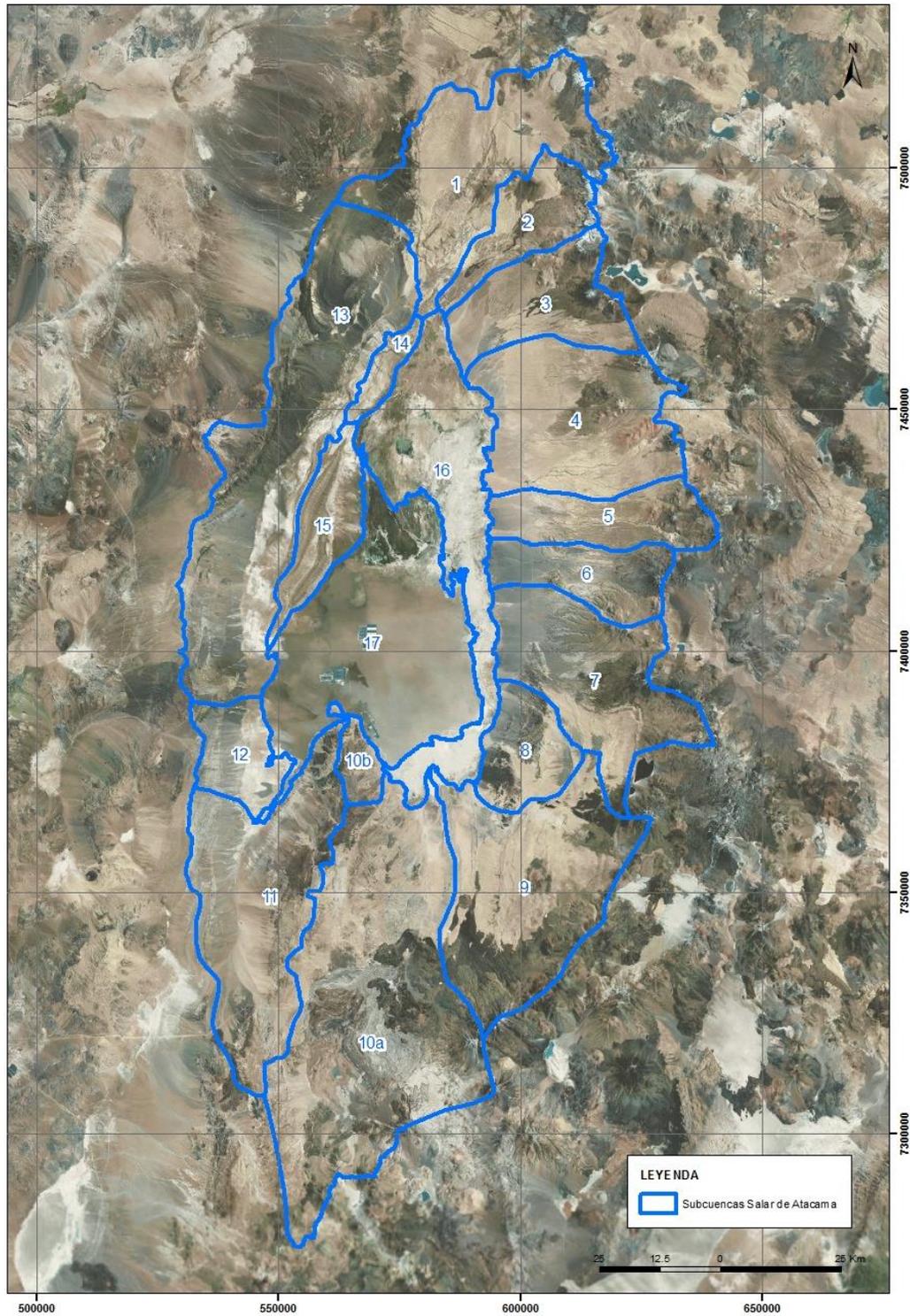
La cuenca del Salar de Atacama es una cuenca endorreica, en la que el límite exterior de la hoya hidrográfica no tiene por qué coincidir exactamente con el límite de la cuenca hidrogeológica. En este estudio se ha considerado igual al hidrológico, de manera de facilitar la realización del balance hídrico. Por otro lado, se ha observado que en la zona interior de la cuenca, próxima al área de estudio, las direcciones de flujo predominantes, (tal como indican las piezometrías realizadas por diversos autores en el acuífero aluvial del Borde Este), son concordantes con las líneas de máxima pendientes topográfica, pudiendo asimilarse en este caso los límites hidrológicos e hidrogeológicos por cada subcuenca.

El estudio DGA 2010a delimitó 13 cuencas (2 subcuencas correspondientes al Salar y 11 a subcuencas aportantes) siguiendo criterios principalmente topográficos. El estudio DGA 2013, que tuvo un mayor foco en la delimitación de las subcuencas hidrogeológicas, definió un total de 10 subcuencas para toda la cuenca.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

Para el presente estudio se utilizaron como base las subcuencas definidas en el estudio DGA 2010a, y se realizó un ajuste a sus límites que se traduce en un mayor nivel de discretización de las subcuencas en aquellos sectores donde se requiere de un mayor detalle en el cálculo de los flujos aportantes. En la Figura 9-24 se presentan las subcuencas utilizadas en los cálculos de este trabajo.

**Figura 9-24 Subcuencas Salar de Atacama**



Fuente: Elaboración propia

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

La superficie de las áreas aportantes (km<sup>2</sup>) se presenta en la Tabla 9-1.

**Tabla 9-1 Áreas Aportantes Subcuencas**

Subcuenca	Área (km <sup>2</sup> )
1	1.209
2	440
3	638
4	1.162
5	513
6	447
7	1.029
8	395
9	1.434
10a	2.557
10b	135
11	1.363
12	335
13	2.108
14	123
15	387
16	1.184
17	1.705
<b>TOTAL</b>	<b>17.164</b>

Fuente: Elaboración propia

Para una adecuada discretización de los flujos que drenan hacia el depocentro del Salar, se consideraron los citados estudios de la DGA 2010a y DGA 2013, complementados con análisis cartográfico de las curvas de nivel de la cuenca, como resultado de lo cual, se dividió el área total en estudio en 17 subcuencas, de acuerdo a sus características de ubicación y drenaje.

Dado que el balance hídrico considera principalmente flujos subterráneos, se ha tenido en cuenta también en la delimitación de los límites de las subcuencas aportantes que las direcciones de flujo subterráneo sean coherentes con los mismos. Con tal propósito, se consultaron las piezometrías elaboradas para la cuenca en para los años 1997 y 2013 (ver punto 8.3.3 Superficie freática) y aquellas de la bibliografía que se citan en el mismo punto. En las zonas en las que no existe una piezometría con el detalle adecuado se utilizó el criterio que las direcciones de flujo subterráneo son consistentes con el gradiente topográfico de la superficie del terreno, tal como se observa en el resto del sistema.

De este modo, la subcuenca 17 corresponde al Núcleo, la subcuenca 16 a la Zona Marginal, y las subcuencas 1 a la 15 corresponden a subcuencas que son aportantes de las anteriores. En la Figura 9-24

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

se observa que la subcuenca 10 se dividió en 10a y 10b, pues parte de la cuenca descarga directamente al Núcleo (10b), mientras que la otra parte (10a) descarga a la Zona Marginal.

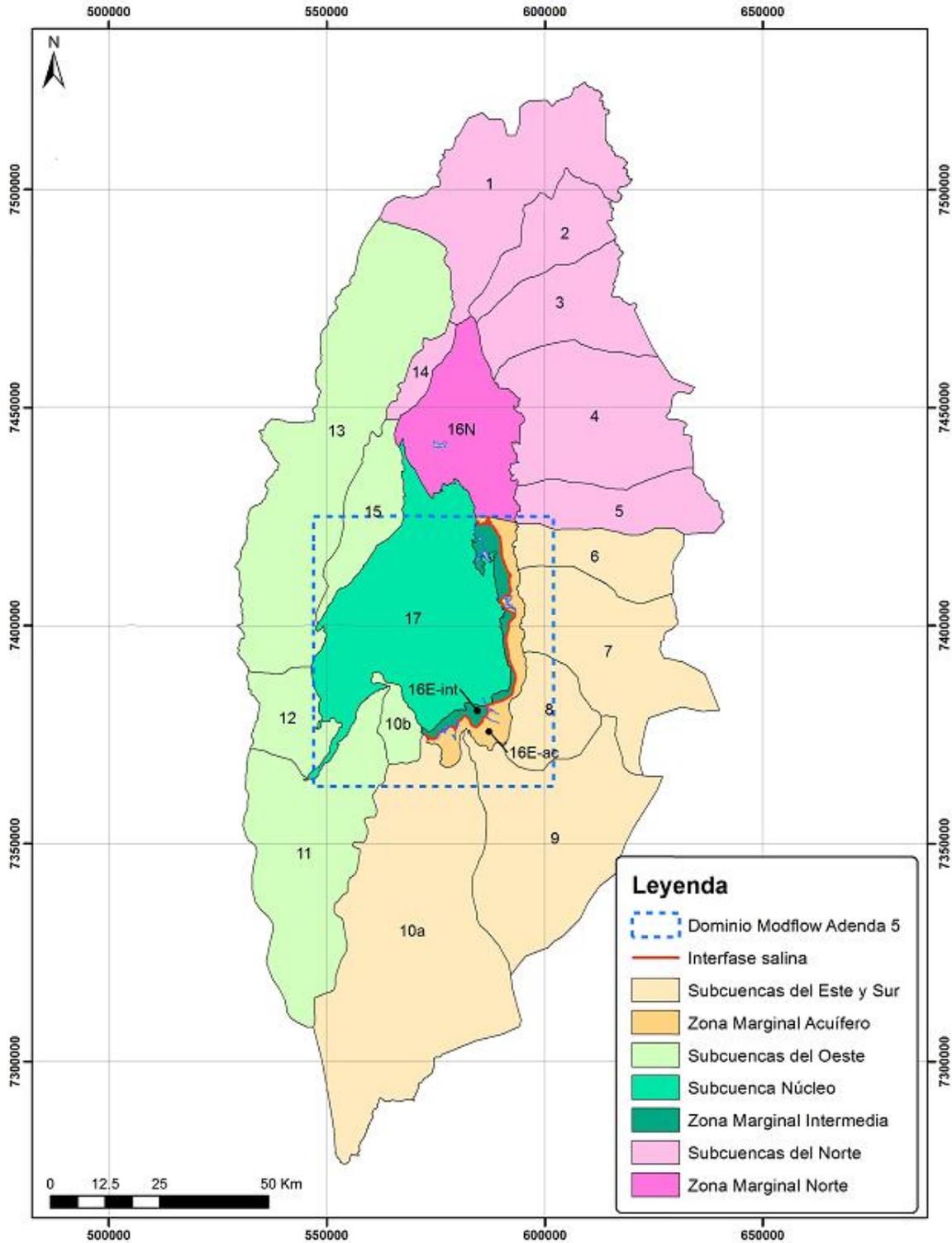
### 9.2.3 Esquema de balance hídrico

#### 9.2.3.1 Descripción del balance

Para facilitar la comprensión de los análisis realizados, así como de los cálculos y sus resultados, se han agrupado las 17 subcuencas antes descritas en distintas zonas con similar funcionamiento y forma de cálculo de balance, las que se diferencian en la Figura 9-25 con distinto color.

Al respecto es importante mencionar que la subcuenca 16, que corresponde a la Zona Marginal, se ha dividido en tres partes para efectos del cálculo de balance: la 16N que corresponde al Norte de la Zona Marginal y que recibe aguas de las subcuencas del norte; la 16E-ac, que corresponde a la denominada Zona Marginal Acuífero descrita en el modelo conceptual (ver punto 9.1.1) y que recibe aguas de las subcuencas del Este y Sur de la cuenca; y la 16E-int, que corresponde a la denominada Zona Marginal Intermedia, descrita también en el modelo conceptual, y que contiene salmuera. Estas dos zonas, 16E-ac y 16E-int, se diferencian para el balance dada la presencia de la interfase salina, en su intersección con la superficie del terreno.

**Figura 9-25 Delimitación de las zonas utilizadas para representar el balance hídrico**



Fuente: Elaboración propia

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

La conceptualización del cálculo de balance para cada una de las zonas diferenciadas en la Figura 9-25 se describe a continuación:

En los bordes Este y Sur de la Cuenca, el balance hídrico se cierra entre la recarga procedente de las subcuencas aportantes (6, 7, 8, 9, 10a) y, la descarga por evaporación que se produce en la Zona Marginal Acuífero (16E-ac), tanto directamente desde el terreno (EVT, EV) como desde las propias lagunas (EVL) que reciben el agua de surgencias desde el acuífero. Otra de las descargas en la Zona Marginal Acuífero es el agua salobre que “desborda” por encima la interfase salina saliendo de la zona 16E-ac y entrando a la 16E-int.

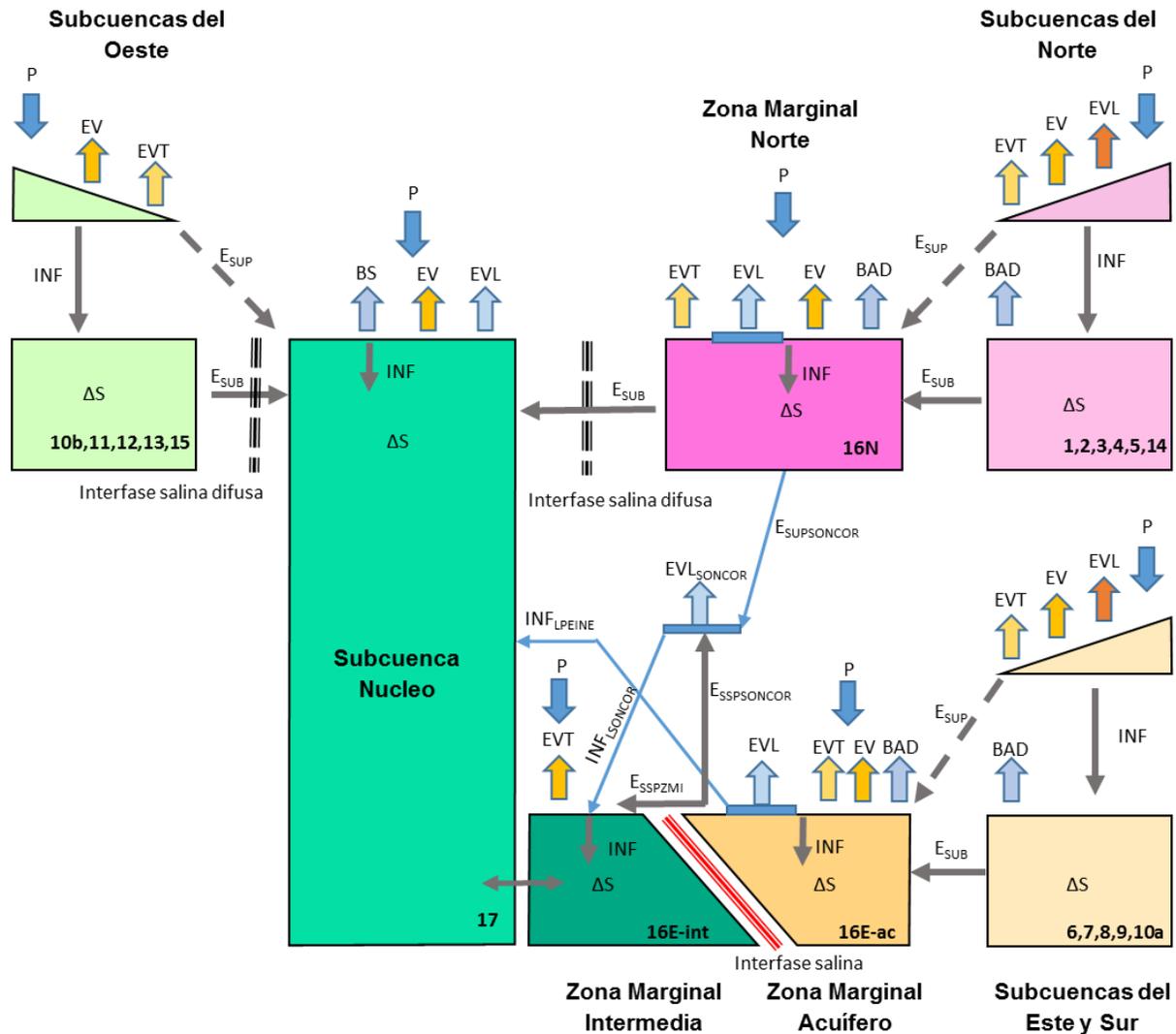
En el Norte de la Cuenca, en la Zona Marginal (16N) existe una interfase difusa que permite el flujo subterráneo desde las subcuencas del Norte (1, 2, 3, 4, 5 y 14) hacia el Núcleo del Salar (17). De esta manera, la recarga subterránea al Núcleo (17) y la recarga superficial al sistema lagunar Soncor desde el Norte, son la diferencia entre la recarga de las subcuencas aportantes más la precipitación directa, y menos la evaporación que se produce en la Zona Marginal Norte (16N).

La recarga que se genera en las subcuencas del Oeste (10b, 11, 12, 13 y 15) entra directamente al Núcleo del Salar (17).

Además se destaca que los flujos de infiltración en el Núcleo del Salar (17+16E-int) procedentes de los sistemas lagunares de Peine y Soncor, cuyas aguas afloran en la Zona Marginal Acuífero (16E-ac) y terminan en la Zona Marginal intermedia (16E-int), han sido determinados en base a un balance hídrico aplicado a estas aguas superficiales, para el que se consideraron medidas de aforos y cálculos de evaporación a partir de imágenes satelitales y medidas de terreno. El detalle de estos balances se encuentran en el Apéndice I, Funcionamiento hidrogeológico de los sistemas lagunares: Soncor, Aguas de Quelana, Peine y La Punta-La Brava.

En el siguiente esquema (Figura 9-26) se muestran las relaciones de flujo entre las distintas zonas de balance descritas y que son utilizadas para todos los cálculos desarrollados. Es decir, en este esquema se muestran todas las entradas y salidas que se han considerado en el cálculo del balance hídrico de la Cuenca. También se incluyen aquellas entradas y salidas que son variables en el tiempo (tales como bombeos), y que no son consideradas en los cálculos del balance en la condición de equilibrio.

**Figura 9-26 Esquema de bloques del Modelo Conceptual del balance hídrico**



Fuente: Elaboración propia

Los elementos del balance son:

- P Precipitación total
- EV Evaporación desde el suelo, después de una lluvia
- EVT Evapotranspiración, desde el acuífero a través del suelo o a través de la transpiración de la vegetación
- EVL Evaporación en lámina libre, desde los cuerpos de agua superficiales (lagunas)
- BAD Bombeos de agua dulce

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

BS	Bombeos de salmuera
INF	Infiltración. Parte de la precipitación que se incorpora al acuífero
INF <sub>L</sub>	Infiltración al Núcleo y a Zona Marginal Intermedia desde las lagunas (INF <sub>LPEINE</sub> / INF <sub>LSONCOR</sub> )
ΔS	Variación de almacenamiento en el acuífero
E <sub>SUB</sub>	Escorrentía subterránea
E <sub>SUP</sub>	Escorrentía superficial (E <sub>SUPSONCOR</sub> )
E <sub>SSP</sub>	Escorrentía sub-superficial (E <sub>SSPSONCOR</sub> / E <sub>SSPZMI</sub> )

De la Figura 9-26 y de los elementos descritos, cabe señalar que como es un balance general a escala de cuenca, los cuerpos lagunares han quedado representados como una salida del sistema, a través de la evaporación (EVL). Componentes intermedias en lo que respecta al balance de las lagunas, como afloramientos y caudales de escurrimientos están descritas en el modelo conceptual de los sistemas lagunares que se presenta en el Apendice I.

### 9.2.3.2 Ecuaciones del balance

En régimen natural o estacionario, no alterado por las extracciones, el balance en el conjunto de la Cuenca se define con la siguiente ecuación, definida por valores promedio de largo plazo:

$$P - (EV + EVL + EVT) = \Delta S$$

Se considera que en condiciones naturales, el sistema está en equilibrio, es decir, no hay variación de almacenamiento ( $\Delta S = 0$ ), y los niveles en los acuíferos se consideran constantes, por lo que la ecuación se simplifica en:

$$P = (EV + EVL + EVT)$$

Esta ecuación se calcula para cada zona de balance descrita anteriormente, tomando en cuenta los elementos del balance calculados para cada una de las subcuencas de cada zona. Estas ecuaciones se presentan a continuación:

#### Zona de balance Este y Sur:

Subcuencas aportantes (6, 7, 8, 9 y 10a):

$$P = EV + EVL + EVT + E_{SUB} \quad (\text{donde } E_{SUB} = INF)$$

Zona Marginal (16E<sub>ac</sub>) frente a subcuencas 6, 7, 8, 9 y 10a:

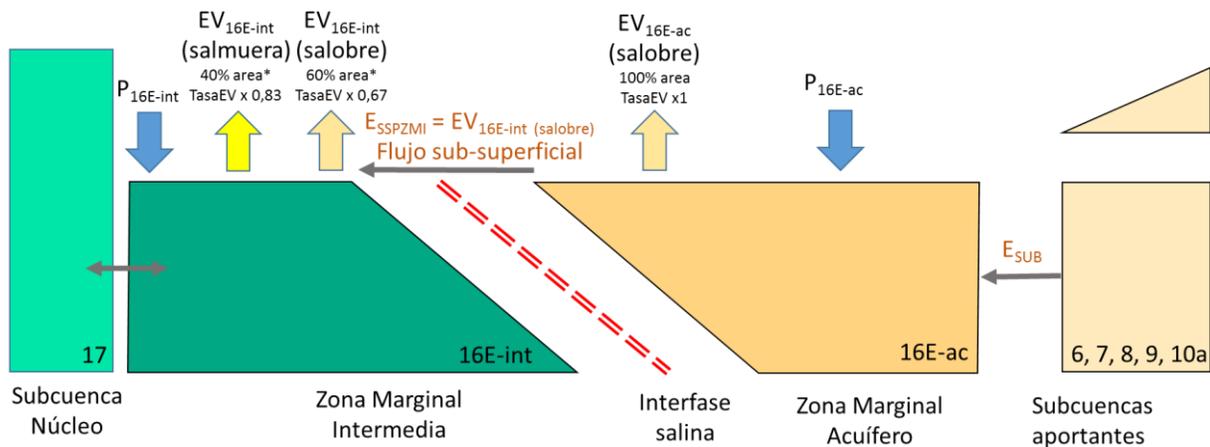
$$P + E_{SUB} = EV + EVL + EVT + INF_{LPEINE} + E_{SSP}$$

$$E_{SSP} = E_{SSPZMI} + E_{SSPSONCOR}$$

Para el cálculo de la evaporación en la Zona Marginal Intermedia, se tuvo en cuenta que parte del agua que evapora es salmuera, y otra parte es agua salobre que procede de flujos subsuperficiales ( $E_{SSPZMI}$ ) que sobrepasan la interfase. El detalle del esquema de cálculo en esta zona se muestra en la Figura 9-27.

**Figura 9-27 Esquema explicativo de la evaporación en la Zona Marginal Intermedia**

$$EV_{16E-int} = EV_{16E-int}(\text{salmuera}) + EV_{16E-int}(\text{salobre})$$



\* Estos valores se invierten en Zona Marginal Intermedia enfrentada a las subcuencas del sector de Quelana  
 NOTA ACLARATORIA: para simplificar en esta figura se agrupan los distintos tipos de evaporación (EVL, EV y EVT) bajo las siglas EV

Fuente: Elaboración propia

**Zona de balance Norte:**

Subcuencas aportantes (1, 2, 3, 4, 5 y 14)

$$P = EV + EVL + EVT + E_{SUB} \quad (\text{donde } E_{SUB} = INF)$$

Zona Marginal Norte (16N):

$$P + E_{SUB} = EV + EVL + EVT + E_{SUBN} + E_{SUPSONCOR}$$

**Zona de balance Oeste y Núcleo:**

Subcuencas aportantes (11, 12, 13, 15)

$$P = EV + EVT + E_{SUB} \quad (\text{donde } E_{SUB} = INF)$$

Núcleo y Zona Marginal Intermedia (17, 16E\_int)

$$P + E_{SUBN} + E_{SUB} + E_{SSPZMI} + INF_L = EV + EVL + EVT$$

$$INF_L = INF_{LPEINE} + INF_{LSONCOR}$$

$$INF_{LSONCOR} = E_{SUPSONCOR} + E_{SSPSONCOR} - EV_{LSONCOR}$$

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

Si se considera un régimen intervenido por extracciones, la ecuación general del balance se define mediante la siguiente expresión:

$$P - (EV + EVL + EVT + BAD + BS) = \Delta S$$

En este caso, la variación del almacenamiento se traduce en una variación de niveles en los distintos acuíferos considerados, La variación de almacenamiento será evaluada con mayor detalle mediante el modelo numérico que se presenta en el capítulo 10.

#### 9.2.4 Componentes del balance hídrico

En el presente punto se muestran los cálculos y metodologías utilizadas en la determinación de los diferentes parámetros del balance hídrico.

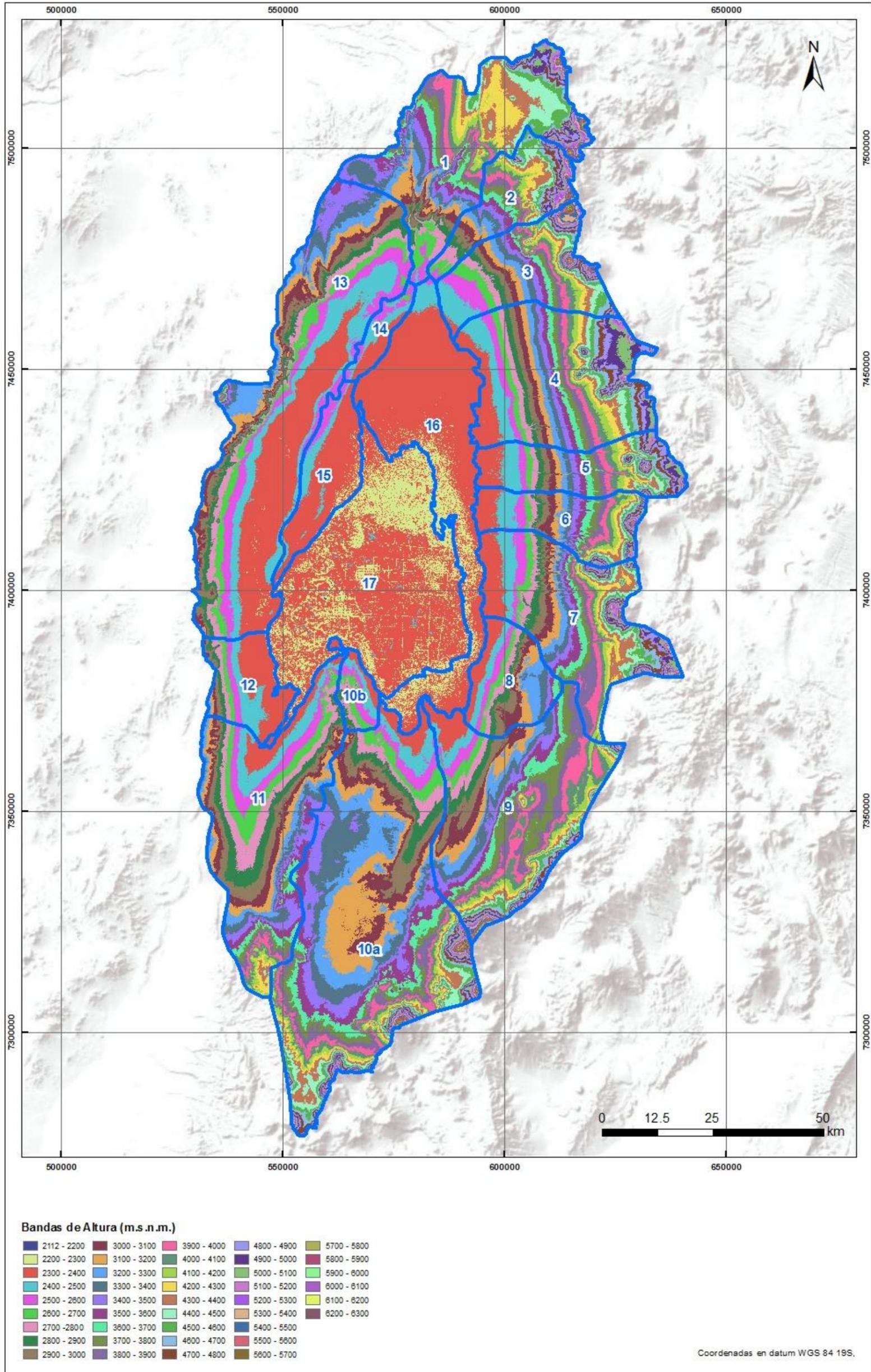
##### 9.2.4.1 Precipitación

- Precipitación en las subcuencas aportantes

La precipitación, igual que la evaporación, muestra una variación altamente dependiente de la altura geográfica. Si bien se cuenta con isoyetas anuales de precipitación que muestran la distribución espacial de las precipitaciones en la cuenca, se requiere conocer las precipitaciones mensuales en cada subcuenca para el cálculo de las series de recarga mensualizadas.

De este modo, para determinar de manera más precisa este parámetro para cada subcuenca aportante, se procedió a dividir toda la cuenca en bandas de altura cada 100 metros, a cada una de las cuales se le calcula posteriormente una precipitación promedio para cada mes del año. En la Figura 9-28 se muestran las bandas de altura resultantes.

**Figura 9-28 Bandas de altura en área de estudio**



Fuente: Elaboración propia

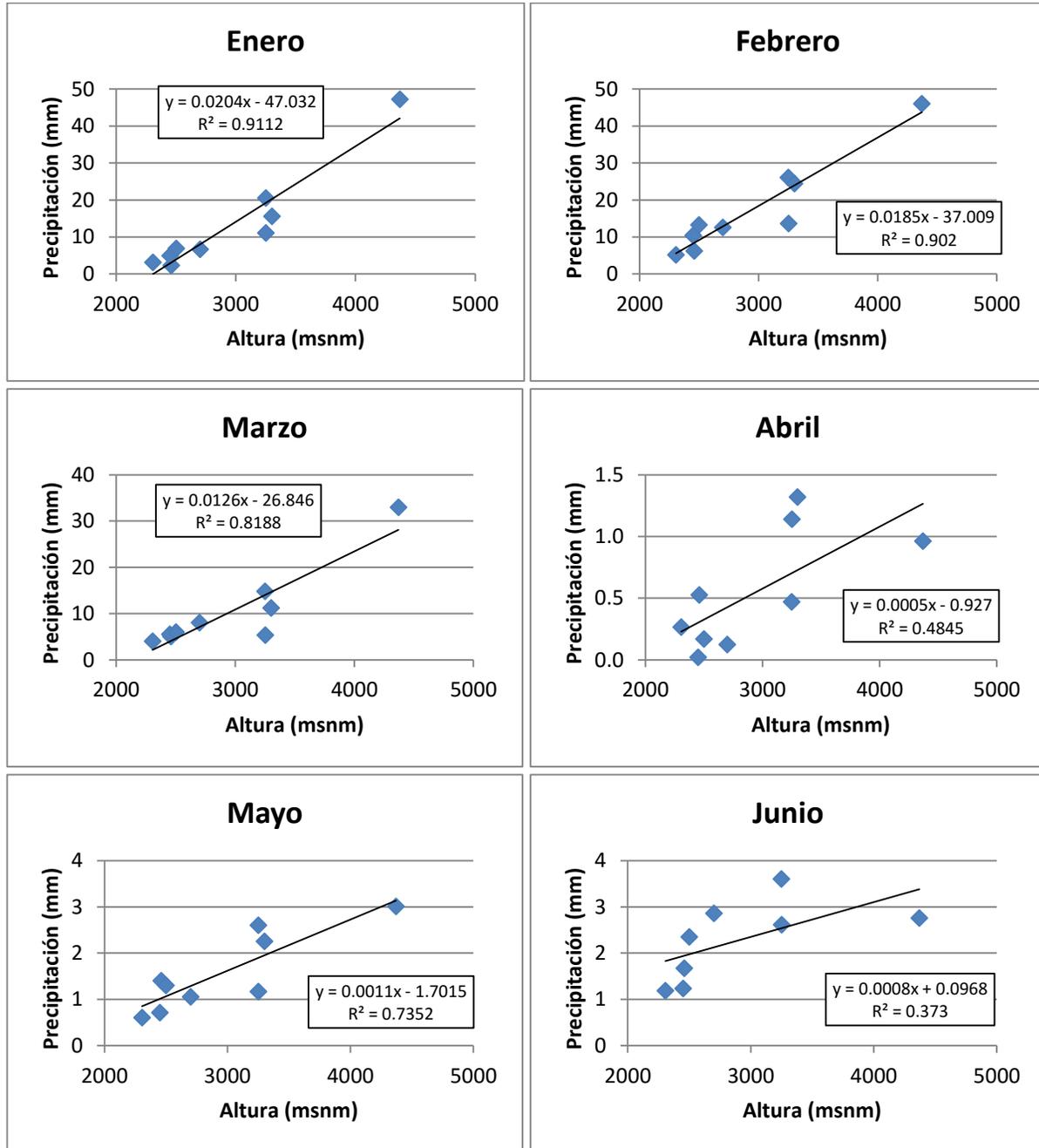
	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

La metodología empleada en la determinación de la precipitación promedio de cada mes del año para cada subcuenca aportante fue la siguiente:

Para los doce meses del año, con las estadísticas de precipitación, utilizando los valores recopilados y completados en las estaciones meteorológicas de la cuenca (Tabla 6-3) para el período homologado 1974-2013, se generaron gradientes mensuales de precipitación versus altura. Éstos, se muestran en Figura 9-29, donde se observa que las mejores correlaciones lineales coinciden con los meses de mayores registros de días de lluvia, debido a la ocurrencia de eventos de precipitación más importantes que son registrados en varias estaciones. En los meses de invierno se presentan menos precipitaciones y más localizadas, lo que genera que no existan registros en todas las estaciones para un mismo evento, e influye en los menores coeficientes de correlación obtenidos.

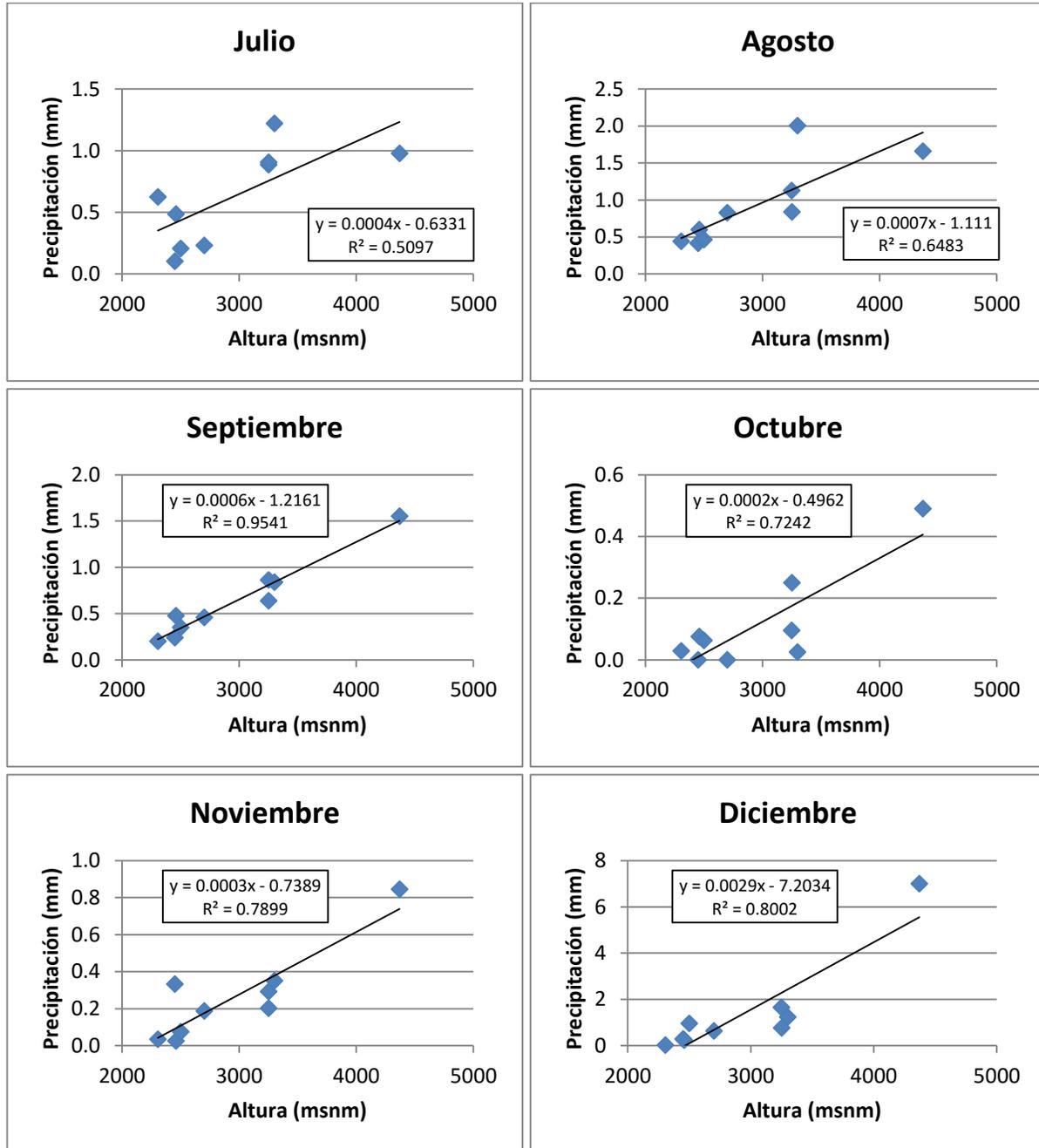
Para evaluar la representatividad de los gradientes de altura en el área en estudio, se utilizaron las isoyetas que se describen en el Capítulo 6 Hidrología de este Anexo las cuales se muestran en la Figura 9-30 con la delimitación de las subcuencas, en conjunto con las estaciones meteorológicas empleadas en la generación de los gradientes de altura. En dicha Figura se observa que no existen estaciones meteorológicas en el sector poniente del área de estudio, donde se ubican las subcuencas 11 a la 15, por lo que se puede afirmar que los gradientes mensuales generados no son representativos de dicho sector y que, además, la precipitación muestra un menor gradiente en relación con la altura en comparación al sector oriente, lo que condice con el análisis del informe técnico de la DGA, 2013.

**Figura 9-29 Gradientes mensuales de precipitación**



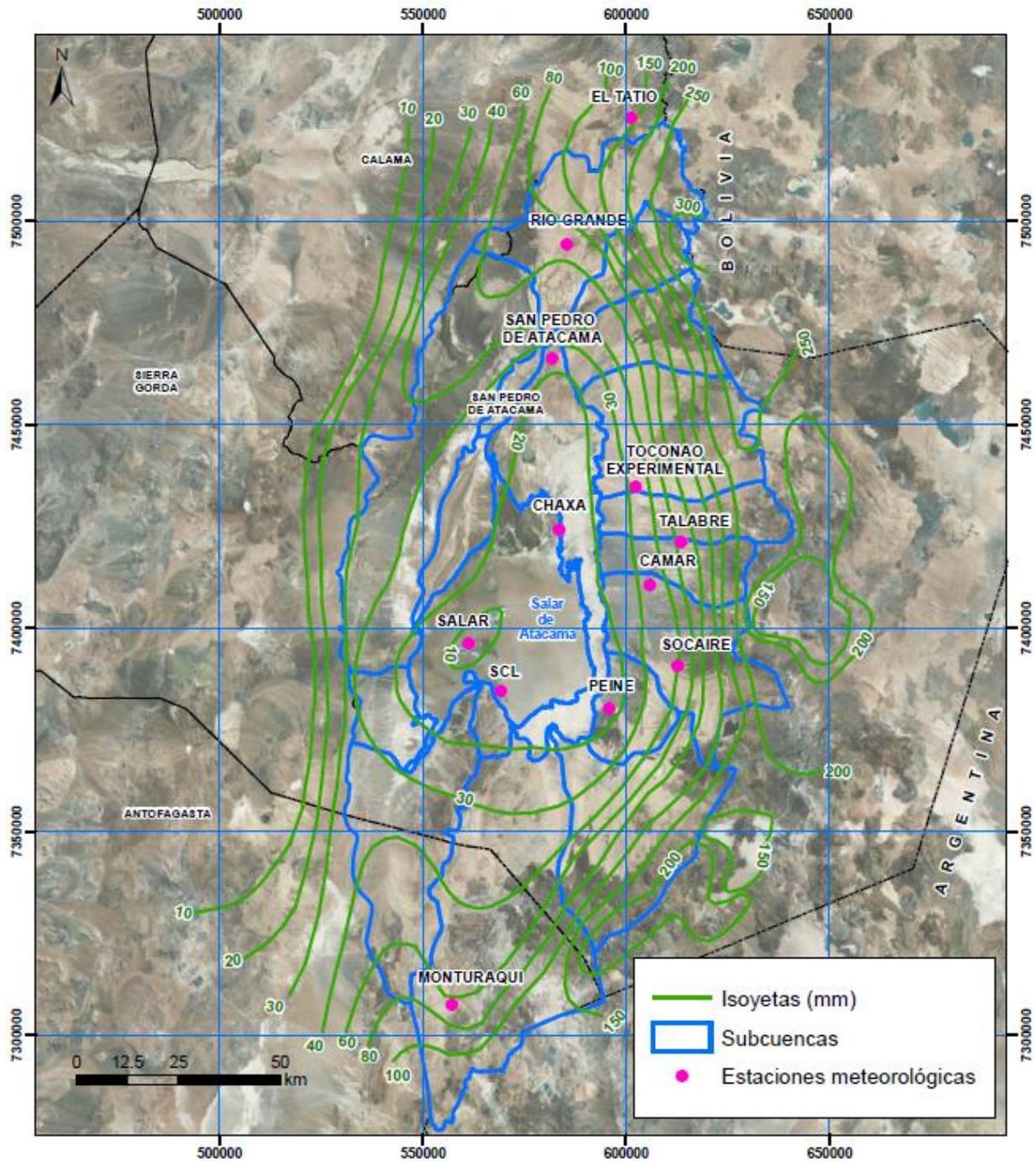
Fuente: Elaboración propia

**Figura 9-29 Gradientes mensuales de precipitación (Cont.)**



Fuente: Elaboración propia

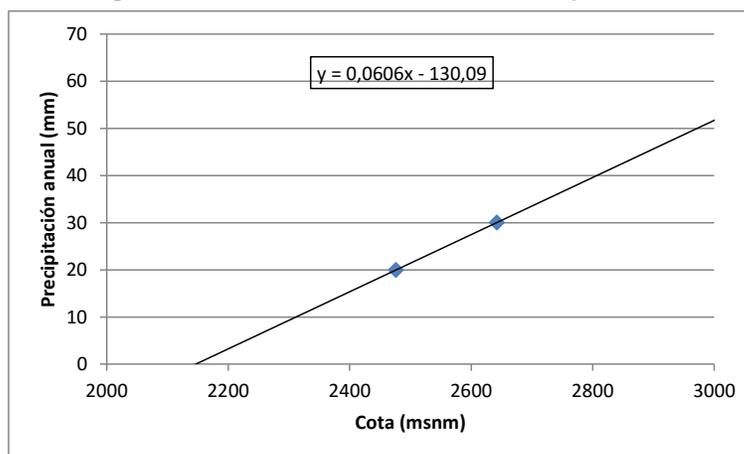
**Figura 9-30 Plano de las subcuencas e isoyetas de precipitación promedio anual**



Fuente: Elaboración propia

Dada la falta de representatividad del gradiente de altura en el sector poniente de la Cuenca, se optó por estimar un gradiente de altura diferente para las cuencas 11 a 15, utilizando directamente el plano de isoyetas y las diferencias de nivel entre la isoyeta 30 y 20 mm. Dado que se utilizaron las isoyetas anuales, no se generaron gradientes distintos para cada mes, sino uno sólo para la serie anual de datos, el cual se muestra en la Figura 9-31.

**Figura 9-31 Gradiente de altura sector poniente**



Fuente: Elaboración propia

Mediante el uso de los gradientes de altura, se determinó una precipitación media mensual para cada banda de altura, empleando su elevación promedio. Luego, considerando el área de cada banda en cada subcuenca se calculó la precipitación promedio anual para cada franja, y con estos valores, se calculó finalmente el caudal de escorrentía como consecuencia de la precipitación disponible anualmente para cada subcuenca, el cual se muestra en la siguiente Tabla 9-2.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

**Tabla 9-2 Precipitación anual en las subcuencas aportantes**

Subcuenca	Precipitación Promedio Anual (L/s)
1	4.035
2	1.547
3	1.807
4	3.165
5	1.444
6	1.136
7	2.844
8	541
9	4.022
10a	6.623
10b	114
11	2.294
12	241
13	2.272
14	71
15	172

Fuente: Elaboración propia

- Precipitación en subcuencas Núcleo y Zona Marginal

La precipitación en la Zona Marginal Acuífero (subcuenca 16E-ac) y la Zona Marginal Norte (16N), situadas aguas arriba de la interfase, fue calculada utilizando los gradientes de altura obtenidos en el punto 9.2.4.1. De acuerdo a la elevación media de la subcuenca, de 2.345 msnm, se obtuvo una precipitación promedio de 12,1 mm.

Para la determinación de la precipitación en la subcuenca Núcleo (17) y la Zona Marginal Intermedia (16E-int) en atención a que la mayor parte de la extensión de estas cuencas se encuentran a una cota muy similar, no se emplearon los gradientes de altura ni el plano de isoyetas. Sólo se consideraron las estadísticas de las estaciones meteorológicas de propiedad de SQM y de Rockwood localizadas dentro del Salar, las que se identifican en la Tabla 6-2. La precipitación media anual en cada una de las estaciones se presenta en la Tabla 9-3, en la que se observa la variabilidad espacial que tienen las lluvias en el Núcleo del Salar.

Para definir la distribución espacial de la precipitación en el Núcleo y Zona Marginal Intermedia, se utilizaron polígonos de Thiessen, metodología que considera que cada estación es representativa del área que la rodea. Lo anterior corresponde a una estimación adecuada de la precipitación dado que ésta, al no seguir una distribución relacionada con la altura, no permite la elaboración de isoyetas mediante criterios topográficos como se realizó para las subcuencas aportantes y Zona Marginal Acuífero. La precipitación

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

calculada para el Núcleo, ponderada de acuerdo a las áreas de los polígonos obtenidos, se presenta en la Tabla 9-3.

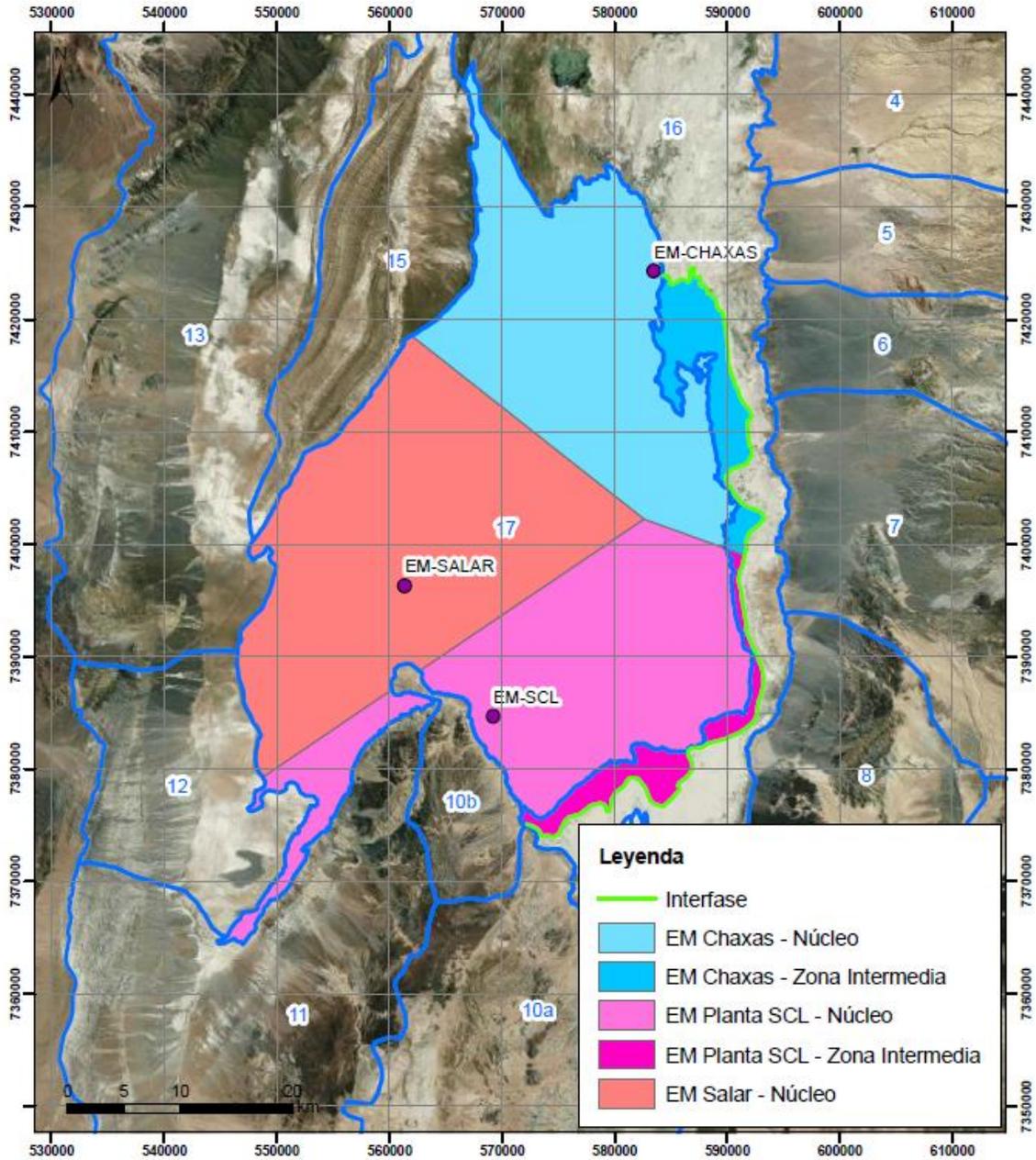
**Tabla 9-3 Precipitación total anual en estaciones del Núcleo**

Estación	UTM Este (m)	UTM Norte (m)	Precipitación anual (mm)	Superficie polígono Thiessen (km <sup>2</sup> )	Precipitación total anual (L/s)
Chaxa	583.508	7.424.264	12,9	594,0	242,9
Salar SQM	561.384	7.396.266	9,4	679,6	202,5
Planta SCL	569.244	7.384.662	12,8	581,0	237,7
			<b>Promedio 11,6</b>	<b>Total 1.855</b>	

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 9-32 se presentan los polígonos de Thiessen generados para el Núcleo y Zona Marginal Intermedia del Salar.

**Figura 9-32 Polígonos de Thiessen de precipitación en el Núcleo y en la Zona Marginal Intermedia del Salar**



Fuente: Elaboración propia

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

### 9.2.4.2 Evaporación

- Evaporación en las subcuencas aportantes

Para determinar de manera precisa la evaporación que ocurre en las subcuencas aportantes, se dividió toda la cuenca en las mismas bandas de altura utilizadas para el cálculo de la precipitación y que fueron presentadas en la Figura 9-28. A cada banda se le asignó una evaporación de referencia de acuerdo a su elevación media, con lo que se calculó posteriormente una evaporación potencial a cada subcuenca de acuerdo a la superficie cubierta por cada banda.

En esta asignación han sido cuantificadas las demandas evapotranspirativas diferentes en el caso de aquellas subcuencas que presentan cultivos, forestaciones, vegas y bofedales y algunas de ellas pequeñas lagunas en razón de que generan un consumo (salida) de aguas subterráneas de la subcuencas aportantes.

Para la identificación de zonas cultivadas, vegas y bofedales, se calculó el Índice Diferencial de Vegetación Normalizado (NDVI) para toda la superficie de interés (Cuenca). Este parámetro corresponde a un indicador calculado a partir de imágenes satelitales, en base a los valores de la reflectancia a distintas longitudes de onda, que es ampliamente utilizado para discriminar cubiertas vegetales. Se basa en que la respuesta espectral de la vegetación muestra un claro contraste entre el espectro del Rojo y el Infrarrojo Cercano (IRC).

El cálculo del NDVI considera la utilización de una fórmula con dos bandas del espectro electromagnético, una en la región del espectro visible y otra en la del IRC. La expresión de cálculo es la siguiente:

$$\text{NDVI} = (\text{IRC}-\text{R}) / (\text{IRC}+\text{R})$$

Donde:

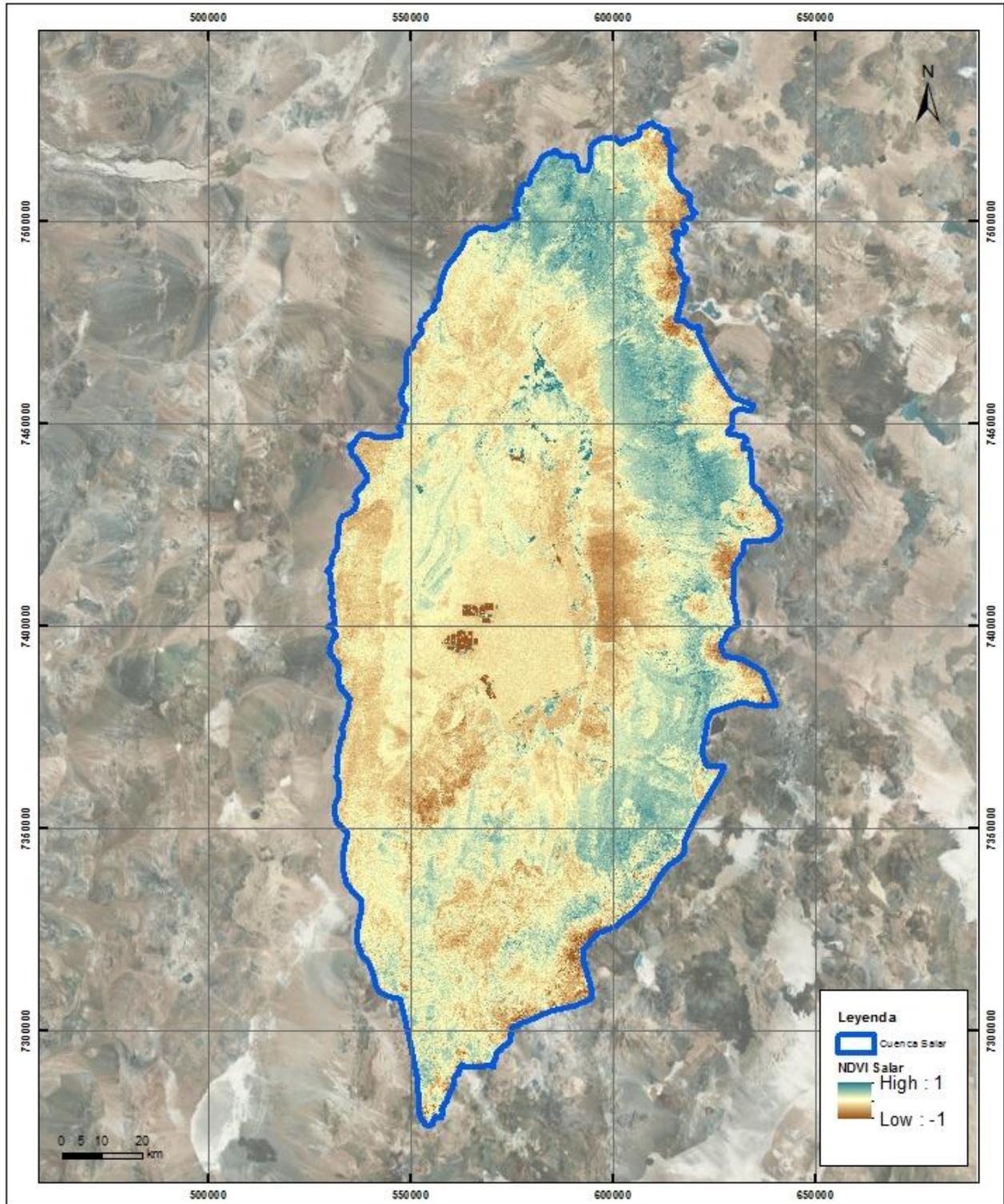
NDVI : Índice Diferencial de Vegetación Normalizado.

IRC : Reflectividad en el infrarrojo cercano.

R : Reflectividad en el espectro rojo.

Para el presente estudio se revisaron las imágenes de la misión LANDSAT 7 de la NASA, la que fue lanzada en 1999 y cuenta con imágenes globales con siete bandas espectrales, correspondiendo la banda 3 al Rojo y la 4 al IRC. En este caso en particular se utilizó una imagen del 11 de Noviembre de 2012. Luego, se calculó el NDVI mediante el uso del software tipo GIS, obteniéndose los resultados mostrados en la Figura 9-33. En la Figura se presentan los valores del NDVI en toda la cuenca, donde el número 1 significa un nivel muy alto de vegetación, y el -1 un nivel muy bajo.

**Figura 9-33 NDVI en las Subcuencas en estudio**



Fuente: Elaboración propia

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

Posteriormente, se llevó a cabo una identificación de las superficies detectadas como cubierta vegetal, las que se presentan a continuación:

- Vegas: Corresponden a formaciones vegetacionales que se desarrollan gracias a una constante y elevada humedad edáfica. Se originan principalmente a raíz de afloramientos subterráneos, los que en esta Cuenca se encuentran siempre en cotas menores a los 3.500 msnm.
- Bofedales: A diferencia de las vegas, los bofedales corresponden a ecosistemas originados en torno a las quebradas que se desarrollan al oriente del Salar. Nacen a alturas mayores que las vegas, llegando incluso a los 5.000 msnm.
- Zonas de Cultivos: Corresponde a terrenos destinados a uso agrícola por parte de los habitantes del sector. Estos terrenos se encuentran ubicados principalmente en las inmediaciones de los pueblos cercanos al Salar.
- Forestaciones: Se identificaron coberturas de plantaciones en el sector nororiente de la Cuenca, las cuales muestran diferencias con las vegas y bofedales, por cuanto no se observa una vegetación variada, sino solamente grupos de tamarugos. De acuerdo a los antecedentes recopilados<sup>10</sup>, se trata de plantaciones realizadas al oriente del Salar, entre San Pedro y Toconao. Originalmente fueron plantadas más de 4.000 hectáreas, pero por efecto de aluviones su extensión se ha visto muy reducida.

Dado que la resolución de la imagen satelital empleada como base (LANDSAT) tiene un tamaño de pixel de 30 metros, a las superficies medidas con GIS se les aplicó un factor de ocupación determinado mediante la observación de imágenes de alta resolución (p ej, Google Earth), con lo que se pudo determinar, para cada tipo de vegetación, qué porcentaje del área del pixel estaba realmente cubierta por vegetación (Tabla 9-4).

**Tabla 9-4 Factor de ocupación por pixel para cada tipo de cubierta vegetal**

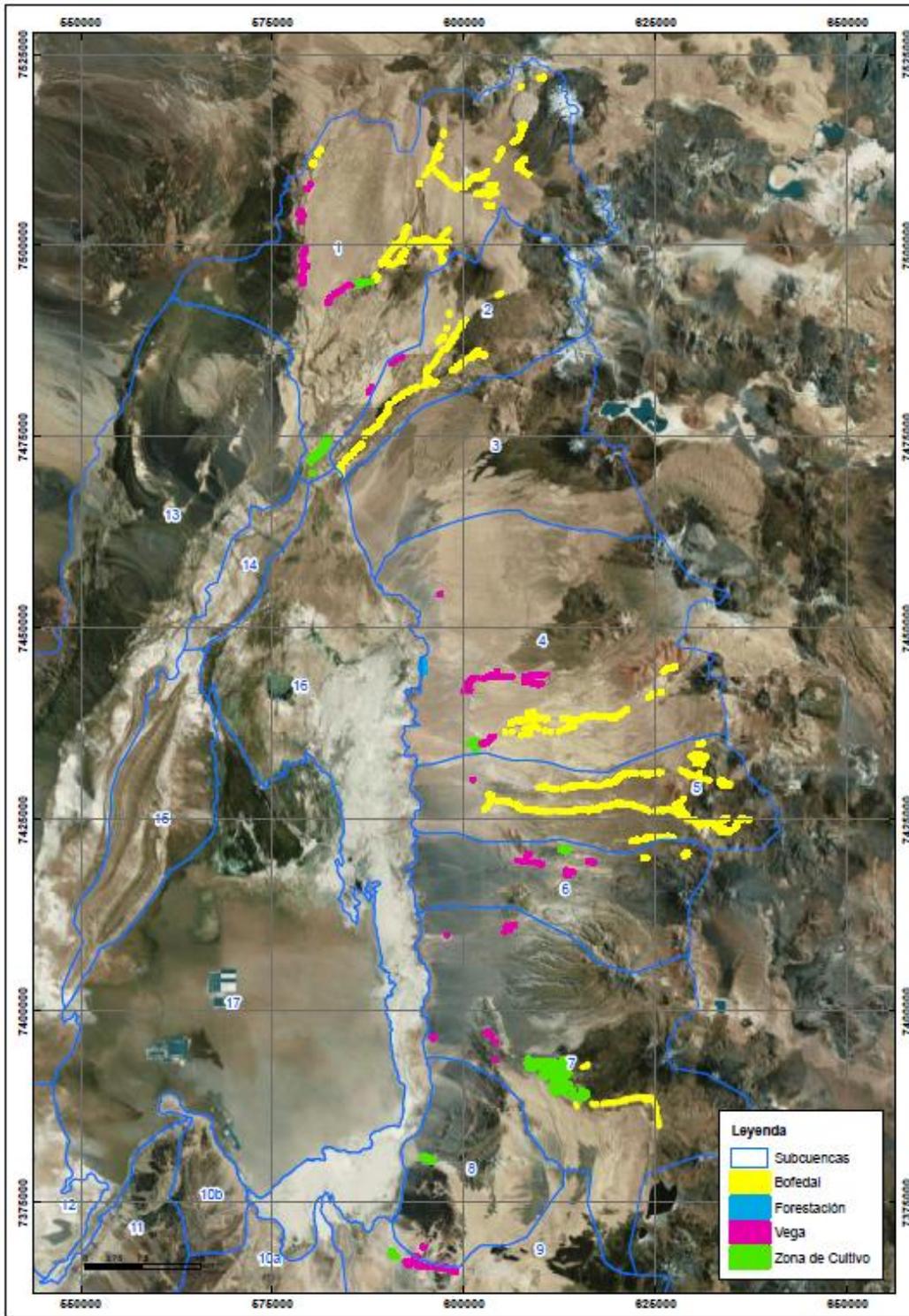
Tipo de cubierta vegetal	Factor de ocupación (%)
Vegas	60 - 90
Bofedales	60 - 85
Zonas de cultivos	100
Forestaciones	40

De esta manera se obtuvo un resultado más real de las superficies calculadas por el NDVI, que de otra manera hubieran quedado sobrestimadas.

Finalmente, se obtuvo la distribución de cobertura vegetal mostrada en la Figura 9-34.

<sup>10</sup> Ficha de antecedentes de especie: *Prosopis Tamarugo* Phil. Noveno proceso de Clasificación de Especies, Ministerio del Medio Ambiente, 2012.

**Figura 9-34 Cobertura vegetal detectada en las subcuencas aportantes**



Fuente: Elaboración propia

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

Para determinar la evapotranspiración en cada una de las superficies con demanda evapotranspirativa, se empleó la siguiente expresión:

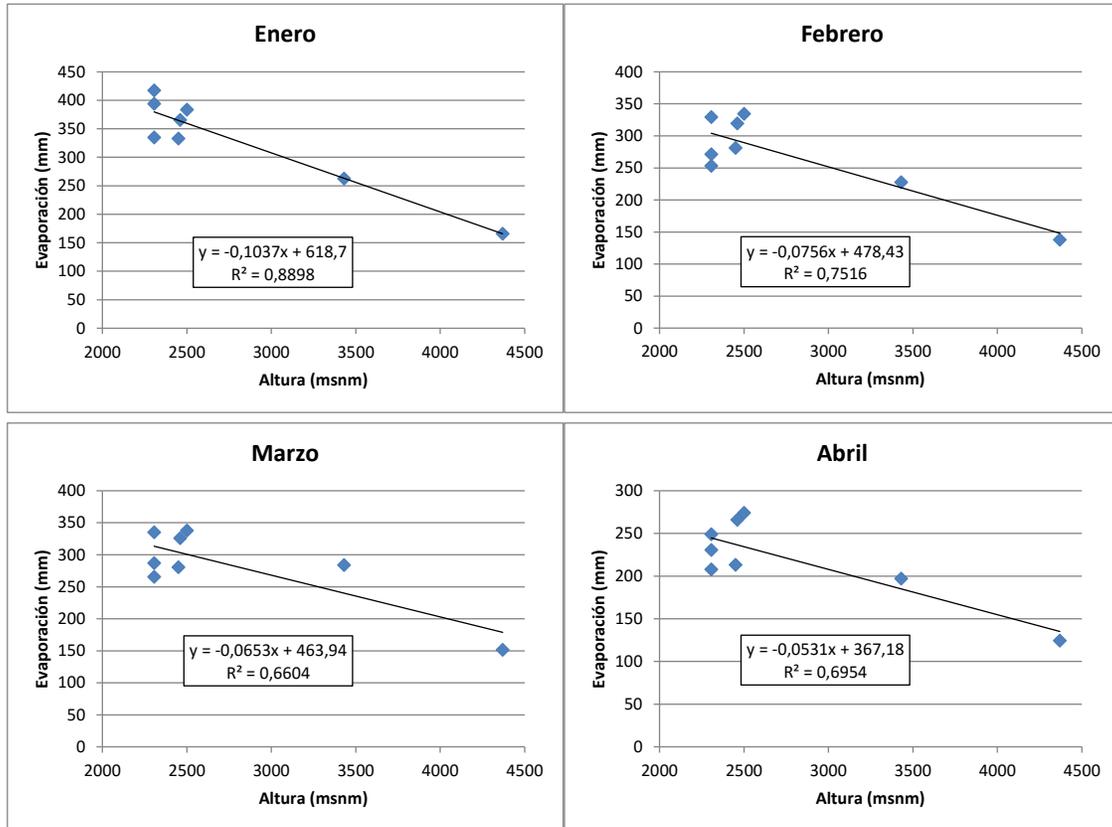
$$ET_c = ET_0 \cdot k_{ev} \cdot k_c$$

Donde:

- ET<sub>c</sub> Evapotranspiración correspondiente al cultivo o tipo de vegetación.
- ET<sub>0</sub> Evaporación de referencia de acuerdo a la elevación del área evaluada.
- k<sub>ev</sub> Factor que convierte evaporación de bandeja a evapotranspiración, el cual depende principalmente de las condiciones atmosféricas en el sector, tales como magnitud del viento y humedad relativa. Se adoptó un valor de 0,75 (DGA, 2010).
- k<sub>c</sub> Coeficiente de cultivo, relacionado con el tipo de cobertura del suelo.

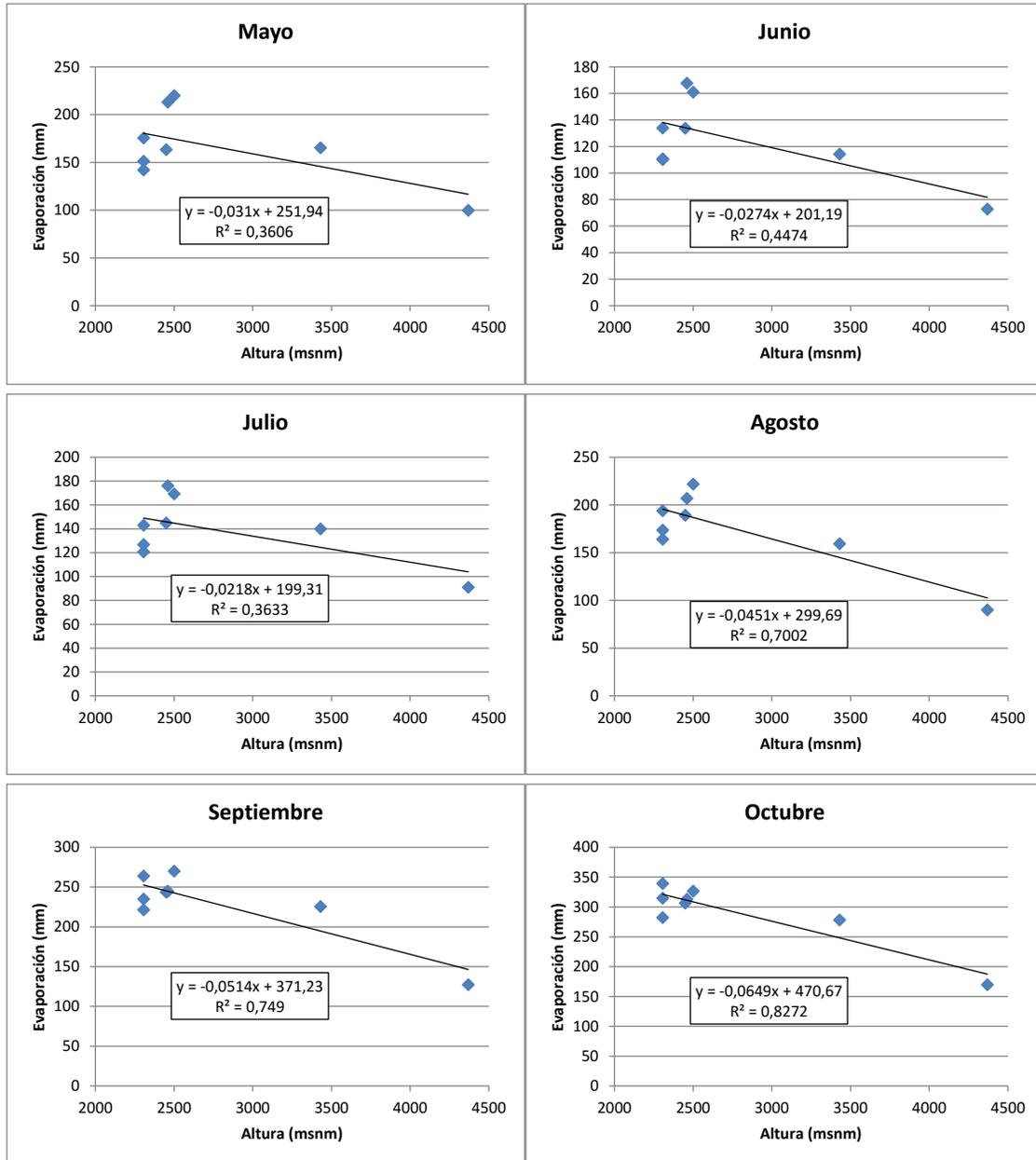
Para asignar la evaporación de referencia se siguió el mismo procedimiento utilizado respecto de las precipitaciones, determinando un gradiente de altura mensual utilizando las estaciones con registros de evaporación mencionadas en la Tabla 6-5 (Evaporación de tanque media mensual) obteniendo los gradientes que se presentan en la Figura 9-35. De esta manera, la ET<sub>0</sub> de cada superficie con cobertura vegetal quedó determinada mensualmente de acuerdo a la cota a la que ésta se encuentra.

**Figura 9-35 Gradientes mensuales de evaporación**



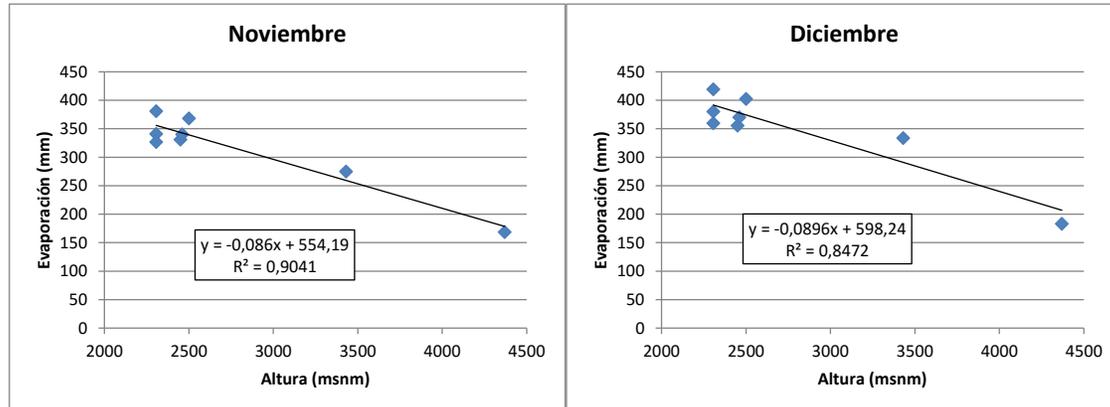
Fuente: Elaboración propia

**Figura 9-35 Gradientes mensuales de evaporación (Cont.)**



Fuente: Elaboración propia

**Figura 9-35 Gradientes mensuales de evaporación (Cont.)**



Fuente: Elaboración propia

Todos los ajustes mensuales muestran coeficientes de correlación mayores a 0,65, excepto 3 meses: Mayo, Junio y Julio. Lo anterior se explica porque en las estaciones ubicadas a elevaciones similares, en torno a los 2.500 msnm, se registran distintos valores de evaporación, lo que provoca una disminución en el valor de las correlaciones. No obstante lo anterior, existe una correcta relación lineal con las estaciones ubicadas a mayores cotas, observándose una disminución de la evaporación con la altura. Considerando que el objetivo de los gradientes es cuantificar la variación de la evaporación en función de la altura, se estima que los gradientes calculados son representativos de dicha relación.

Finalmente, los coeficientes de cultivo fueron asignados dependiendo del tipo de cobertura. De acuerdo al estudio “Análisis de Requerimientos Hídricos de Vegas y Bofedales en el Norte de Chile”, de Salazar et al. (1999), son considerados los siguientes valores (ver Tabla 9-5) que siguen una distribución mensual recomendados para el coeficiente de cultivo en vegas y bofedales.

**Tabla 9-5 Coeficientes de cultivo, kc**

Tipo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Vega	0,63	0,63	0,63	0,56	0,41	0,41	0,41	0,56	0,56	0,56	0,63	0,63
Bofedal	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Fuente: Elaboración propia (extraído de Salazar et al., 1999)

Para los terrenos cultivados se adoptó un  $k_c$  de 0,95, considerando que entre el 80 y 90% de las áreas se encuentra cubierto por praderas naturales o artificiales, las que tienen relacionado un coeficiente de 0,95. El resto de la superficie muestra predominancia de trigo, ajo, habas y huertos caseros, los que tienen asociados coeficientes de cultivo levemente inferiores a 0,95 (DGA 2007)<sup>11</sup>.

<sup>11</sup> “Estimaciones de Demanda de Agua y Proyecciones Futuras. Zona I Norte. Regiones I a IV”. SIT N°122, DGA Enero 2007.

	<b>ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL          PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL          SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL          SALAR DE ATACAMA</b>	
	<b>ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO          NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA</b>	

Para las zonas de forestaciones, se utilizaron valores característicos para vegetación en terrenos áridos, adoptándose un valor de 0,3, según los presentados en la Tabla 9-6.

**Tabla 9-6 Coeficiente de Cultivo según Plantación**

Tipo de Planta	Coefficiente tipo
Planta de zona árida (xerófilas)	0,2 – 0,3
Cítricos y frutales	0,3 – 0,7
Arbustos ornamentales	0,7 – 0,8
Bancales de flores	0,8 – 1,0
Césped	1

Fuente: Derivado de FAO 56: Evapotranspiración del cultivo, 2006

De esta forma, la evapotranspiración para cada elemento identificado se obtiene como el producto de la evaporación de referencia correspondiente a la banda de altura en la que se encuentra, con los coeficientes  $k_{ev}$  y  $k_c$  para cada mes.

En la Tabla 9-7 se entregan los resultados de evapotranspiración para cada subcuenca aportante, así como la evaporación de la laguna situada a 4.650 msnm en la subcuenca 4.

**Tabla 9-7 Evaporación en Subcuencas Aportantes**

Subcuenca	EV Lagunas (m <sup>3</sup> /s)	EVT Cultivos (m <sup>3</sup> /s)	EVT Vegas (m <sup>3</sup> /s)	EVT Bofedales (m <sup>3</sup> /s)	EVT Forestaciones (m <sup>3</sup> /s)	EVT Total (m <sup>3</sup> /s)
1	0	0,03	0,01	0,03	0	0,07
2	0	0	0	0,12	0	0,12
3	0	0,01	0	0	0	0,01
4	0,005	0,03	0,02	0,14	0,08	0,27
5	0	0	0	0,05	0	0,05
6	0	0,01	0,01	0,01	0	0,03
7	0	0,05	0,01	0,01	0	0,07
8	0	0,01	0	0	0	0,01
9	0	0,01	0,01	0	0	0,02
10a	0	0	0	0	0	0
10b	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

Subcuenca	EV Lagunas (m <sup>3</sup> /s)	EVT Cultivos (m <sup>3</sup> /s)	EVT Vegas (m <sup>3</sup> /s)	EVT Bofedales (m <sup>3</sup> /s)	EVT Forestaciones (m <sup>3</sup> /s)	EVT Total (m <sup>3</sup> /s)
14	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0

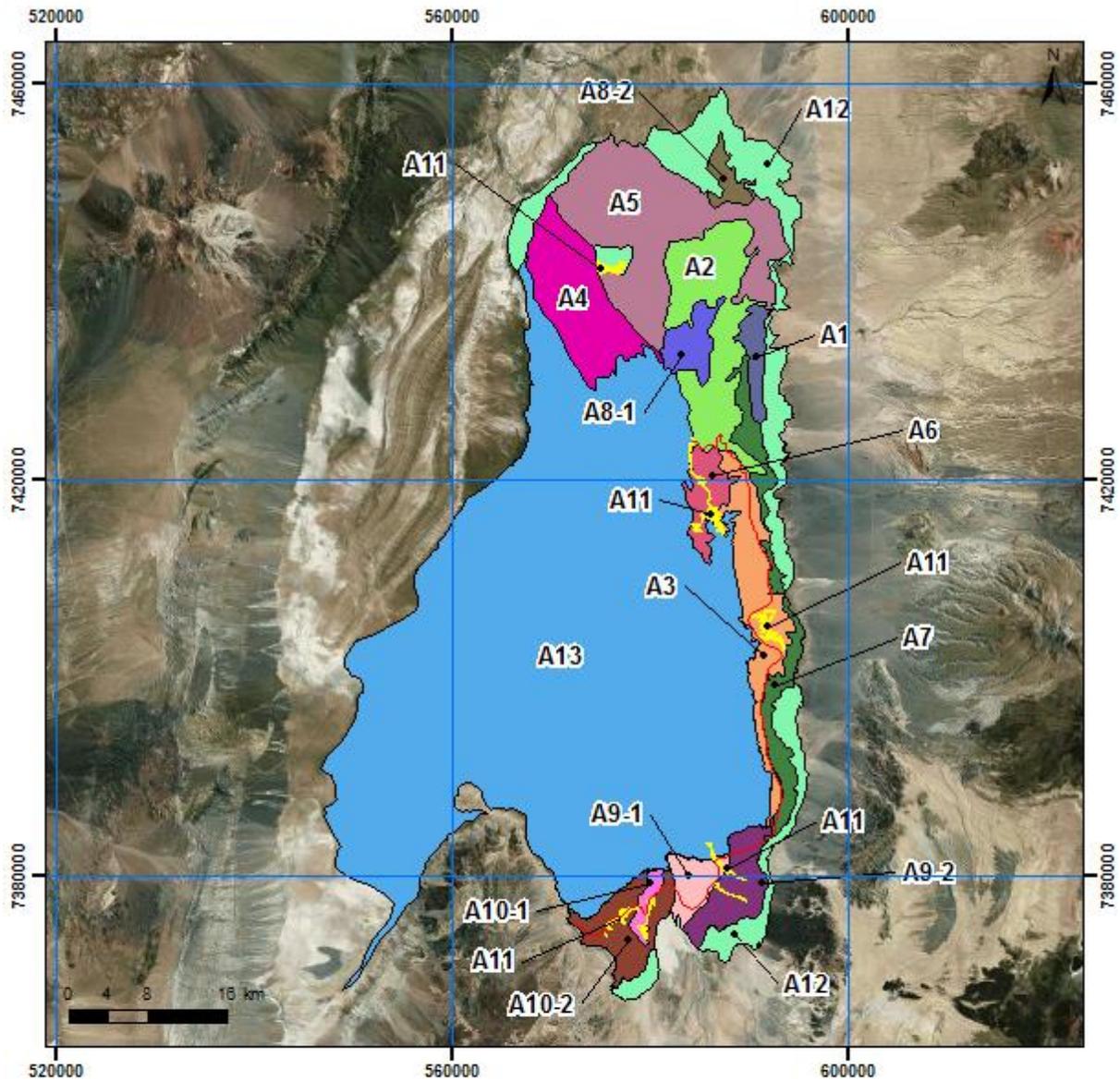
Fuente: Elaboración propia

- Evaporación en las subcuencas Núcleo y Zona Marginal

La evapotranspiración en el Núcleo (17) y Zona Marginal (16N, 16E-ac, 16E-int) se determinó utilizando las mediciones con domos que Rockwood ha llevado a cabo en el marco de esta evaluación ambiental, cuyos resultados se presentan en el Capítulo 6. Hidrología. El detalle de las 7 campañas de terreno realizadas entre 2013 y 2014, la metodología utilizada y la forma de cálculo se presentan en el Apéndice J. Evaporación, de este Anexo.

En resumen, utilizando como base la zonificación del Salar de Atacama realizada por Mardones, 1986 (Figura 9-36), se midieron en 23 puntos las tasas evapotranspirativas representativas de los niveles freáticos existentes al momento de las mediciones. Con dicha información, se establecieron las curvas que relacionan tasa de evaporación y profundidad del nivel freático en cada zona, tanto para el agua salobre como para la salmuera. Esto porque la diferencia de densidad de ambos fluidos hace que para una misma profundidad del nivel, éstos presenten una capacidad de evapotranspiración distinta, y que debe considerarse en el cálculo de evaporación del Núcleo y Zona Marginal.

**Figura 9-36 Zonas de evapotranspiración para el Núcleo y la Zona Marginal, definidas por Mardones, 1986 y actualizadas por el Titular**



**Leyenda**

**Zonas de Evaporación**

A1	A5	A8-2	A10-2	Interfase Salina
A2	A6	A9-1	A11	
A3	A7	A9-2	A12	
A4	A8-1	A10-1	A13	

Fuente: Elaboración propia

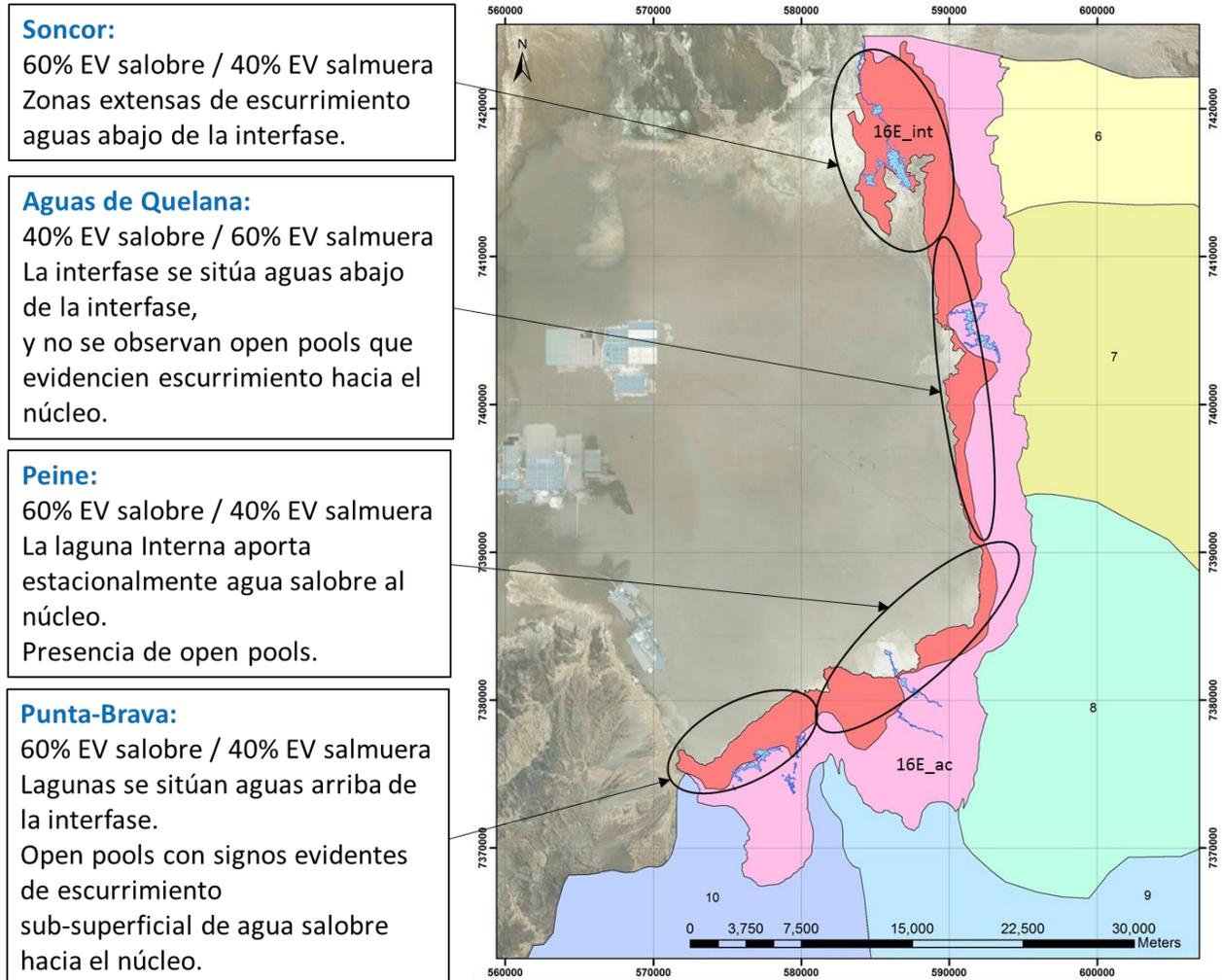
	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

Tal y como se describe en el punto 9.1.1, la Zona Marginal Intermedia recibe sub-superficialmente un flujo de agua salobre procedente de la Zona Marginal Acuífero que sobrepasa la interfase. En este estudio se observó que en la Zona Marginal Intermedia asociada a los sistemas lagunares de la Punta-la Brava, Peine y Soncor el desarrollo de “open pools”, o de desbordamiento por encima de la interfase, es bastante generalizado, por lo que el porcentaje de evaporación procedente de aguas salobres se ha estimado en un 60%, y de salmuera del 40%,

Sin embargo, en la zona próxima al sistema de Aguas de Quelana no se observó con tanta claridad el fenómeno de generación de “open pools”, indicando que el flujo que sobrepasa la interfase en esta zona es menor. De esta manera, para esta zona se ha estimado, que un 40% de agua que evapora procede del acuífero salobre y un 60% de la salmuera.

A modo de resumen, en la Figura 9-37 se muestran los sectores analizados y la justificación de la adopción de la relación de evaporación de salmuera versus agua salobre correspondiente a 40-60% o viceversa.

**Figura 9-37 Estimación de tipo de agua evaporada en la Zona Marginal Intermedia**



Fuente: Elaboración propia

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

Teniendo estas consideraciones en cuenta, en la Tabla 9-8 y en la Tabla 9-9 se presenta un resumen de los resultados obtenidos.

**Tabla 9-8 Flujos de evapotranspiración promedio anual en el Salar de Atacama**

Zona Mardones	Flujo (L/s)		
	Zona Marginal Acuífero	Zona Marginal Intermedia	Total
A1	95,4		95,4
A2	16,3		17,1
A3	18,6	0,7	52,8
A4	802,6	34,2	802,6
A5	625,3		625,3
A6		3,4	3,4
A7	495,0	9,6	504,6
A8-1	32,5		32,5
A8-2	189,1		189,1
A9-1	53,8	46,1	99,9
A9-2	52,1	21,9	74,0
A10-1	45,3	11,5	56,8
A10-2	381,8	49,1	430,9
A11 (lagunas)			704,7
A12	777,8		777,8
A13 (núcleo)			1.117,7
<b>TOTAL</b>	<b>3.585,7</b>	<b>176,5</b>	<b>5.584,6</b>

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 9-9 Desglose de flujos de evapotranspiración promedio anual en la zona A11 (lagunas)**

Sistema lagunar	Área (km <sup>2</sup> )	Flujo de evaporación (L/s)
Tebinquiche	2,32	183,9
Soncor	2,98	197,7
Aguas de Quelana	1,79	142,1
Peine	0,85	67,6
La Punta – La Brava	1,43	113,4
<b>Total</b>	<b>9,37</b>	<b>704,7</b>

Fuente: Elaboración propia

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

### 9.2.4.3 Infiltración

El porcentaje de precipitación que infiltra hacia los acuíferos en las subcuencas aportantes se calculó a partir de la aplicación de un coeficiente de infiltración. Para definir este coeficiente, se consultaron los siguientes estudios llevados a cabo tanto en climas áridos a nivel global, como localmente en la Región de Atacama:

- Bazuhair and Wood, 1996. “*Chloride mass balance method for estimating ground water recharge in arid areas: examples from western Saudi Arabia*”.  
En este estudio los autores aplicaron el método de balance de masas de cloruros (CMB) a pequeños acuíferos en Arabia Saudita. Se concluyó que, mayormente, entre un 2 y 4% de la precipitación se convierte en recarga al acuífero. En dicho estudio además se citan antecedentes que entregan valores de recarga en regiones hidrológicamente similares, los que fluctúan entre un 1 y 4% de la precipitación.
- Scanlon et al., 2006. “*Global synthesis of groundwater recharge in semiarid and arid regions*”.  
Este estudio obtuvo que entre un 0,1 a 5% de la precipitación en zonas áridas y semi áridas se transforma en recarga al acuífero. Dicho porcentaje fue definido mediante la compilación de aproximadamente 140 estudios de cálculo de recarga en regiones áridas y semi áridas, ubicadas principalmente en América del Norte, África, China y Australia. El principal método utilizado para la determinación de la recarga corresponde al CMB. La aplicación de dicha metodología se considera adecuada, a pesar que en los sectores de interés suele existir información limitada de las concentraciones de cloruros, tanto espacial como temporalmente.
- Houston, 2007. “*Recharge to groundwater in the Turi Basin, northern Chile: An evaluation based on tritium and chloride mass balance techniques*”.  
Este estudio fue realizado en Chile en la cuenca de Turi, ubicada aproximadamente a 70 km al este de Calama, y cerca de 80 km al norte del Salar de Atacama. En éste se obtuvo una recarga variable con la altura, desde casi un 1% a una cota de 2.500 m.s.n.m., hasta alcanzar un 10% a los 4.500 m.s.n.m. La variación en el porcentaje de infiltración a mayores elevaciones vendría dada por las precipitaciones más intensas y de mayor duración, menor evaporación, y suelos con mayores capacidades de infiltración en las cotas más altas. Dada la cercanía al área de estudio, se considera un antecedente representativo de las condiciones que podrían darse en las subcuenca aportante al Salar de Atacama.
- University of Massachusetts-Amherst (UAA-Rockwood, 2015). “*Using the chloride mass balance method to estimate recharge*”.  
En este trabajo se aplicó el CMB en distintos puntos del sector oriente de la cuenca aportante al Salar de Atacama. Se determinó que el porcentaje de precipitación que se transforma en recarga varía entre 0,5 y 4%. Dichos resultados son consistentes con los porcentajes de infiltración típicos en zonas áridas, según Scanlon et al, 2006.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

Esta revisión de antecedentes, confirmó que el método del cálculo del balance de masas de cloruros (CMB) ha sido utilizado tanto para estimar la infiltración en la zona no saturada (Allison y Hughes, 1978), como para estimar la recarga en la zona saturada. Dettinger (1989) la ocupó exitosamente para estimar la infiltración en zonas áridas, así como también Houston (2007), quién utilizó esta técnica en el norte de Chile.

En este estudio, la forma de cálculo de este coeficiente ha sido distinta para las subcuencas del Este, Norte y Sur, respecto a las del Oeste y Sur Oeste.

### **Subcuencas Oeste y Sur Oeste (10b, 11, 12, 13, 14, 15):**

Para las subcuencas aportantes ubicadas al poniente y sur poniente (10b a 15) del Salar de Atacama se utilizó un coeficiente de infiltración fijo para todas las subcuencas. Esto se debe a que en este sector la cuenca hidrogeológica se supone que presenta una mayor coincidencia con la cuenca hidrológica. Además, en esta zona del balance (Núcleo y Zona Marginal Intermedia) el flujo que entra desde el Norte es también una variable desconocida, que se decidió dejar como la variable libre de la ecuación de balance.

Por esta razón Rockwood decidió replicar el cálculo del balance de masas de cloruros para asignar un coeficiente de infiltración a las subcuencas del poniente y sur poniente del Salar de Atacama.

El método se basa en considerar el agua de lluvia como la única fuente de cloruro, descartando toda aquella que tenga origen volcánico o por disolución de minerales evaporíticos (Custodio y Llamas, 2001; Houston, 2007). La característica principal del ión cloruro es que es muy estable en disolución y difícil de precipitar, además no se oxida ni se reduce en aguas naturales (Custodio y Llamas, 2001), lo que le da un carácter de trazador ideal. Una vez que el agua de lluvia llega al terreno, durante la infiltración el agua se evapora y concentra este ión, el que posteriormente es incorporado al acuífero.

Para conocer esta relación entre el contenido del ión cloruro en la lluvia con respecto al contenido de cloruro que transporta la recarga al acuífero es necesario conocer la aportación media de cloruro del agua lluvia ( $C_p$ ), valores de escorrentía ( $E$ ) y la precipitación media ( $P$ ). Según Custodio y Llamas (2001) la relación es la siguiente:

$$R \cdot Cl_r = P \cdot Cl_p - E \cdot C_e + A_s - A_v + A_v'$$

Donde:

R	Recarga (mm/año)
P	Precipitación media (mm/año)
E	Escorrentía superficial media (mm/año)
$Cl_p$	Contenido medio de Cl en las precipitaciones (mg/L)
$Cl_r$	Contenido medio de Cl en la recarga (mg/L)

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

- Ce      Contenido medio de Cl en la escorrentía (mg/L)  
As      Aporte de Cl tomado del suelo o aportados artificialmente (g/m<sup>2</sup>·año)  
Av      Retención de Cl tomado por la vegetación (g/m<sup>2</sup>·año)  
Av'     Devolución de Cl del suelo al morir la vegetación (g/m<sup>2</sup>·año)

El balance de cloruro se realiza suponiendo que el aporte de cloruros tomados en el suelo o aportados de forma artificial es nulo y que la retención de cloruros por la vegetación es igual a la liberación de los mismos al morir dicha vegetación. A estas suposiciones se deben agregar, además, que los valores de escorrentía superficial son prácticamente nulos. Por lo tanto, se obtiene que:

$$R \cdot Cl_r = P \cdot Cl_p$$

La concentración de cloruro en las precipitaciones (Cl<sub>p</sub>) se ha tomado de los estudios más recientes realizados por la Universidad de Massachusetts-Amherst (UMA) durante el 2013 (UAA-Rockwood, 2015), en los cuales las aguas de lluvia recolectadas en la cuenca presentaron valores entre 8,1 y 9,6 mg/L. Otros estudios también mencionan valores del orden de magnitud, como menores a 10 mg/L (Cervetto, 2012), o de 6 mg/L (Houston, 2007).

Para efectos de cálculo de la recarga, se considera que las precipitaciones en el Salar tienen una concentración de cloruro en torno a 8 mg/L (UAA-Rockwood, 2015).

Respecto a las precipitaciones, se tomaron los valores de precipitación media anual analizados en el Capítulo 6 y que se presentan en la Figura 6-4, que muestra valores de isoyetas hasta aproximadamente 30 mm/año en el sector poniente y de aproximadamente 100 mm/año en el borde oriental con algunos sectores con valores superiores.

Para la concentración de cloruro en la recarga (Cl<sub>r</sub>) se han seleccionado los manantiales más cercanos a las cimas de los cordones montañosos, como los más representativos de este proceso. Todas estas muestras representan parte del borde oriental y sector sur de Tilopozo. En la Tabla 9-10 se presentan los puntos que se han utilizado para el cálculo, que corresponden a Quebrada Camar, Mullay, y dos piezómetros ubicados en el callejón Tilopozo (TE-8 y TM-6). También se incluyen los resultados de la recarga obtenidos de la aplicación del balance de cloruros, y por lo tanto también el porcentaje de infiltración que ésta significa, los que varían entre un 3% y 5,3% de la precipitación.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

**Tabla 9-10 Cálculo de las tasas de recarga y porcentaje de infiltración según Balance de cloruros**

Sector	Punto	Tipo de punto	Fecha	Altitud (msnm)	Clr (mg/l)	Pp mm/año	Cip (mg/L) estimado	Recarga mm/año	% Infiltración	Promedio % Infiltración	Fuente
Borde Este	Mullay 1	piezómetro	27/09/2007	2405	267	100	8	3.0	3.0		
Borde Este	Qda. Camar	cauce	12/02/2013	2729	205	100	8	3.9	3.9	3.5	
Borde Este	Fuente Cas	vertiente	24/03/2013	2576	227	60	8	2.1	3.5		Rockwood
Tilopozo	TE-8	piezómetro	21/02/2013	2417	150	40	8	2.1	5.3	4.3	
Tilopozo	TM-6	piezómetro	21/02/2013	2417	250	40	8	1.3	3.2		UAA- Rockwook (2015)
*** Tilopozo	TM-6	piezómetro	01/12/2013	2423	198	39	8	1.6	4.0		

\*\*\* Balance realizado en el estudio UAA-Rockwood, 2015

Los valores de la tabla entregan, para el sector nororiental del Salar (Borde Este), un porcentaje promedio de infiltración de 3,5%, y para el sector Sur (Tilopozo) de la cuenca de 4,3%, que son resultados consistentes con estudios anteriores (UAA-Rockwood, 2015) y con valores de recarga en ambientes áridos y semi-áridos (Scanlon et al, 2006). En general, el porcentaje de infiltración en el sector oriental de la cuenca, incluyendo los balances realizados en el Borde Este y Sur es de 4,1%.

A partir de estos resultados que se han podido calcular para el Borde Este y Sur de la cuenca, y dada su cercanía y similitud con el sector poniente y sur poniente de la cuenca, se decidió adoptar el porcentaje de infiltración obtenido en el sector sur, de un 4%, para las subcuencas del Oeste y Suroeste de la cuenca, las 10b, 11, 12, 13, 14 y 15.

#### **Subcuencas Norte, Este y Sur (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10a):**

Para las subcuencas aportantes del borde Norte, Este y Sur de la cuenca (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10a) el coeficiente de infiltración se estima para hacer coherentes el monto de la recarga hidrológica con los montos estimados de evaporación.

Tal y como se mencionó y demostró anteriormente, el coeficiente de infiltración real en este tipo de terreno y clima se sitúa en torno al 4%. Sin embargo, al cerrar el balance los coeficientes de infiltración obtenidos son sensiblemente mayores, siendo entre un 9% y un 34%, tal como se muestra en la Tabla 9-21. Esto puede explicarse porque la extensión de la cuenca hidrogeológica, hacia el Norte, Este y Sur, es mayor que la cuenca hidrológica de aporte superficial definida en este estudio, lo cual es expresado también en el Informe Técnico SDT N°339 sobre la oferta de recursos hídricos en el Salar de Atacama (DGA, 2013). Por lo tanto estos coeficientes consideran los flujos subterráneos de la cuenca hidrogeológica y no solamente hidrológica, e incluso flujos regionales, profundos, entre cuencas adyacentes si los hubiere.

Cabe mencionar que el estudio de la DGA mencionado realiza un cálculo de la recarga al Salar haciendo referencia a valores comprendidos entre 7% y el 25% en las subcuencas (A, B, C) situadas en el Norte,

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

Este y Sur de la Cuenca, similares a los determinados en este estudio, mientras que en el Oeste (N) el valor obtenido es del 3%, también muy similar.

#### 9.2.4.4 Volumen almacenado

Para definir la condición inicial en el balance hídrico que permita estimar el flujo subterráneo entre cuencas, se procedió a calcular el volumen de agua subterránea almacenada que regula el flujo subterráneo que recarga la Zona Marginal y el Núcleo, utilizándose en cada subcuenca, la siguiente expresión:

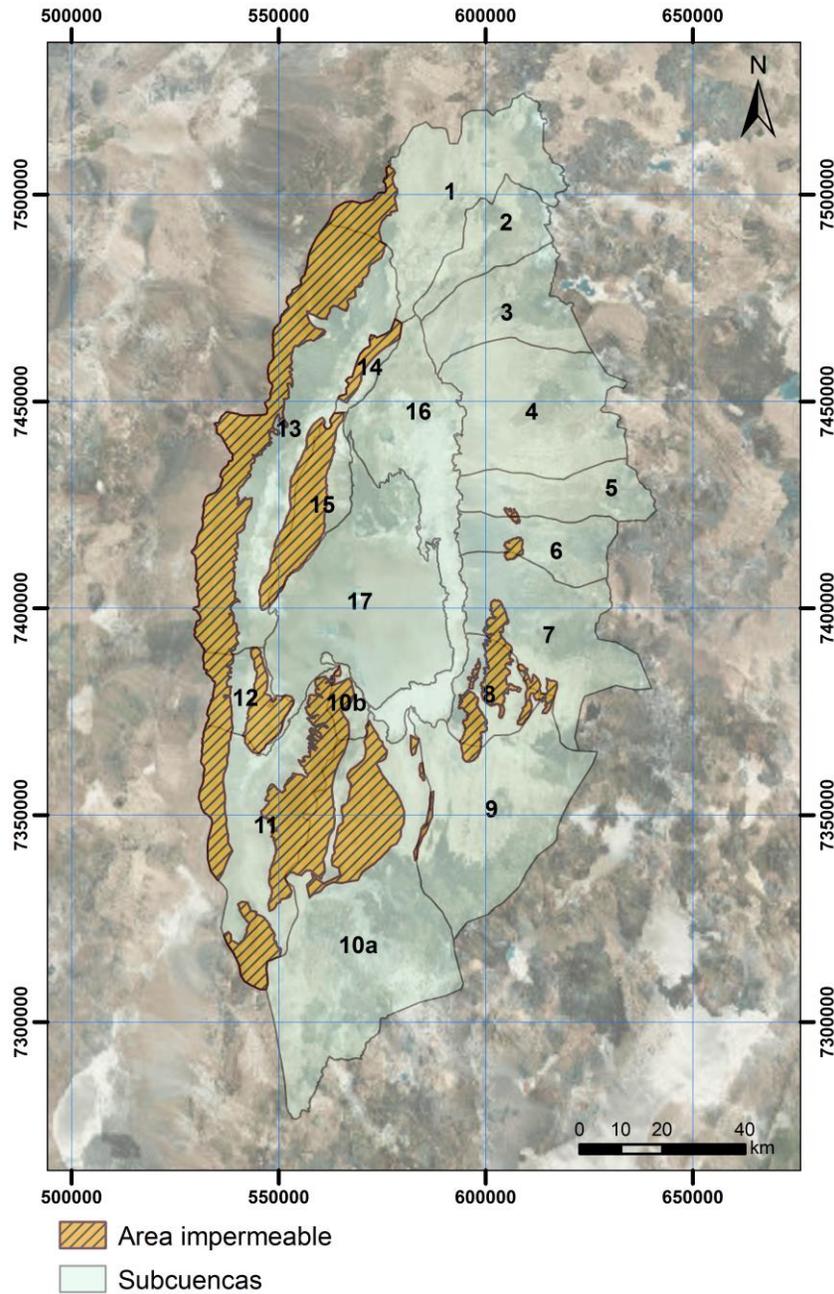
$$V = A_p \cdot E_s \cdot S$$

Dónde:

- V Volumen almacenado (km<sup>3</sup>).
- A<sub>p</sub> Superficie ocupada por materiales permeables de cada subcuenca (km<sup>2</sup>).
- E<sub>s</sub> Espesor saturado (km).
- S Coeficiente de almacenamiento.

La superficie ocupada por materiales permeables se determinó restando en cada subcuenca el área ocupada por rocas impermeables, En la Figura 9-38, se puede observar la superficie ocupada por materiales impermeables dentro de cada subcuenca.

**Figura 9-38 Delimitación de la superficie permeable en cada subcuenca**



Fuente: Elaboración propia

Esta Figura 9-38 fue elaborada teniendo en cuenta sobre todo la cartografía geológica disponible a escala 1:250.000 de la Hoja de Toconao (Ramírez y Gardeweg, 1982). Fuera de los límites de Hoja, se utilizó la cartografía a escala 1:1.000.000 del Sernageomin (2003), completándose las observaciones con las imágenes satelitales disponibles (Google Earth y Basemap de ArcGIS).

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

Respecto al espesor saturado y al coeficiente de almacenamiento, para su determinación se consultaron los antecedentes disponibles, siendo los principales Dalannais (1979) y el Estudio de Impacto Ambiental de MEL (1996). En dichos estudios se asignaron coeficientes de almacenamiento en el acuífero aluvial del Borde Este y en el acuífero de Monturaqui, respectivamente.

En la Tabla 9-11 se presentan los valores adoptados en dichos estudios. También se presentan antecedentes para el espesor saturado, los que se entregan en la Tabla 9-12.

**Tabla 9-11 Antecedentes de coeficientes de almacenamiento**

	Acuífero confinado	Acuífero Libre
<b>Dalannais (1979)</b>	1,4.10 <sup>-3</sup>	14%
<b>MEL (1996)</b>	1.10 <sup>-4</sup>	10%

Fuente: Elaboración propia, extraído de los antecedentes

**Tabla 9-12 Antecedentes de coeficientes de almacenamiento**

	Espesor saturado (m)
<b>MEL (1996)</b>	160 (acuífero Negrillar) 450 (acuífero Monturaqui)
<b>Dalannais (1979)</b>	40-100

Fuente: Elaboración propia, extraído de los antecedentes

Considerando acuíferos aluviales con comportamiento libre, se asignaron valores del 5% para el coeficiente de almacenamiento y de 150 m de espesor saturado, valores que se estiman razonables y adecuados para los objetivos del balance, y que además están dentro de los rangos que manejan las fuentes bibliográficas anteriormente citadas.

Finalmente, en la Tabla 9-13 se presentan los volúmenes estimados para cada subcuenca, los cuales serán utilizados para calcular el flujo subterráneo que alcanza el Núcleo y la Zona Marginal.

**Tabla 9-13 Volúmenes almacenados subcuencas**

Subcuenca	Área permeable (Km <sup>2</sup> )	Vol. Almacenado (km <sup>3</sup> )
1	1.208,94	9,07
2	439,52	3,30
3	638,71	4,79
4	1.173,72	8,80
5	517,69	3,88
6	435,74	3,27
7	1.000,78	7,51
8	427,32	3,20

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

Subcuenca	Área permeable (Km <sup>2</sup> )	Vol. Almacenado (km <sup>3</sup> )
9	1.438,93	10,79
10a	1.989,77	14,80
10b	47,6	0,12
11	889,41	6,67
12	103,61	0,78
13	1.023,29	7,67
14	51,12	0,38
15	121,68	0,91
16	1.166,66	8,75
17	1.715,11	12,86

Fuente: Elaboración propia

El cálculo de la variación del volumen almacenado en el tiempo se incluye en el punto 9.3.3., considerando que este análisis temporal se utiliza directamente en el cálculo de la recarga mensual.

#### 9.2.4.5 Flujos subterráneos y subsuperficiales

Teniendo en cuenta todos los antecedentes aportados y los análisis que se realizan en esta Adenda, se tiene que la interfase salina, en términos de flujos, produce una desconexión hidráulica para las aguas subterráneas. Por lo anterior, es que no se considera la existencia de flujo de agua subterránea desde la Zona Marginal Acuífero hacia la Zona Marginal Intermedia. Sin embargo, tal y como se ha descrito en el modelo conceptual (punto 9.1.1) sí existe un flujo superficial y sub-superficial que sobrepasa la interfase y que es necesario cuantificar como uno de los componentes del balance hídrico que será incorporado en el modelo numérico.

A continuación se expone la metodología en la que se basa dicha cuantificación, separando por un lado el flujo que atraviesa la interfase a través de los sistemas lagunares de Soncor y de Peine (ya que en los otros Sistemas no se produce este fenómeno), y por otro lado el flujo que sobrepasa la interfase a lo largo de toda la Zona Marginal.

Posteriormente se describe el flujo subterráneo que ingresa al área del modelo desde la zona Norte, procedente de la subcuenca 16N.

- Flujo que sobrepasa la interfase a través de los sistemas lagunares

El flujo subsuperficial que “desborda” o sobrepasa la interfase a través de los canales de los sistemas lagunares, representa uno de los elementos del balance hídrico que se explican a partir de la existencia de la interfase salina y del funcionamiento de las lagunas.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

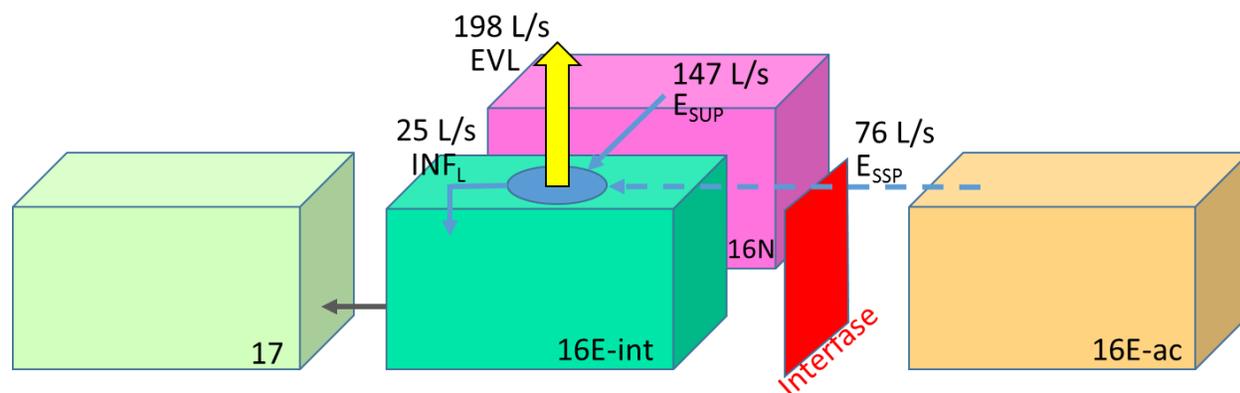
Tal como se menciona en el Apéndice I, sólo en los sistemas lagunares de Soncor y Peine se produce este fenómeno, cuyos resultados se resumen a continuación para ser considerados en el balance general de la cuenca.

En el caso de Soncor, cuyo detalle se encuentra en el punto 8.6.3.1. Balance hídrico promedio, del Apéndice I antes mencionado, las lagunas, si bien se sitúan en la Zona Marginal Intermedia, éstas se alimentan de aguas del canal de Burro Muerto y otros desbordamientos que provienen de la Zona Marginal Acuífero.

Según se muestra en el esquema de la Figura 9-39, el sistema lagunar recibe un flujo promedio anual de 147 L/s por el canal de Burro Muerto (datos de aforo en el Puente San Luis obtenidos de PSAH N°14 de SQM) y un flujo de 76 L/s que sobrepasa sub-superficialmente la interfase y cuyo valor se ha obtenido del resultado del balance del sistema.

Para este cálculo se ha considerado la evaporación promedio que se produce desde la superficie de las lagunas, de 198 L/s, calculada a través de la superficie lagunar promedio de este sistema (punto 8.3.3.4. Superficie promedio del sistema, del Apéndice I) y la tasa de evaporación medida mediante domos en las lagunas (ver punto 6.4.3). Asimismo, se ha considerado que, como resultado de estas entradas promedio, un flujo de 25 L/s se incorpora al acuífero de salmuera. Este valor proviene del balance publicado por Salas et. al. 2010, para el mes de noviembre de 2008, el cual se puede considerar un mes promedio del año y cuyo balance es el más completo que se ha publicado hasta la fecha en la zona.

**Figura 9-39. Esquema del flujo que sobrepasa la interfase en las lagunas de Soncor**

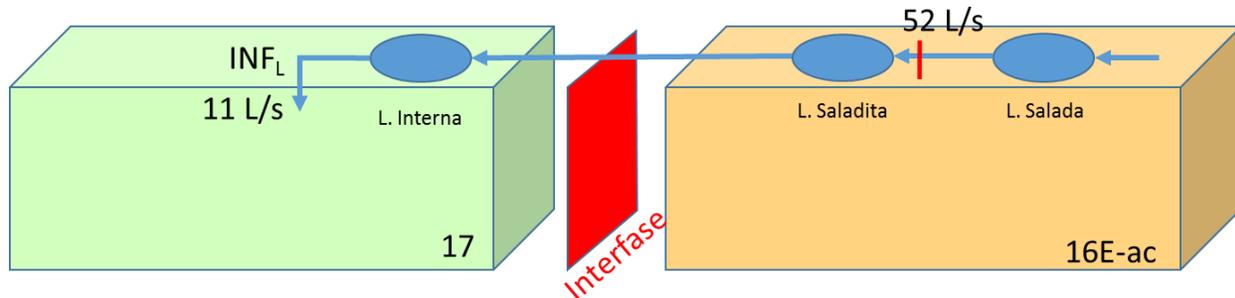


Elaboración propia

En el caso del sistema lagunar de Peine, el detalle de su balance hídrico se encuentra en el punto 6.7.3.1. Balance hídrico promedio, del mismo Apéndice I. La siguiente Figura 9-40, resume esquemáticamente los datos considerados y el resultado obtenido.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

**Figura 9-40. Esquema del flujo que sobrepasa la interfase en las lagunas de Peine**



Elaboración propia

En el caso del sistema Peine, dada la similitud con el Sistema Soncor, para estimar el caudal promedio que se infiltra al núcleo se asimila en términos de comportamiento la laguna Barros Negros a la laguna Saladita, y que Cola de Pez, sería equivalente a la laguna Interna.

Teniendo en cuenta el balance hídrico publicado en Salas et al, 2010, se ha analizado la relación entre los caudales de entrada de Barros Negros ( $120 \text{ L/s} = \text{Entrada Norte } 70\text{L/s} + \text{Entrada Sur } 50\text{L/s}$ ) y la salida de Cola de Pez ( $25 \text{ L/s}$ ), obteniéndose un factor de infiltración del 21%. Según la serie de caudales histórica, reportada por SQM, el caudal promedio histórico, para la entrada de la laguna Saladita es de  $52 \text{ L/s}$ . Aplicando el factor del 21% obtenido en el sistema Soncor, a la entrada a Saladita, resulta que la infiltración al núcleo desde la laguna Interna sería de  $11 \text{ L/s}$ .

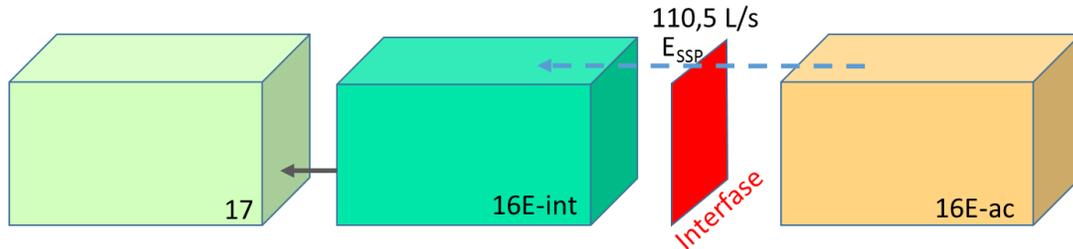
Este flujo sobrepasa superficialmente la interfase a través de los canales que comunican la laguna Saladita con la laguna Interna y no se evapora, incorporándose como salmuera al Núcleo, tal como se muestra en la Figura 9-37.

- Flujo que sobrepasa la interfase a través de la Zona Marginal

Atendiendo a lo expuesto en el punto 9.2.4.2 Evaporación en las subcuencas Núcleo y Zona Marginal del presente capítulo, en el que se explica el funcionamiento de la interfase y la evaporación en la Zona Marginal, se ha elaborado la Figura 9-41, donde se muestra esquemáticamente el flujo que sobrepasa la interfase de manera sub-superficial y que es evaporado en la Zona Marginal Intermedia y cuyo valor ha sido estimado en  $110,5 \text{ L/s}$ .

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

**Figura 9-41. Esquema del flujo que sobrepasa la interfase en la Zona Marginal**



Elaboración propia

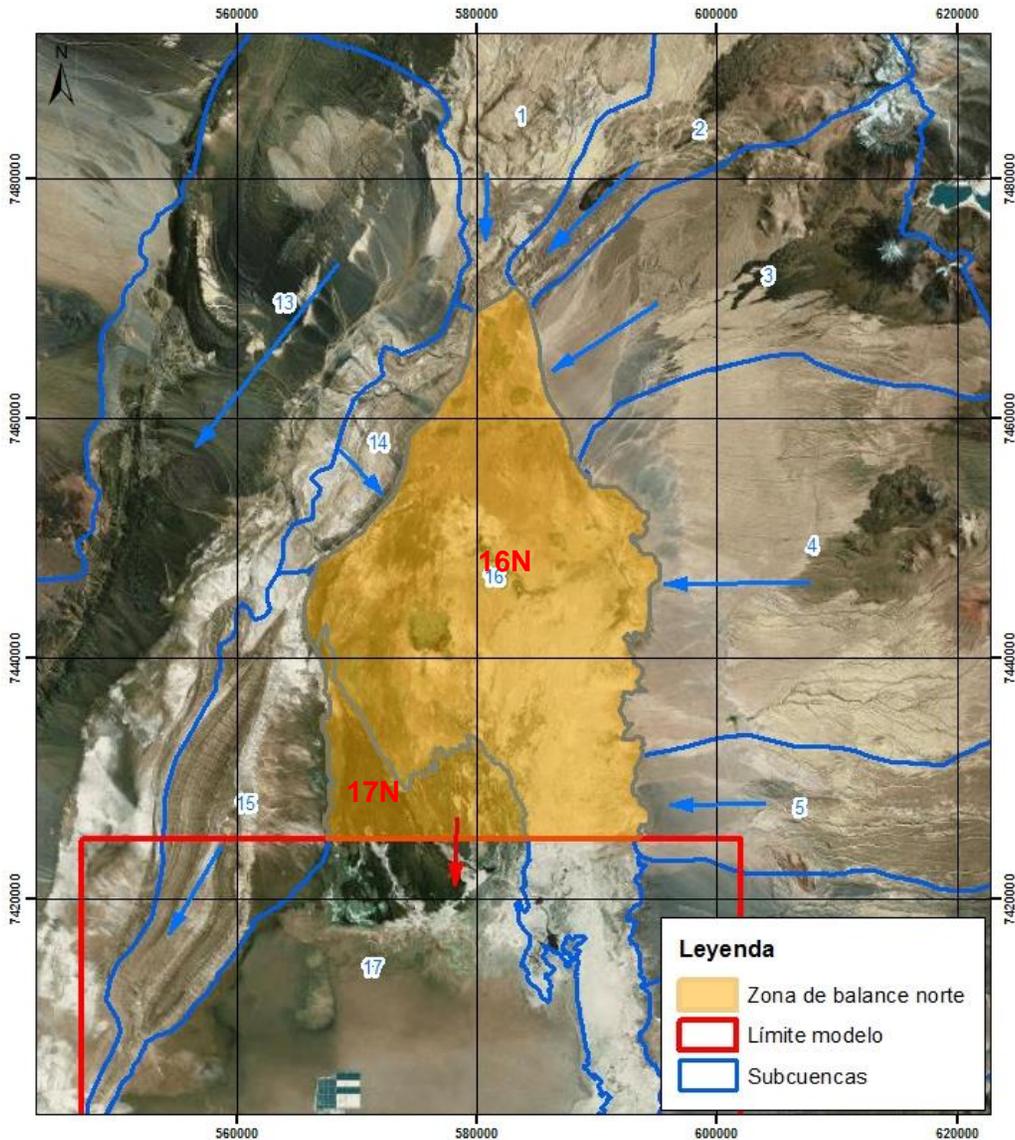
En el cálculo de este flujo se han tenido en cuenta las áreas de evaporación (definidas por Mardones) y ajustadas por Rockwood, así como las tasas de evaporación obtenidas con las mediciones realizadas con domos (ROCKWOOD para esta Adenda), coeficientes de reducción por salinidad y una relación estimada para el agua que evapora en la Zona Marginal Intermedia procedente de la Zona Marginal Acuífero. Una descripción más detallada de este fenómeno se muestra en el punto 9.1.1 del presente capítulo, en tanto que la justificación de la adopción de los distintos valores de dicha relación por cada sector de la Zona Marginal se detalla en el punto 9.2.4.2.

En total, estos tres flujos (110,5+11+25 L/s) suman 146,5 L/s, los cuales han sido incorporados en el balance hídrico, tanto en el realizado en la cuenca, como en el realizado en el área del modelo, bajo el concepto de “Flujo neto que sobrepasa la interfase”.

- Flujo desde el Norte

Para definir la condición de borde en el Norte del modelo numérico, se realizó un balance entre las distintas entradas y salidas en dicho sector. Se presenta en la Figura 9-42 el área de balance Norte (área color naranja), y las direcciones de escurrimiento de los flujos subterráneos.

**Figura 9-42 Zona de balance al Norte del límite del modelo numérico**



Fuente: Elaboración propia

El balance en la zona Norte se efectuó considerando la siguiente expresión:

$$\text{ENTRADAS} - \text{SALIDAS} = \text{VARIACIÓN DE ALMACENAMIENTO}$$

$$\Sigma E_{\text{SUB}} + P_{\text{efectiva}} - \text{EVT} - \text{BAD} = \Delta V$$

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

Donde:

- $E_{SUB}$  Suma de los flujos subterráneos de las subcuencas 1, 2, 3, 4, 5 y 14. Las subcuencas 13 y 15 escurren por el poniente, hacia el sur.
- $P_{p\text{efectiva}}$  Precipitación efectiva sobre la zona Norte.
- EVT Evapotranspiración en la zona Norte. Calculada según las zonas evapotranspirativas y las tasas determinadas en el presente estudio, se alcanza un flujo de 2.723 L/s.
- BAD Bombeos de agua dulce en la zona Norte. Se tiene un máximo de 341 L/s al 2013, y de 429 L/s para la situación futura.

Se calculó el balance en la zona Norte para la condición de equilibrio, es decir sin considerar extracciones ni variación de almacenamiento, con el fin de determinar el flujo hacia el área del modelo en régimen permanente.

En la zona 16N, el flujo procedente de las subcuencas aportantes, no es consumido completamente por la demanda evapotranspirativa, por lo que existe un flujo remanente, estimado en la Tabla 9-14, que pasa desde la Zona Marginal Norte (16N) hacia la zona 17N (sector de Núcleo situado al Norte del límite del modelo).

**Tabla 9-14 Cálculo del flujo subterráneo al área del modelo desde subcuencas del Norte**

Subcuenca	Recarga (L/s)	Evaporación ZM (L/s)	Pp efectiva Norte (L/s)	Flujo neto superficial hacia sistema Soncor (L/s)	Flujo neto hacia zona 17N (L/s)
1	1291	2.723	93	147	744
2	399				
3	600				
4	793				
5	436				
14	3				

A continuación, en la Tabla 9-15, se presenta el flujo neto hacia el área de modelación, que se ha obtenido teniendo en cuenta el flujo remanente hacia la zona 17 N anteriormente calculado, la precipitación efectiva y la evaporación en dicha zona.

**Tabla 9-15 Cálculo del flujo subterráneo al área del modelo desde subcuenca 17N**

Subcuenca	Recarga desde 16N(L/s)	Evaporación (L/s)	Pp efectiva (L/s)	Flujo neto hacia modelo (L/s)
17 (norte)	744	85	19	679

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

Para obtener el flujo mensualizado desde el Norte hacia el área de modelación, que se utiliza como input en el modelo numérico durante los períodos de calibración y de simulación, es necesario también determinar el volumen subterráneo embalsado en la zona Norte, que en conjunto con el flujo en régimen de equilibrio permite calcular el coeficiente de embalse ( $\alpha$ ). Los resultados se presentan en la Tabla 9-16.

**Tabla 9-16 Coeficiente de embalse zona Norte**

Volumen almacenado (km <sup>3</sup> )	Flujo subterráneo (L/s)	$\alpha$ (1/s)
1,94	679	$3,5 \cdot 10^{-7}$

Para estimar el volumen almacenado en la zona Norte, se ha considerado un espesor saturado de 150 m y un coeficiente de almacenamiento del 5%. Si bien existen datos bibliográficos que indican que el espesor saturado puede ser mayor (Jordan 2007), se considera que el valor adoptado es adecuado y conservador para la finalidad que se requiere en el balance hídrico.

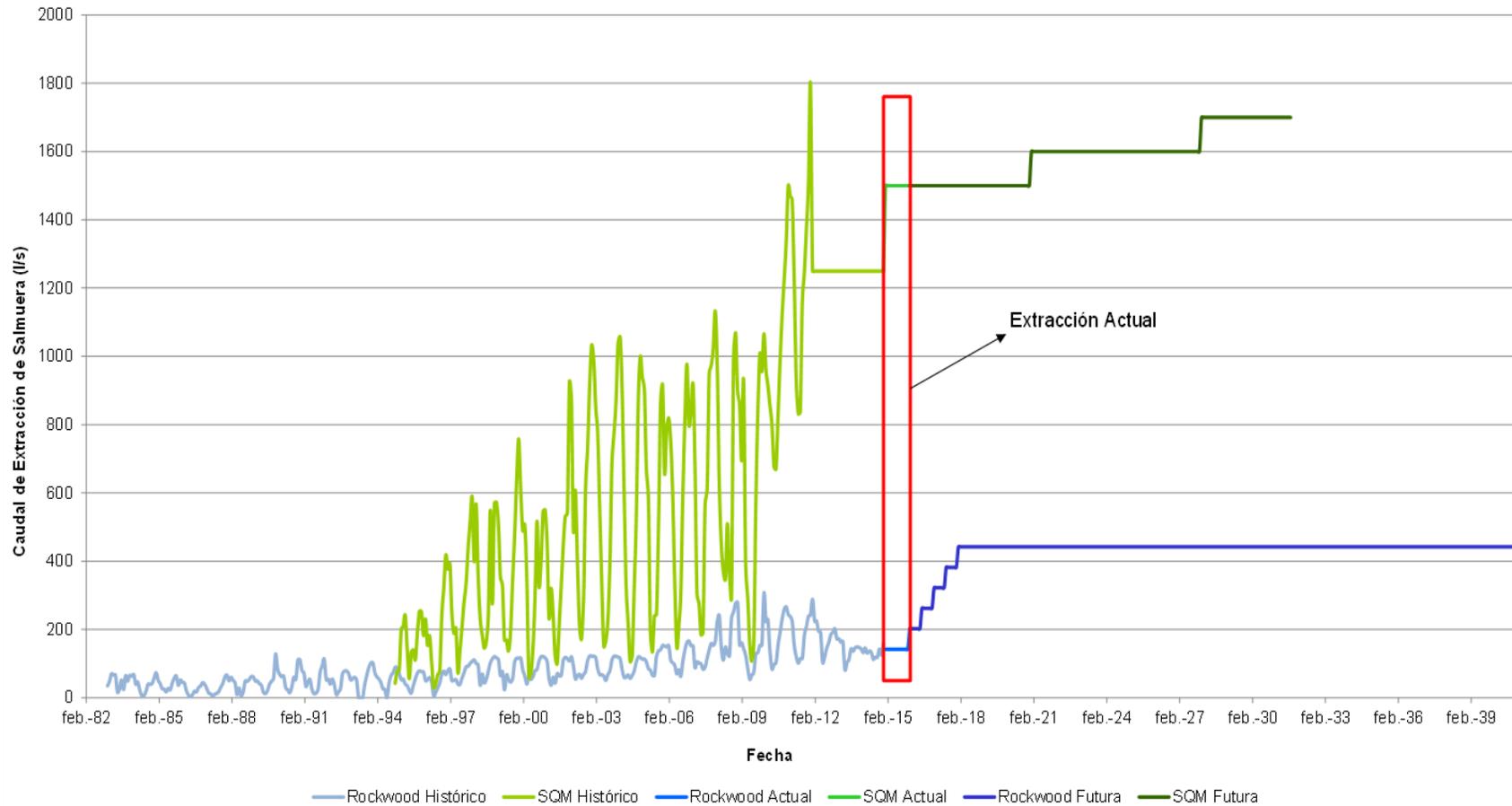
Finalmente, para generar la serie mensual de recarga al área del modelo, se calculó la variación de almacenamiento mensual a lo largo del período de calibración utilizando todas las variables conocidas. El detalle de los resultados de la serie mensual de recarga se presenta en el Apéndice K.

#### 9.2.4.6 *Bombeos de agua dulce y salmuera*

Como antecedente necesario a ser considerado en los escenarios de simulación, se presentan a continuación los datos relativos a la extracción de agua dulce y de salmuera en la Cuenca conforme a la recopilación y análisis de los derechos de aprovechamiento de agua dulce otorgados por la DGA en las subcuencas aportantes al Salar de Atacama y de las extracciones autorizadas de salmuera de SQM y de Rockwood, contenida en el Capítulo 5 de este Anexo.

La extracción histórica de salmuera por parte de SQM y de Rockwood para el período de calibración del modelo (1997-2013) y para el período de simulación se muestra en el gráfico de la Figura 9-43.

**Figura 9-43 Extracción de salmuera por parte de SQM y de Rockwood durante el período de calibración**



Fuente: Elaboración propia con datos de terceros

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

Las extracciones de agua dulce en las subcuencas son incorporadas tanto en el cálculo de la recarga en el período de calibración, como en los escenarios de simulación. Por otro lado, las extracciones de salmuera son incorporadas directamente en el modelo numérico, no siendo utilizadas en el cálculo de la recarga. Un resumen de los derechos de agua dulce otorgados por subcuenca se presenta en la Tabla 9-17.

**Tabla 9-17 Derechos otorgados por subcuenca**

Subcuenca	Caudal L/s
1	1.212,0
2	224,8
3	125,0
4	254,0
5	247,7
6	144,6
7	490,1
8	114,3
9	43,0
10a	1.686,4
11	40,0
16	525,8
<b>Total general</b>	<b>5.107,7</b>

Fuente: Elaboración propia sobre la base de información de derechos de agua concedidos, DGA.

Para determinar la explotación de derechos de agua en la situación futura, para su incorporación en los escenarios de simulación, se mantuvieron los factores de uso empleados en el período de calibración y presentados en el punto 5.1.3, excepto para los derechos mineros desconocidos, a los cuales se les aumentó su porcentaje de uso de un 66% a un 85%. Esto justificado porque en los años de 2008 a 2013 el uso real de los derechos mineros conocidos (ROCKWOOD, SQM, CMZ, MEL) fue de un 85% en promedio, por lo que se espera que este factor sea más realista como proyección para los años futuros.

### 9.3 Resultados del balance

En este punto se muestran los resultados del balance hídrico realizado para toda la cuenca del Salar de Atacama y para el área del modelo numérico MODFLOW desarrollado y que se describe en el capítulo 10 del presente Anexo.

#### 9.3.1 Balance hídrico en la Cuenca del Salar de Atacama

El balance que se presenta a continuación ha sido realizado para una situación promedio en condiciones naturales, por lo que no se consideran las extracciones de agua del Salar de Atacama, ni de las subcuencas aportantes.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

Tal como se presentó en la Figura 9-25, las subcuencas fueron agrupadas de acuerdo a las tres zonas de balance consideradas, para las cuales se presenta a continuación la cuantificación de los elementos del balance.

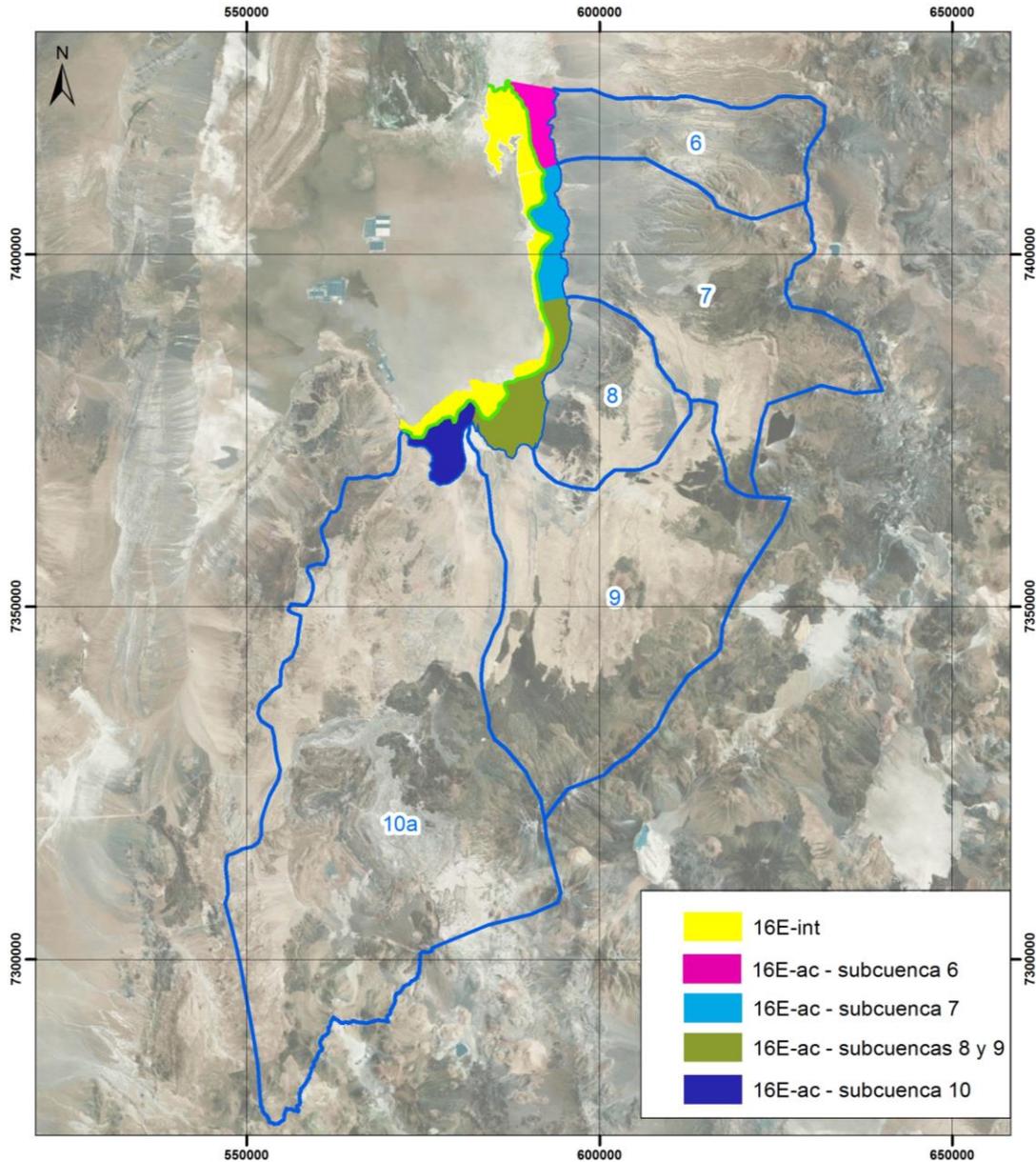
#### **Zona de balance Este y Sur:**

Incluye las subcuencas aportantes 6, 7, 8, 9, 10a y la parte de Zona Marginal aguas arriba de la interfase donde se encuentra el acuífero de agua salobre (16E-ac) enfrentada a las cuencas anteriores.

Las subcuencas fueron agrupadas en cuatro sectores de demanda evapotranspirativa, como se presenta en la Figura 9-44. En esta figura se observa que la Zona Marginal del sector Este y Sur queda dividida por la interfase salina, lo que genera la existencia de zonas con consumo de agua salobre (16E-ac, o Zona Marginal Acuífero) e intermedia (16E-Int). Para efectos del balance hídrico, se considera que las subcuencas aportantes alimentan la zona de consumo de agua salobre, es decir, aguas arriba de la interfase (subcuenca 16E-ac), así como una parte de la Zona Marginal Intermedia (16E-int).

En la Figura 9-44 se identifica con distintos colores la Zona Marginal Acuífero asociada a cada subcuenca aportante y en amarillo a la Zona Marginal Intermedia.

**Figura 9-44 Zonas de demanda evapotranspirativa sector Este y Sur**



Fuente: Elaboración propia

Para el cálculo de la precipitación efectiva en las subcuencas aportantes se utilizó la metodología empleada en el estudio de la DGA (2010), la cual relaciona la precipitación total con la efectiva mediante un factor adimensional. De esta forma, la precipitación efectiva queda definida mediante la siguiente expresión:

$$P_{\text{efectiva } i} = (1 - f_i) \cdot P_{\text{total } i}$$

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

Donde:

$P_{p\text{efectiva } i}$  Precipitación efectiva en la subcuenca i. [L/s]

$f_i$  Factor adimensional determinado en la calibración, adopta valores entre 0 y 1.

$P_{p\text{total } i}$  Precipitación total en la subcuenca i, según los resultados de la tabla [L/s]

Para determinar el valor los coeficientes f, y por consiguiente a la precipitación efectiva y la recarga proveniente de cada subcuenca, se realiza un balance que considera los caudales afluentes a cada zona de demanda evapotranspirativa de la Zona Marginal Acuífero (16E-ac) y del área de evaporación de agua salobre en la Zona Marginal Intermedia (16E-int), desde las subcuencas aportantes determinadas, y la evaporación desde cada una de ellas.

Además, se considera la precipitación efectiva que cae directamente sobre la superficie del Salar de la Zona Marginal considerada, y que también contribuye a la recarga.

De acuerdo a lo anterior, se obtiene la siguiente expresión de balance:

$$EV_{16E-ac} = \sum (P_{p\text{efectiva } i} - EVT_i) + P_{p\text{efectiva } 16E-ac} - E_{SSP}$$

Donde:

$EV_{ZM}$  Evaporación en el área de la Zona Marginal considerada (16E-ac + 16E-int salobre). [L/s]

$P_{p\text{efectiva } i}$  Precipitación efectiva en la subcuenca i. Es el valor calibrado en el balance, mediante la variación del coeficiente f. [L/s]

$EVT_i$  Caudal que corresponde a la demanda evapotranspirativa en la subcuenca i, considerando vegas, bofedales, zonas de cultivo y forestaciones. [L/s]

$P_{p\text{efectiva } -ZM}$  Precipitación efectiva sobre la Zona Marginal considerada (16E-ac + 16E-int salobre). [L/s]

$E_{SSP}$  Escorrentía sub-superficial que sobrepasa la interfase. Se considera equivalente al agua que evapora en la zona 16E-int durante el 60% del tiempo, salvo en la zona de Quelana donde este porcentaje es del 40%.

La precipitación en la Zona Marginal Acuífero se determinó mediante el gradiente de altura, siguiendo el mismo procedimiento descrito anteriormente para las subcuencas, mientras que la precipitación en la Zona Marginal Intermedia se determinó mediante polígonos de Thiessen.

Finalmente, el resultado del balance hídrico en el sector Este y Sur se presenta en la Tabla 9-18.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

**Tabla 9-18 Balance Hídrico zonas Este y Sur**

Subcuenca	Subcuencas aportantes					Zona balance (16E-ac y 16E-int salobre)	
	Pp total subcuencas (L/s)	f	Pp efectiva (L/s)	Evaporación subcuencas (L/s)	Recarga (L/s)	Evaporación ZM (L/s)	Pp efectiva ZM (L/s)
6	1136	0,20	232	27	205	216	11
7	2844	0,18	499	72	427	436	9
8	541	0,1	474	13	43	447	7
9	4022			21	396		
10a	6623	0,09	616	4	612	615	3

Fuente: Elaboración propia

#### Zona de balance Norte:

Considera las subcuencas del Norte (1, 2, 3, 4, 5 y 14), cuya recarga fluye subterráneamente atravesando la interfase difusa de la zona Norte de la Zona Marginal (16N) y alcanzando el Núcleo del Salar (subcuenca 17).

Se calculó un coeficiente de infiltración para estimar la precipitación efectiva en las subcuencas del Norte, la cual debe ser suficiente para abastecer la demanda evapotranspirativa de la Zona Marginal Norte (16N) considerando también la precipitación directa de ésta misma cuenca.

La subcuenca 14 fue una excepción en este sentido, dado que se encuentra dentro de la cuenca del Salar y no es posible que reciba agua desde fuera de los límites de la misma, por lo que se le asignó un coeficiente de infiltración de 4%, igual que el resto de subcuencas ubicadas al poniente del Salar.

El flujo subterráneo que pasa desde la subcuenca 16N, junto con la recarga proveniente de las subcuencas del Oeste (10b, 11, 12, 13 y 15), debe ser de un volumen tal que pueda satisfacer la demanda evapotranspirativa del Núcleo (17) y la Zona Marginal Intermedia que evapora salmuera (16E-int salmuera), teniendo en cuenta la precipitación directa sobre éstas dos zonas.

En este balance se considera que el caudal promedio medido en el Puente San Luis, que alimenta por el Norte el sistema lagunar de Soncor, estimado en 147 L/s, procede también de la Zona Marginal Norte (16N).

De acuerdo a lo anterior, se obtiene la siguiente expresión de balance:

$$\text{Salidas} = \text{Entradas}$$

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

$$Q_{\text{Norte}} + \text{EVT}_{\text{ZM}} = \sum (\text{Pp}_{\text{efectiva-i}} - \text{EVT}_i - \text{EVL}_i) + \text{Pp}_{\text{efectiva-ZM}}$$

Dónde:

$Q_{\text{Norte}}$	Flujo afluente desde la Zona Marginal Norte (16N) hacia el Núcleo del Salar (17) y superficialmente hacia la Zona Marginal Intermedia [L/s]
$\text{Pp}_{\text{efectiva-i}}$	Precipitación efectiva en la subcuenca aportante i [L/s]
$\text{EVT}_i$	Evapotranspiración en la subcuenca aportante i [L/s]
$\text{EVL}_i$	Caudal que corresponde a la demanda evapotranspirativa de lagunas en la subcuenca i. [L/s]
$\text{Pp}_{\text{efectiva-ZM}}$	Precipitación efectiva en la Zona Marginal (16N) en la zona de balance [L/s]
$\text{EVT}_{\text{ZM}}$	Evapotranspiración en la Zona Marginal (16N) en la zona de balance [L/s]

Finalmente, el balance hídrico en la zona Norte se presenta en la Tabla 9-19.

**Tabla 9-19 Balance hídrico Zona Norte**

Subcuenca	Subcuencas aportantes					Zona balance (Zona Norte)		Flujo hacia el Núcleo y ZMint (L/s)
	Pp total subcuencas (L/s)	f	Pp efectiva (L/s)	Evaporación subcuencas (L/s)	Recarga (L/s)	Evaporación ZM Norte (L/s)	Pp efectiva ZM (L/s)	
1	4035	0,34	1359	69	1291	2723	93	744 + 147
2	1547	0,34	521	122	399			
3	1807	0,34	609	9	600			
4	3165	0,34	1066	274	793			
5	1444	0,34	487	51	436			
14	71	0,04	3	0	3			

Fuente: Elaboración propia

### Zona de balance Oeste y Núcleo:

Como se indicó en el punto 9.3.3, para las subcuencas aportantes del Oeste (10b, 11, 12, 13, 14 y 15) se adoptó un coeficiente de infiltración para la precipitación de un 4%, valor similar al encontrado en la bibliografía existente y validado con los cálculos de balance de cloruros realizados por el Titular en la zona.

Para determinar la precipitación efectiva en el Núcleo (17 y 16E-int), se utilizó la metodología propuesta por DICTUC, 2004, quienes definieron que luego de cada evento de precipitación en el Salar evaporan inmediatamente 5 mm. Por lo tanto, se define la precipitación efectiva definida por DICTUC ( $\text{Pp}_{\text{efectiva}}$ ) de la siguiente manera:

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

$$P_{\text{efectiva}^*} = P_{\text{TOTAL}} - 5 \text{ mm}$$

Adicionalmente a lo anterior, con el fin de considerar la capacidad de infiltración de la costra de halita al cálculo de la precipitación efectiva ( $P_{\text{efectiva}}$ ), se redujo la precipitación total mensual cuando ésta sobrepasa un umbral de 18 mm. Cabe señalar que la zona del Núcleo posee una costra gruesa de sal compacta y dura, que lo cubre en toda su extensión (Mardones 1997), por lo que la capacidad de infiltración es baja y durante eventos de mucha precipitación, el suelo no sería capaz de infiltrar a la napa toda la precipitación efectiva calculada con la metodología propuesta por DICTUC ( $P_{\text{efectiva}^*}$ ).

Tanto el umbral de precipitación como el porcentaje de reducción de ésta fueron ajustados durante el proceso de calibración numérica en régimen transiente, obteniendo lo siguiente: si la  $P_{\text{efectiva}^*}$  es menor a 13 mm, la  $P_{\text{efectiva}}$  también es 13 mm, mientras que si  $P_{\text{efectiva}^*}$  es mayor a 13 mm, la  $P_{\text{efectiva}}$  sería igual a 13 mm más el 10% de la diferencia entre la  $P_{\text{efectiva}^*}$  y 13 mm. Lo anterior se traduce en la siguiente expresión:

$$\text{Si } P_{\text{efectiva}^*} \leq 13 \text{ mm} \rightarrow P_{\text{efectiva}} = P_{\text{efectiva}^*}$$

$$\text{Si } P_{\text{efectiva}^*} > 13 \text{ mm} \rightarrow P_{\text{efectiva}} = 13 \text{ mm} + (P_{\text{efectiva}^*} - 13 \text{ mm}) \cdot 0,1$$

A modo de ejemplo, si  $P_{\text{efectiva}^*} = 20 \text{ mm}$ , entonces  $P_{\text{efectiva}}$  es igual a  $13 \text{ mm} + 0,7 \text{ mm} = 13,7 \text{ mm}$ .

De esta forma, la precipitación efectiva en el Núcleo y en la Zona Marginal Intermedia se estimó utilizando las 3 estaciones meteorológicas existentes, con los polígonos de Thiessen generados. Utilizando el procedimiento descrito, se alcanzó una precipitación promedio en el Núcleo de 11,6 mm, valor cercano a los de estudios anteriores que la estimaban en 11 mm.

Considerando lo anterior, se obtiene la siguiente expresión de balance:

$$\text{Entradas} = \text{Salidas}$$

$$Q_{\text{Norte}} + P_{\text{efectiva}} + \sum (P_{\text{efectiva}-i} - \text{EVT}_i) + E_{\text{SSP}} + \text{INF}_L = \text{EVT}_{\text{NUCLEO}}$$

Dónde:

$Q_{\text{NORTE}}$	Flujo subterráneo afluente desde el sector norte hacia el Núcleo del Salar
$P_{\text{efectiva}}$	Precipitación directa sobre el Núcleo
$P_{\text{efectiva}-i}$	Precipitación efectiva en la subcuena i (10b, 11, 12, 13 y 15)
$\text{EVT}_i$	Evapotranspiración en la subcuena i (10b, 11, 12, 13 y 15)

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

E <sub>SSP</sub>	Flujo afluente neto desde las subcuencas sobre la interfase
INF <sub>L</sub>	Infiltración al Núcleo y Zona Marginal Intermedia desde los sistemas lagunares de Peine y Soncor
EVT <sub>NUCLEO</sub>	Demandas evapotranspirativas en el Núcleo y en la Zona Marginal Intermedia

El balance de la zona Oeste se presenta en la Tabla 9-20.

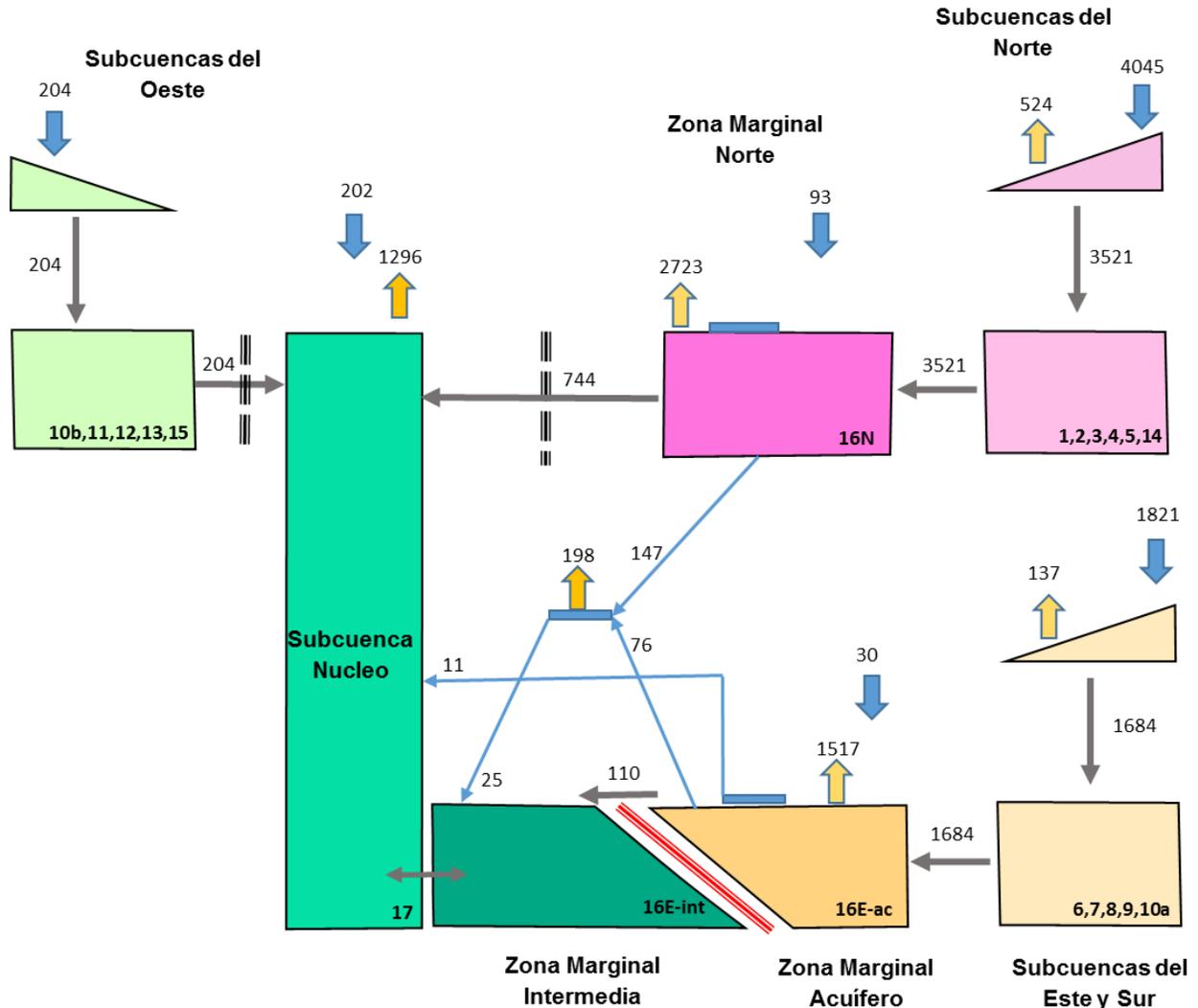
**Tabla 9-20 Balance hídrico zona Oeste**

Subcuenca	Subcuencas aportantes					Zona balance			
	Pp total subcuencas (l/s)	f	Pp efectiva (L/s)	Evaporación subcuencas (L/s)	Recarga (L/s)	Flujo desde el Norte (L/s)	Flujo neto que sobrepasa interfase (L/s)	Evaporación Núcleo (17+16sal) (L/s)	Pp efectiva a Núcleo (L/s)
10b	114	4%	5	0	5	744	147	1.296	202
11	2.294			0	92				
12	241			0	10				
13	2.272	4%	199	0	91				
15	172			0	7				

Fuente: Elaboración propia

A modo de resumen del balance hídrico, con el fin de representar los resultados de una forma más esquemática, se presenta la Figura 9-45, en la que se muestran los flujos obtenidos del balance en el área de la cuenca:

**Figura 9-45 Resultados del balance en el área de la cuenca (L/s)**



\* Valores de flujo en el esquema, expresados en L/s, pueden mostrar diferencias de hasta 1 L/s debido al redondeo de decimales

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 9-21 se muestra un resumen de los principales elementos del balance en el conjunto de la cuenca, agrupados por colores según las diferentes zonas de balance que se explicaron en el punto 9.2.3.

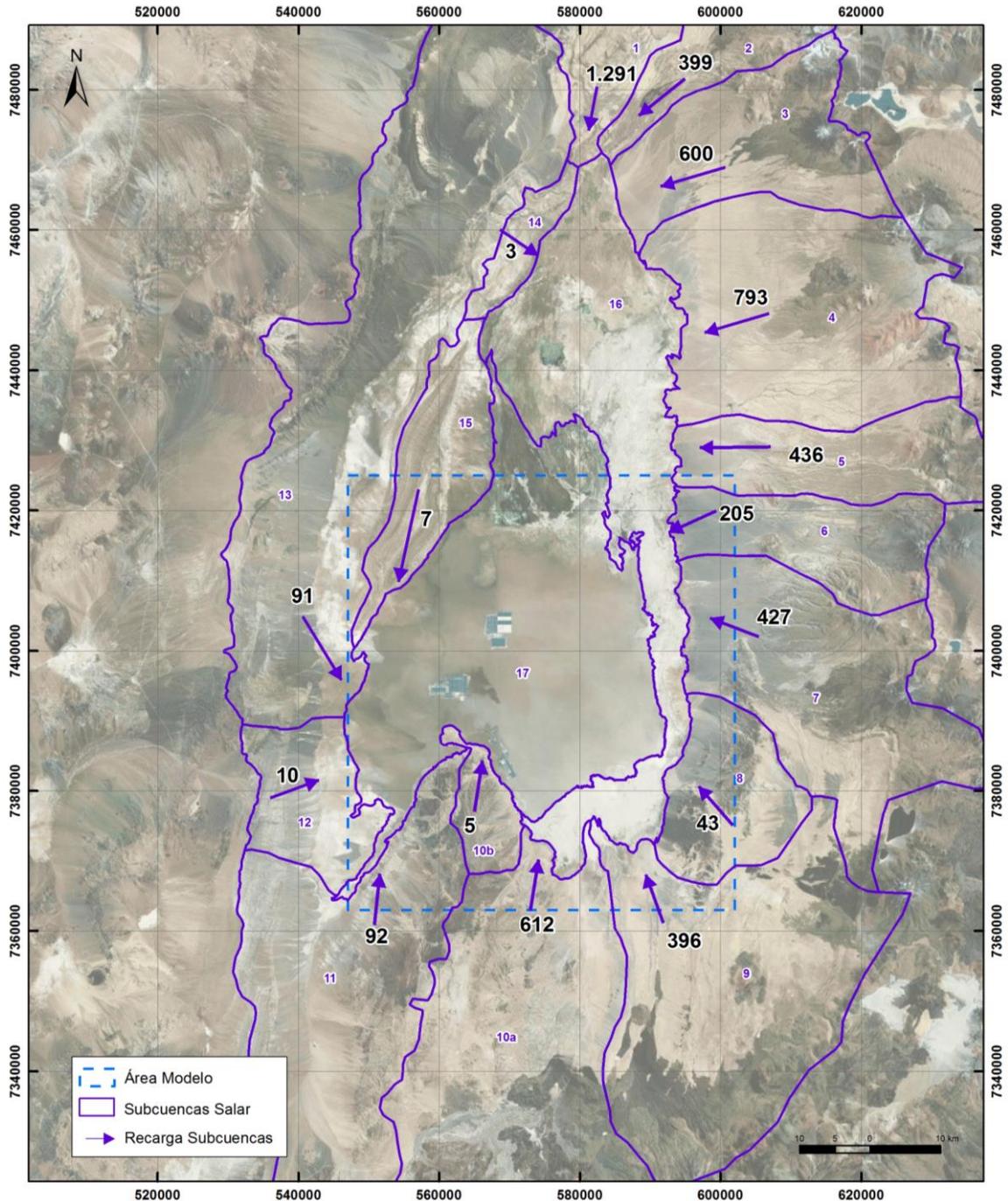
**Tabla 9-21 Resumen de resultados del balance hídrico en la cuenca del Salar de Atacama**

BALANCE CUENCA SALAR DE ATACAMA - MODELO CONCEPTUAL SGA + TASAS SGA										
Descripción	Subcuenca	Subcuenca aportante					Zona balance			Balance (l/s)
		Pp total subcuencas (l/s)	f	Pef	Ev subcuencas (l/s)	Recarga (l/s)	Evaporación (l/s)	Flujo que sobrepasa la interfase (l/s)	Pp ef ZM o Núcleo (l/s)	
Se le resta la evaporación en el sector norte y la recarga se estima con Cinf de otras subcuencas	1	4.035	34%	1.359	69	1.291	2.723		93	744 + 147
	2	1.547	34%	521	122	399				
	3	1.807	34%	609	9	600				
	4	3.165	34%	1.066	274	793				
	5	1.444	34%	487	51	436				
	14	71	4%	3	0	3				
Esta subcuencas se balancean con la sección de la Zona Marginal aguas arriba de la interfase	6	1.136	20%	232	27	205	216		11	0
	7	2.844	18%	499	72	427	436		9	0
	8	541	10%	474	13	43	447		7	0
	9	4.022			21	396				
	10a	6.623	9%	616	4	612	615		3	0
Se aplica un Cinf en base a bibliografía y Cl <sup>-</sup>	10b	114	4%	5	0	5	1.296	146,5	202	0
	11	2.284	4%	198,7	0	92				
	12	241			0	10				
	13	2.272			0	91				
	15	172			0	7				

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 9-46 se puede observar la distribución de los flujos de recarga que llegan al Salar de Atacama procedentes de las subcuencas aportantes.

**Figura 9-46 Recarga Subterránea desde las Subcuencas Aportantes (L/s)**



Fuente: Elaboración propia

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

La Tabla 9-22 muestra una comparación entre los resultados obtenidos en el balance hídrico en la cuenca del Salar de Atacama del presente estudio, y los de los estudios DGA 2010 y 2013. Se observa la similitud entre el estudio actual y el de 2013, siendo la principal diferencia la estimación de precipitación efectiva sobre el Núcleo del Salar, lo que influye en el valor final de la recarga.

**Tabla 9-22 Comparación balance hídrico con antecedentes**

Estudio	Pp Total (m <sup>3</sup> /s)	Demanda Evapotranspirativa Subcuencas (m <sup>3</sup> /s)	Recarga Total (m <sup>3</sup> /s)
SGA (2015)	32,3	0,66	5,4
DGA (2013)	31,4	0,50	5,2
DGA (2010)	23,5	1,42	5,6

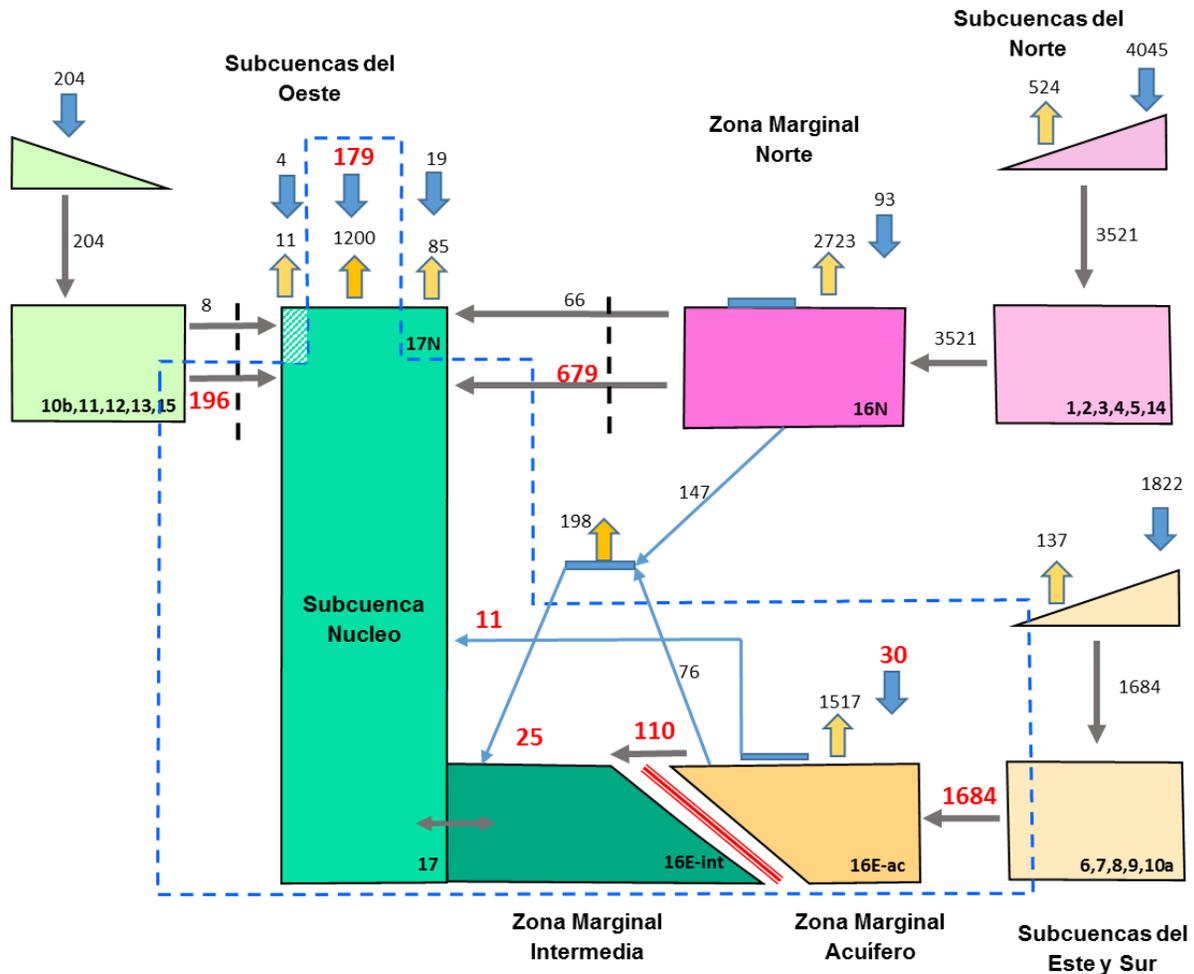
Fuente: Elaboración propia

### 9.3.2 Balance hídrico en el área del modelo

Para establecer el balance hídrico del área del modelo, se ha utilizado la misma metodología que para calcular el balance hídrico en el área total de la cuenca, descrito en el punto anterior.

Los resultados de este cálculo se resumen en la Figura 9-47, correspondientes al balance para el área del modelo numérico que se desarrolla en el capítulo 10 y que utiliza estos valores (resaltados en letra de color rojo) como condiciones de entrada para la calibración del modelo en régimen permanente.

**Figura 9-47 Esquema de resultados del balance hídrico en el área del modelo (L/s)**



NOTA: Valores de flujo en el esquema, expresados en L/s, pueden mostrar diferencias de hasta 1 L/s debido al redondeo de decimales

Fuente: Elaboración propia

Desde el norte del área modelada la recarga lateral que se incorpora al modelo desde las cuencas del Norte (679 L/s) es inferior a la obtenida en el balance de la cuenca (744 L/s). Esto se explica porque una parte de la subcuenca Núcleo (17) queda fuera del área del dominio del modelo, desde donde evaporan 85 L/s, mientras que la precipitación directa es de solamente 19 L/s, resultando en un menor flujo de entrada en el área modelada.

En la zona suroeste del área del modelo, considerando la configuración geométrica adoptada en que se inactivan parte de las celdas del Núcleo (ver área con rayado verde en la Figura 9-48), se incorpora la recarga de la subcuenca 11 en una posición más interna en el Núcleo, disminuyendo esta recarga de 92

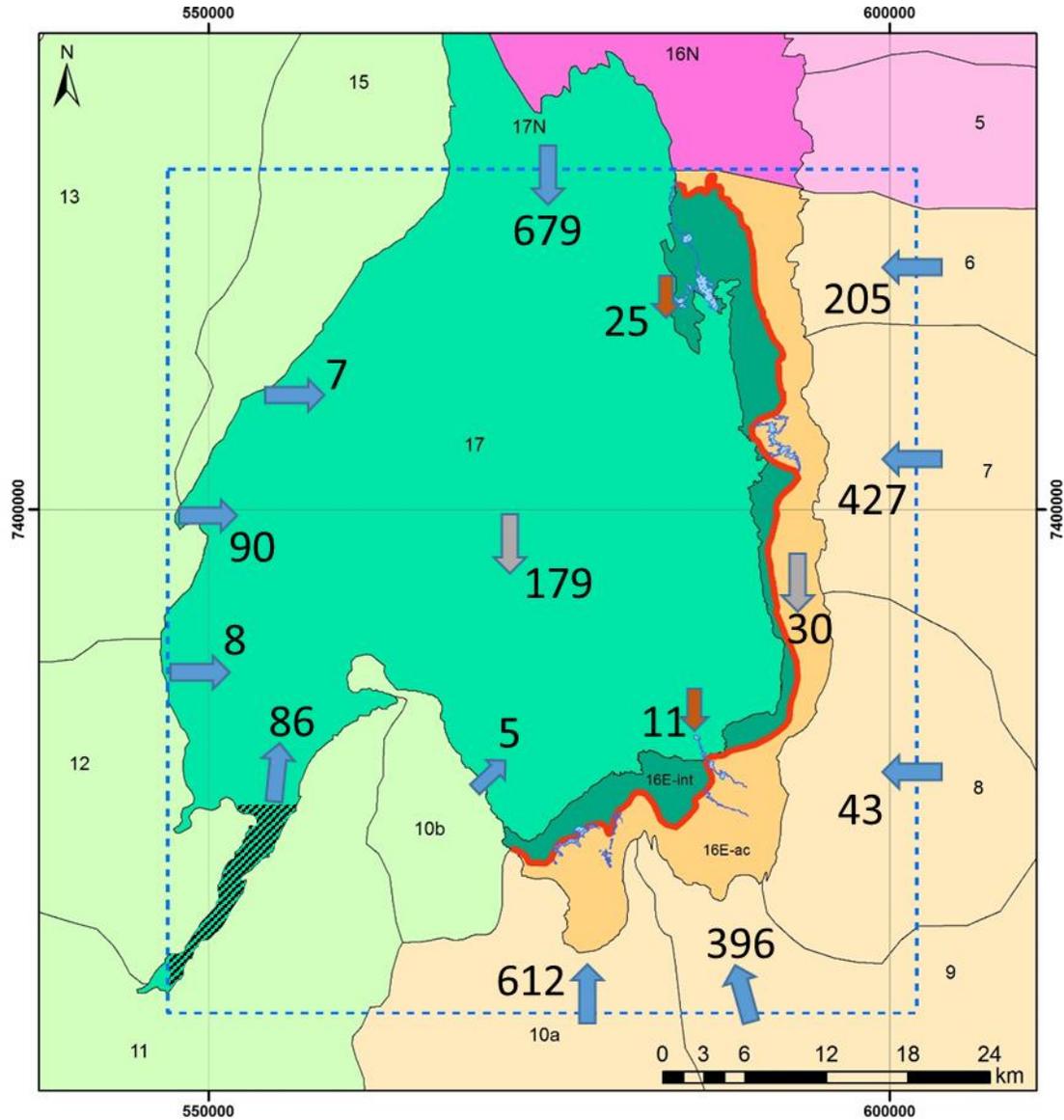
	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

L/s calculados en el balance total de la cuenca, a 86 L/s en el área del modelo, puesto que se han considerado los procesos que tiene lugar en la zona inactivada, de evaporación y precipitación.

De manera similar, las entradas desde las subcuencas 12 y 13, también disminuyen en aproximadamente en 1 L/s respecto al balance total de la cuenca producto de la posición en que se incorpora la recarga en esta zona.

En la Figura 9-48 se pueden observar los valores de recarga que fueron incorporados como inputs en el modelo numérico como condiciones de borde en la calibración en régimen permanente, y que se resumen en la Tabla 9-23.

**Figura 9-48 Flujos incorporados como condición de entrada en el modelo**



**LEYENDA**

- |  |                      |  |  |
|--|----------------------|--|--|
|  | Subcuenca Núcleo     |  |  |
|  | Subcuencas del Norte |  |  |
|  | Zona Marginal Norte  |  |  |
|  |                      |  |  |

Fuente: Elaboración propia

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

**Tabla 9-23 Flujos de entrada que serán incorporados en el modelo numérico**

	Zona	Subcuencas	Flujo entrante al área del modelo (L/s)	Flujo total (L/s)
Recarga lateral subterránea	Norte	17N	679	679
	Este y Sur	6	205	1684
		7	427	
		8	43	
		9	396	
		10a	612	
	Oeste	11	86	196
		12	8	
		13	90	
		15	7	
10b		5		
Recarga vertical por precipitación	Núcleo y Zona Marginal Intermedia	16E-int, 17	179	179
	Zona Marginal Acuífero	16E-ac	30	30
Recarga por infiltración desde sist. lagunares	Soncor		25	25
	Peine		11	11

Fuente: Elaboración propia

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

### 9.3.3 Balance hídrico mensual

Con el fin de generar los inputs de recarga que serán utilizados en el modelo numérico, se han calculado los valores de recarga mensuales tanto en el período de calibración, como en el de simulación de escenarios.

A continuación se describe la metodología de cálculo utilizada, cuyos resultados de estos cálculos se pueden consultar en el Apéndice K.

- Recarga mensual en período de calibración

En base a los resultados del balance anual, se generó la recarga afluyente al núcleo requerido para el período de calibración del modelo numérico, correspondiente a los meses entre Noviembre de 1997 y Diciembre de 2013. Se entregan a continuación la metodología y los resultados obtenidos.

Para generar la precipitación en las subcuencas para cada mes del período requerido (1997-2013), se empleó un registro base, el cual posteriormente fue distribuido en las distintas bandas de altura mediante los gradientes mensuales determinados previamente. Se estableció que como serie base de precipitación a utilizar, se emplearía el promedio de los registros mensuales de las estaciones Peine y El Tatio, ya que dada la diferencia de cotas y separación entre ellas se consideran representativas del área aportante, además de contar con registros completos en todo el período requerido.

Para estimar la precipitación en las diferentes bandas de altura en el período de calibración, se empleó la siguiente expresión, para los distintos meses y subcuencas.

$$Pp_i^z = Pp_i^{base} \cdot \frac{Pp_{mes}^z}{Pp_{mes}^{base}}$$

Donde:

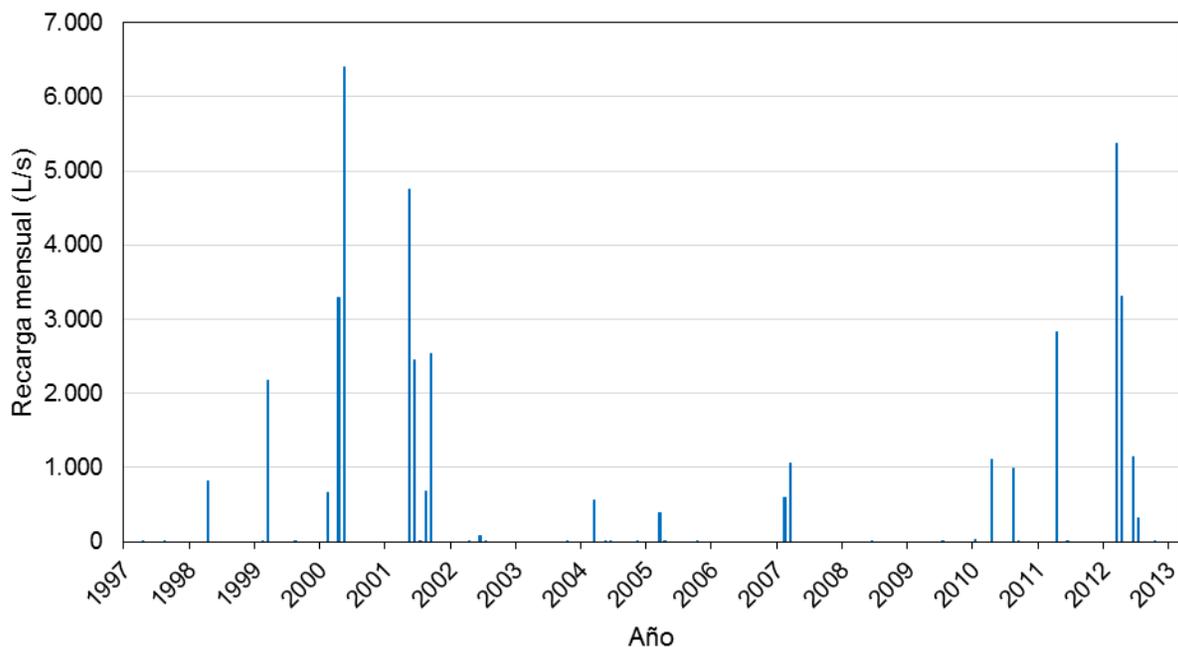
$Pp_i^z$	Precipitación para la banda de altura $z$ en el mes $i$ , con $i$ entre 1 y 194 (desde Noviembre de 1997 a Diciembre de 2013).
$Pp_i^{base}$	Precipitación promedio entre las estaciones Peine y El Tatio en el mes $i$ .
$Pp_{mes}^z$	Precipitación para la banda de altura $z$ en el mes correspondiente, de acuerdo al gradiente de alturas obtenido previamente.
$Pp_{mes}^{base}$	Precipitación para la cota 3.415, promedio entre la cota de las estaciones Peine (2.460 msnm) y El Tatio (4.370 msnm), para el mes correspondiente, de acuerdo al gradiente de alturas obtenido previamente.

La expresión anterior establece una relación entre la precipitación registrada en la estación base, correspondiente al promedio entre Peine y El Tatio, y la precipitación para las distintas bandas de altura. Se define una relación entre ambos valores mediante el uso de las precipitaciones medias calculadas con los gradientes de altura mensuales, evaluándolo en la cota promedio de las estaciones base, y a la cota donde se busca obtener la precipitación.

La precipitación base fue llevada a las distintas bandas de altura mediante la fórmula anterior, obteniéndose el caudal generado por precipitación total para cada subcuenca mediante la descomposición de bandas de altura de cada subcuenca. A continuación, la precipitación obtenida se multiplicó por los coeficientes de infiltración determinados en el balance anual para cada subcuenca ( $f_i$ ), con lo que se determinó la precipitación efectiva para la serie completa. La precipitación efectiva contribuye directamente a aumentar el volumen embalsado en cada subcuenca, según el modelo conceptual que se presentó en el punto 9.1.1.

En el Núcleo y en la Zona Marginal Intermedia, se calculó la precipitación efectiva mensual siguiendo la misma metodología que se describe en el punto 9.3.1. Los resultados de este cálculo se muestran en el gráfico de la Figura 9-49.

**Figura 9-49 Precipitación efectiva mensual sobre el Núcleo y la Zona Marginal Intermedia durante el período de calibración**



Fuente: Elaboración propia

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

Con el fin de representar la variabilidad mensual de la recarga subterránea, se adoptó un modelo de embalse lineal, que relaciona el volumen almacenado con el caudal efluente mediante una constante, según la siguiente expresión:

$$E_{SUB} = \alpha \cdot V$$

Dónde:

$E_{SUB}$  Flujo subterráneo ( $m^3/s$ )

$\alpha$  Coeficiente de embalse (1/s)

V Volumen almacenado ( $m^3$ )

Con los volúmenes almacenados, cuyo cálculo se describe en el punto 9.2.4.4, y la recarga obtenida en el balance hídrico en condición promedio, se estimó el valor del coeficiente de embalse  $\alpha$  para cada subcuenca aportante, los cuales se presentan en la Tabla 9-24.

**Tabla 9-24 Coeficientes de embalse**

Subcuenca	Recarga subterránea (L/s)	Vol. almacenado ( $km^3$ )	$\alpha$ (1/s)
1	1.233	9,07	1,36E-10
2	377	3,30	1,14E-10
3	574	4,79	1,20E-10
4	748	8,80	8,49E-11
5	415	3,88	1,07E-10
6	149	3,27	4,57E-11
7	369	7,51	4,92E-11
8	37	3,20	1,14E-11
9	348	10,79	3,23E-11
10a	699	14,80	4,72E-11
10b	5	0,12	3,83E-11
11	86	6,67	1,29E-11
12	10	0,78	1,24E-11
13	91	7,67	1,18E-11
14	3	0,38	7,39E-12
15	7	0,91	7,56E-12

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, para el cálculo de la serie de recarga mensualizada, se determinó mes a mes el volumen almacenado de acuerdo a la siguiente expresión:

$$V_{ALM}(i) = V_{ALM}(i-1) + P_{p\text{efectiva}}(i) - EVT(i) - BAD(i) - E_{SUB}(i-1)$$

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

Donde:

- $V_{ALM}(i)$  Volumen almacenado en el mes  $i$ .  
 $V_{ALM}(i-1)$  Volumen almacenado en el mes  $i-1$ .  
 $P_{p\text{efectiva}}(i)$  Volumen de precipitación efectiva en el mes  $i$ .  
 $EVT(i)$  Demanda evapotranspirativa dentro de la subcuenca en el mes  $i$ .  
 $BAD(i)$  Demanda de agua dulce por efecto de los derechos de agua en el mes  $i$ .  
 $E_{SUB}(i-1)$  Volumen del flujo subterráneo en el mes  $i-1$ .

En cuanto a la evapotranspiración mensual generada en las subcuencas aportantes se consideró que ella es constante año a año, justificado por la baja variabilidad estacional de la evaporación. Conforme a ello, se determinaron los valores de evapotranspiración para cada tipo de cobertura vegetal y subcuenca utilizando los coeficientes de cultivo mensuales, siguiendo la metodología explicada en el punto 9.2.4.2. Los derechos de agua fueron analizados en detalle en el Capítulo 5, donde se determinó tanto su magnitud como su distribución espacial, además de los factores de uso asociados. Los bombeos fueron incorporados en el cálculo de la recarga según la fecha de asignación de cada uno de ellos, y con el respectivo factor de uso asociado. En la Tabla 9-25 se presentan los derechos de agua efectivos determinados en cada subcuenca, una vez que están todos en explotación.

**Tabla 9-25 Derechos de agua efectivos por subcuenca**

Subcuenca	Demanda estimada de agua (L/s)
1	742,8
2	134,9
3	93,8
4	195,1
5	232,7
6	144,6
7	293,5
8	25,3
9	43,0
10 <sup>a</sup>	1.800,0
16	342,4
Total	4.048,0

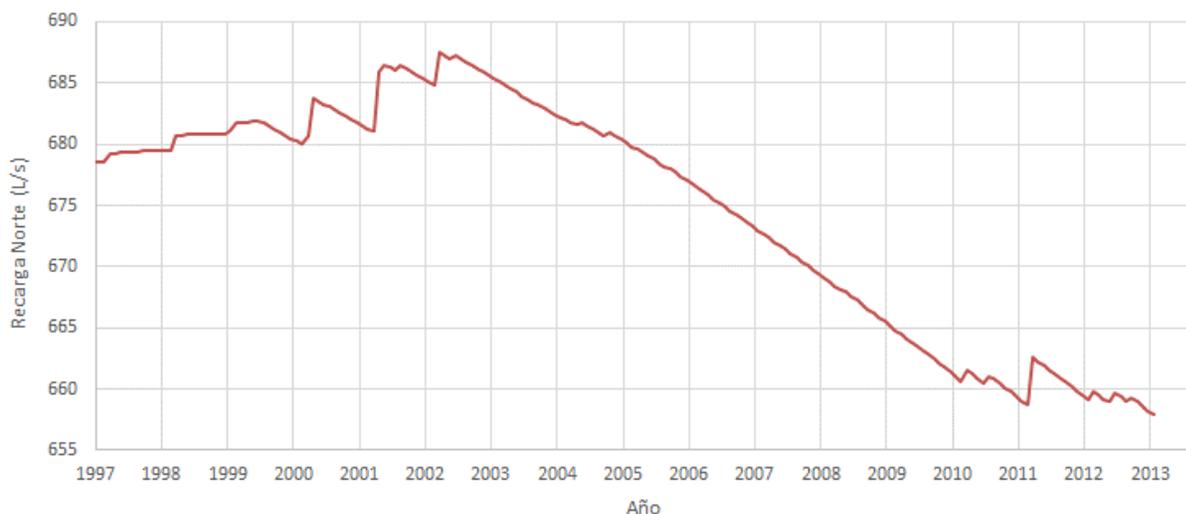
Fuente: Elaboración propia

En la subcuenca 10a se conoce la explotación real llevada a cabo por las mineras MEL y CMZ en el período de calibración, la cual es informada en sus reportes anuales del Plan de Alerta Temprana del acuífero

Monturaqui-Negrillar Tilopozo (MEL, 2014). Considerando lo anterior, y adoptando un escenario realista, se incorporó en el modelo de recarga la explotación mensual real.

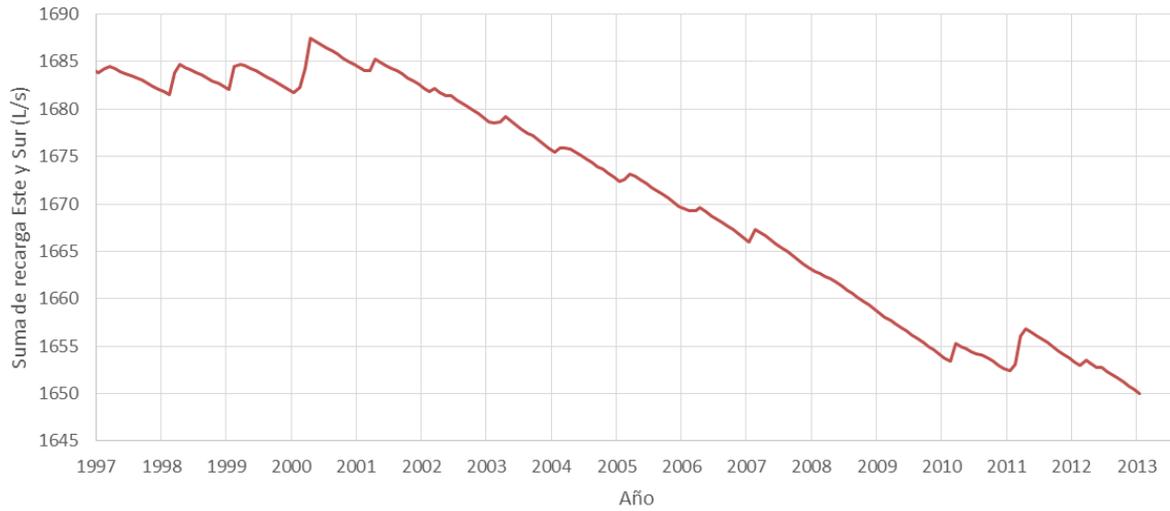
Finalmente, incorporando todos los elementos del balance, se determina el volumen embalsado mensualmente en cada subcuenca, con lo cual se calculó el caudal efluente desde cada una de ellas, empleando el coeficiente de embalse. La serie completa de recarga se presenta en el Apéndice K, mientras que en la Figura 9-50, Figura 9-51 y Figura 9-52 se muestra la evolución del flujo de recarga desde el Norte, desde el Este y Sur, y desde el Oeste, respectivamente, para el período de calibración.

**Figura 9-50 Evolución de la recarga al modelo desde el Norte durante el período de calibración**



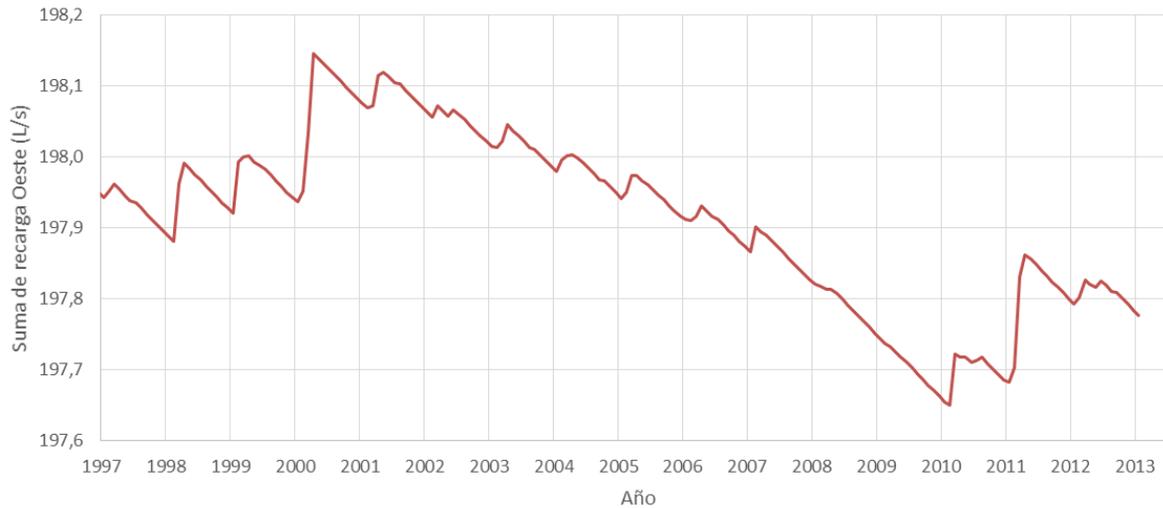
Fuente: Elaboración propia

**Figura 9-51 Evolución de la recarga al modelo desde el Este y Sur durante el período de calibración**



Fuente: Elaboración propia

**Figura 9-52 Evolución de la recarga al modelo desde el Oeste durante el período de calibración**



Fuente: Elaboración propia

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

## 10 MODELO HIDROGEOLOGICO NUMERICO

### 10.1 Introducción y objetivos

La modelación numérica es una herramienta matemática que busca representar el modelo conceptual del funcionamiento hidrogeológico y balance hídrico de una cuenca o sector acuífero, reproduciendo de buena forma la evolución de los niveles piezométricos histórica, y utilizarla después para predecir el comportamiento futuro del sistema bajo unas condiciones determinadas.

En este estudio, en la cuenca hidrogeológica del Salar de Atacama, los objetivos principales de la modelación numérica son:

- Representar el modelo conceptual y balance hídrico desarrollado para el sistema en análisis, sobre la base de los antecedentes de geología del área en estudio, características hidrogeológicas del acuífero, estudios geofísicos, pruebas de bombeo, niveles de agua subterránea, explotación de pozos, caracterización de los sistemas lacustres, evapotranspiración, hidroquímica, mediante la utilización de una herramienta matemática.
- Representar la interfase salina que existe en la cuenca y que supone el límite físico entre la salmuera del Núcleo y el agua del acuífero de la Zona Marginal donde se encuentran los sistemas lagunares, y con ello, representar también los efectos del fenómeno de densidad variable sobre el flujo subterráneo.
- Evaluar la respuesta del sistema a la explotación de salmuera del núcleo del Salar producto del proyecto considerando los demás proyectos en la cuenca, prediciendo la evolución de niveles tanto de la salmuera y el acuífero, como de los efectos en los sistemas lagunares.

De esta manera, con la finalidad de representar adecuadamente la complejidad del sistema, que considera balance hídrico, fluidos de densidades distintas; extracciones de múltiples usuarios; sistemas lagunares de interés que deben ser resguardados; y tratarse la cuenca del Salar de una cuenca endorreica, la modelación numérica se realiza a través de dos modelos numéricos, a saber, uno tridimensional a escala regional con MODFLOW y uno bidimensional a escala local con SEAWAT.

El modelo numérico MODFLOW representa el comportamiento regional del sistema, considerando los demás proyectos y extracciones existentes en la cuenca, y permite predecir la variación de niveles en el Núcleo como resultado de la extracción de salmuera. Sin embargo, debido a la presencia de la interfase salina entre la salmuera y el agua del acuífero de la Zona Marginal, y teniendo en cuenta que MODFLOW no puede representar ya que modela un fluido de una densidad, se ha recurrido a la utilización del programa SEAWAT mediante perfiles bidimensionales.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

Este programa, combina los códigos de flujo (MODFLOW) y de transporte (MT3DMS), y simula flujo subterráneo de densidad variable, considerando la distinta densidad de la salmuera y del acuífero de agua dulce o salobre incorporando sus características de salinidad (TDS), y modela la posición y/o movimiento de esta interfase, para determinar con precisión la variación de niveles en la Zona Marginal donde se encuentran los sistemas lagunares sensibles, y predecir posibles efectos sobre los mismos.

Considerando esta complejidad del SEAWAT y demanda operativa-computacional, su aplicación es recomendada en secciones bidimensionales que crucen el área de interés a evaluar (sectores particulares). Debido a esta limitación, las características y funcionamiento hidrogeológico de su entorno, son incorporadas a partir de los resultados del modelo MODFLOW, que considera todas las variables hidrogeológicas que intervienen en el Salar y valida los parámetros hidráulicos y condiciones de borde (nivel, recarga, evaporación, etc.), utilizándolos como datos de entrada en el modelo SEAWAT.

De este modo, el uso conjunto de ambos modelos permite tomar en cuenta el comportamiento general de toda la cuenca considerando Núcleo, interfase salina y Zona Marginal, y generar predicciones con el MODFLOW respecto de la evolución de niveles en la salmuera y en el acuífero en los puntos extremos de los perfiles SEAWAT, para luego predecir la evolución de niveles a lo largo de estas secciones, donde se presenta el fenómeno de la doble densidad en la columna de agua modelada.

Para lograr la implementación de estos modelos y cumplir con los objetivos anteriormente planteados ha sido necesario desarrollar las siguientes tareas:

- Definir las características hidrogeológicas y delimitar el dominio de los modelos en base al modelo conceptual.
- Construir los modelos numéricos en base a las unidades hidrogeológicas y las condiciones de borde necesarias para representar las variables hidrogeológicas tanto en la etapa de calibración y validación como en la simulación de los escenarios predictivos.
- Ajustar los parámetros hidráulicos de los modelos, en el periodo definido para calibración, considerando la información de niveles y concentraciones de sólidos disueltos y, luego, corroborar el ajuste logrado para un periodo de validación.
- Definir los datos de entrada para el desarrollo de los escenarios predictivos

En cumplimiento con lo requerido por la autoridad en adendas anteriores, se desarrollaron tres perfiles SEAWAT en el área, en los sectores de las lagunas La Punta – La Brava y sistema lagunar de Peine ubicadas en la Zona Marginal y el sistema lagunar de Aguas de Quelana ubicado más al norte (este perfil ha sido denominado perfil de Quelana en este capítulo).

Los modelos SEAWAT desarrollados, son la herramienta final utilizada para evaluar efectos de los bombeos de salmuera en la zona de las lagunas. Para realizar esta evaluación se han seleccionado un conjunto de puntos situados en la zona de alimentación de las lagunas, y en los mismos se ha calculado el

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

descenso máximo previsto por los modelos respecto al nivel que tenían en una fecha de referencia, en la cual no existía el proyecto, y además no se han reportado afecciones ambientales. También se ha evaluado cuánto de este descenso es causado por el proyecto, comparando dos escenarios de predicción; uno que contempla el aumento de extracción de Rockwood y otro que mantiene las condiciones de bombeo actuales. En esta evaluación también se ha tenido en cuenta la evolución de la forma y posición de la interfase salina.

## 10.2 Modelo MODFLOW

### 10.2.1 Selección código MODFLOW

Para la modelación del sistema se utilizó el software Visual MODFLOW, que permite modelar en 3-D simulando el flujo en zona saturada. Éste corresponde a un software comercial que sustenta varios códigos de modelación, como MODFLOW, MT3DMS y SEAWAT entre otros. Para el presente estudio fue usada la versión 4.6.162 del Visual MODFLOW.

El programa o código de modelación MODFLOW resuelve las ecuaciones que rigen el movimiento del agua subterránea en un medio poroso utilizando el método de diferencias finitas. Para su implementación se requiere definir una malla de elementos que represente espacialmente el dominio del sistema, así como una discretización temporal para el período de estudio. El programa, a su vez, permite obtener la carga hidráulica dentro del medio para cualquier posición y tiempo del dominio definido, así como los flujos relevantes dentro del sistema.

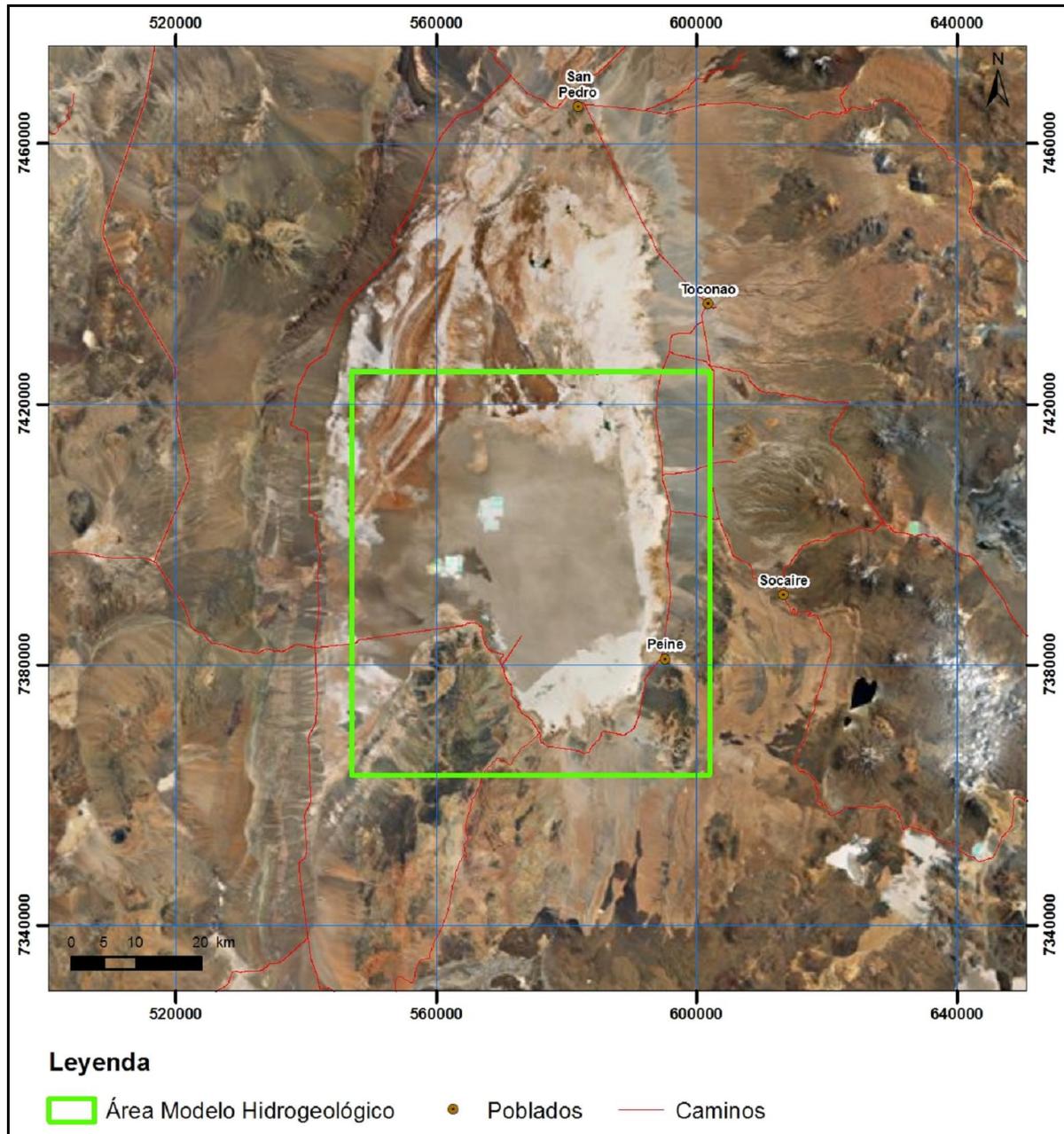
### 10.2.2 Construcción del Modelo

#### 10.2.2.1 Dominio y Configuración

Para evaluar el efecto del bombeo de la salmuera, se utilizó el modelo numérico MODFLOW en 3-D, el cual al no considerar el fenómeno de densidad variable el efecto de la interfase salina queda representado por la condición de flujo subterráneo cercano a cero.

El área modelada cubre el Núcleo del Salar, donde se explota la salmuera, y el acuífero de agua salobre donde se ubican los sistemas lagunares y la zona de recarga al este del Salar (Figura 10-1). Por el norte el área se extendió hasta el sector de Soncor, para incluir este sistema al análisis. Para definir los límites físicos del área modelada, dada por las celdas inactivas, se tuvo presente la hidrogeología del sector. Sus límites están dados por las coordenadas UTM (Datum WGS84) 547.000 a 602.000 metros Este y 7.363.000 a 7.425.000 metros Norte, que definen una extensión de 55 km en dirección Este-Oeste y 62 km en dirección Norte-Sur. Se utilizó una malla con celdas de 250x250 m con lo que se obtienen 248 filas y 220 columnas.

**Figura 10-1 Ubicación Área Modelo Numérico**



Fuente: Elaboración propia sobre imagen Google Earth

El área así definida para la modelación con MODFLOW, se considera adecuada para representar el balance hídrico desarrollado para el sistema, evaluar el efecto del bombeo de salmuera en el Salar y generar las condiciones de borde requeridas para los modelos SEAWAT, tanto en el Núcleo como al oeste de la interfase salina.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

En cuanto a la profundidad o cota mínima del modelo, a pesar de que la unidad hidrogeológica del Núcleo alcanza los 1.800 m de profundidad según información geológica disponible, el modelo fue configurado hasta los 400 m de profundidad en el Núcleo, es decir a la cota 1.900 msnm. Esta potencia fue estimada suficiente para representar la dinámica hidrogeológica en el Salar de Atacama provocada por las extracciones de salmuera considerando que los flujos subterráneos bajo la cota señalada no tienen incidencia sobre los objetivos de modelación que corresponden a fenómenos que ocurren en los primeros 50 m, como son las extracciones de salmuera en el Núcleo y de agua en los acuíferos donde se ubican los sistemas lagunares a proteger.

Dada la gran extensión del modelo regional MODFLOW y que su objetivo principal es determinar las condiciones de borde para los modelos locales (SEAWAT) en los sectores de interés ambiental donde existe la condición de densidad variable, se considera que el tamaño de celdas de 250x250 m en MODFLOW y de 50x50 m en SEAWAT es adecuada.

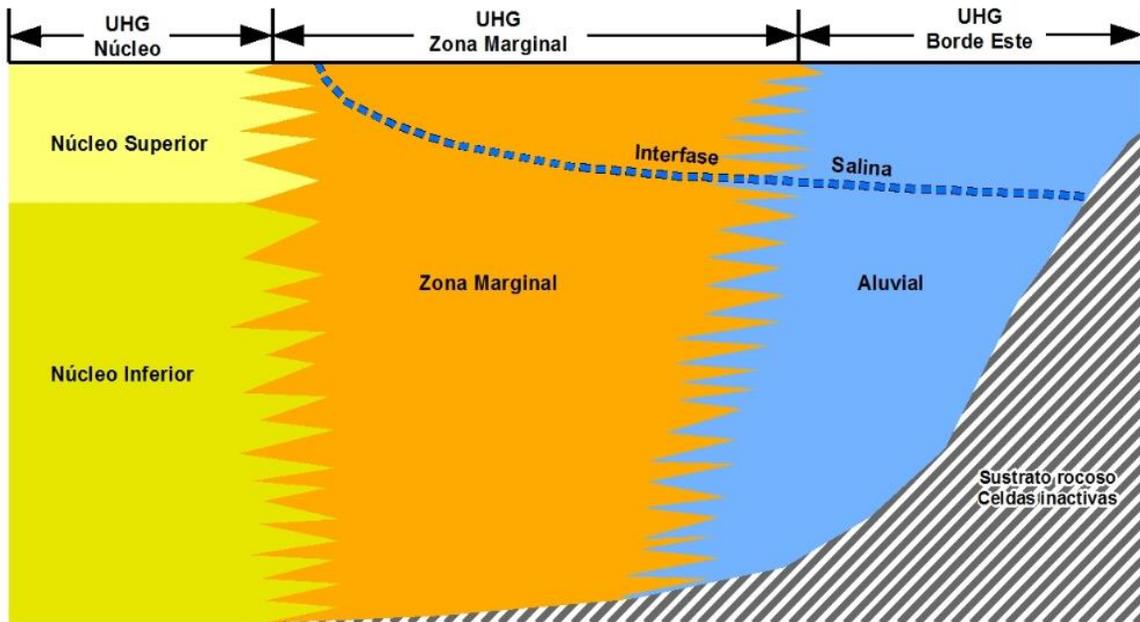
Las condiciones de borde que requiere el modelo para su operación, corresponden a niveles piezométricos conocidos en una o varias celdas, ubicadas en general en la frontera de la zona simulada y flujos entrantes y salientes al sistema. Las variables externas que constituyen los estímulos del sistema, son las extracciones por bombeos.

La base de información para el modelo está constituida por todos los antecedentes hidrogeológicos del sector, extraídos principalmente de estudios existentes y la nueva información generada por Rockwood en el marco del presente EIA y, básicamente se refieren a la geología del área en estudio, características hidrogeológicas del acuífero, estudios geofísicos, pruebas de bombeo, niveles de agua subterránea, explotación de pozos, caracterización de los sistemas lacustres, evapotranspiración, hidroquímica, modelo conceptual y balance hídrico, cuya descripción y análisis de detalle se contiene en los capítulos anteriores.

Para caracterizar el sistema subterráneo del área modelada, de acuerdo con la descripción hidrogeológica realizada y el modelo conceptual presentado, se determinó que un modelo de 3 capas permite definir adecuadamente el sistema. Ello, porque permite considerar las necesidades geométricas para la representación de la cuña salina y los estratos aluviales del borde del Salar que penetran en los sedimentos evaporíticos del depocentro del Salar, así como de los flujos hídricos que se producen en este sector de la zona marginal.

En la Figura 10-2 se presenta el perfil esquemático de las diferentes unidades hidrogeológicas a representar en el modelo, mientras que en la Figura 10-3 se muestra cómo se representó esta configuración mediante la adopción de tres capas, y que se describen a continuación.

**Figura 10-2 Perfil esquemático Modelo Conceptual**



Fuente: Elaboración propia

**Figura 10-3 Esquema de configuración geométrica vertical del área de Modelación**



Fuente: Elaboración propia

En el área del Núcleo del Salar y en la Zona Marginal Intermedia, hasta la interfase, la primera capa representa los depósitos salinos (principalmente halita) con salmuera presentes en los primeros 50 m, y en la que se localizan los pozos de extracción de salmuera. Esta capa más superficial tiene mayor

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

permeabilidad que las capas 2 y 3, que corresponden también a depósitos salinos con salmuera, más profundos y de menor permeabilidad, y que en el centro del Núcleo alcanzan una profundidad superior a los 400 m.

En la Zona Marginal Acuífero, situada entre la interfase salina y el límite con las subcuencas aportantes, la primera capa corresponde a los depósitos salinos y detríticos de grano fino, que contienen agua salobre y que se sitúan sobre la interfase salina. Por debajo se sitúan la capas 2 y 3, que representan la misma litología pero con salmuera intersticial, en vez de con agua salobre.

En las subcuencas aportantes al Salar, la primera y segunda capa representan los sedimentos que afloran en el borde Este del Salar que conforman el acuífero de agua dulce o salobre, y la tercera capa corresponde los mismos sedimentos pero rellenos de salmuera, es decir, bajo la interfase.

De esta forma, utilizando la superficie de la interfase como un límite de capas, se consigue representar en el modelo el fenómeno de intrusión de la cuña salina hacia el Este y Sur del Salar, hecho que ha sido confirmado por las medidas de conductividad en pozos y con la geofísica realizada en la zona.

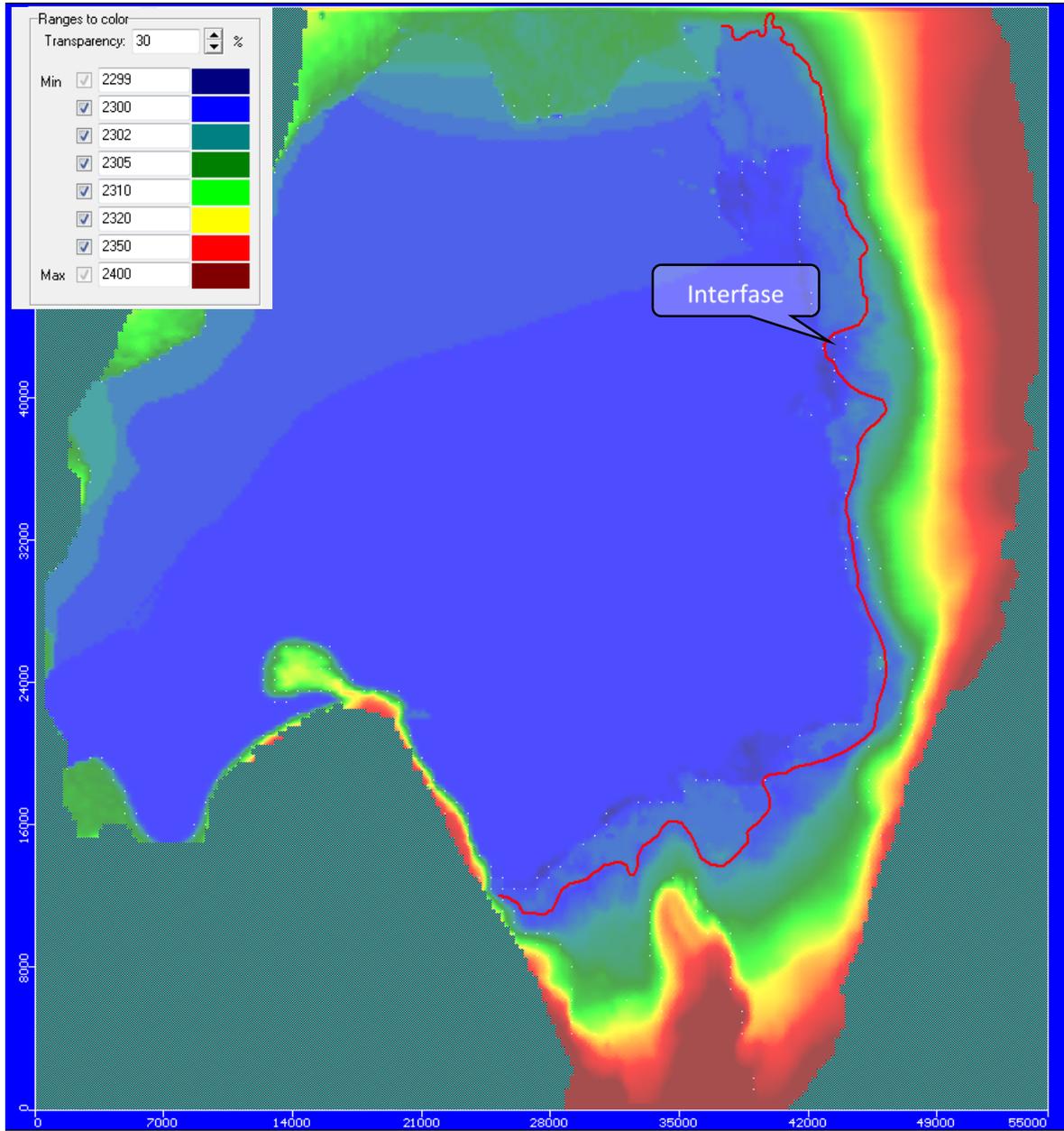
En las zonas que, por necesidades de configuración del modelo, dos capas representen una misma unidad hidrogeológica, como el caso de las capas 1 y 2 al oeste de la zona marginal y las capas 2 y 3 en el núcleo, éstas se configuran con las mismas propiedades hidráulicas (Permeabilidad y coeficiente de almacenamiento).

En la configuración geométrica del modelo, se utilizó el programa GIS para generar la superficie de la base da cada capa del modelo, además de la superficie topográfica del área. Para la base de las 3 capas se utilizó la información presentada en el capítulo de hidrogeología, utilizando los perfiles hidrogeológicos allí expuestos, y su interpolación entre ellos, para tener una buena cobertura del área del modelo.

La superficie topográfica se generó sobre la base de la información levantada con ocasión de este estudio y que se encuentra detallada en el punto 4.3 Topografía y en el punto 7 del Apéndice A Topografía del presente Anexo. Los archivos (SHP) generados son importados por el Visual MODFLOW para configurar la grilla del modelo.

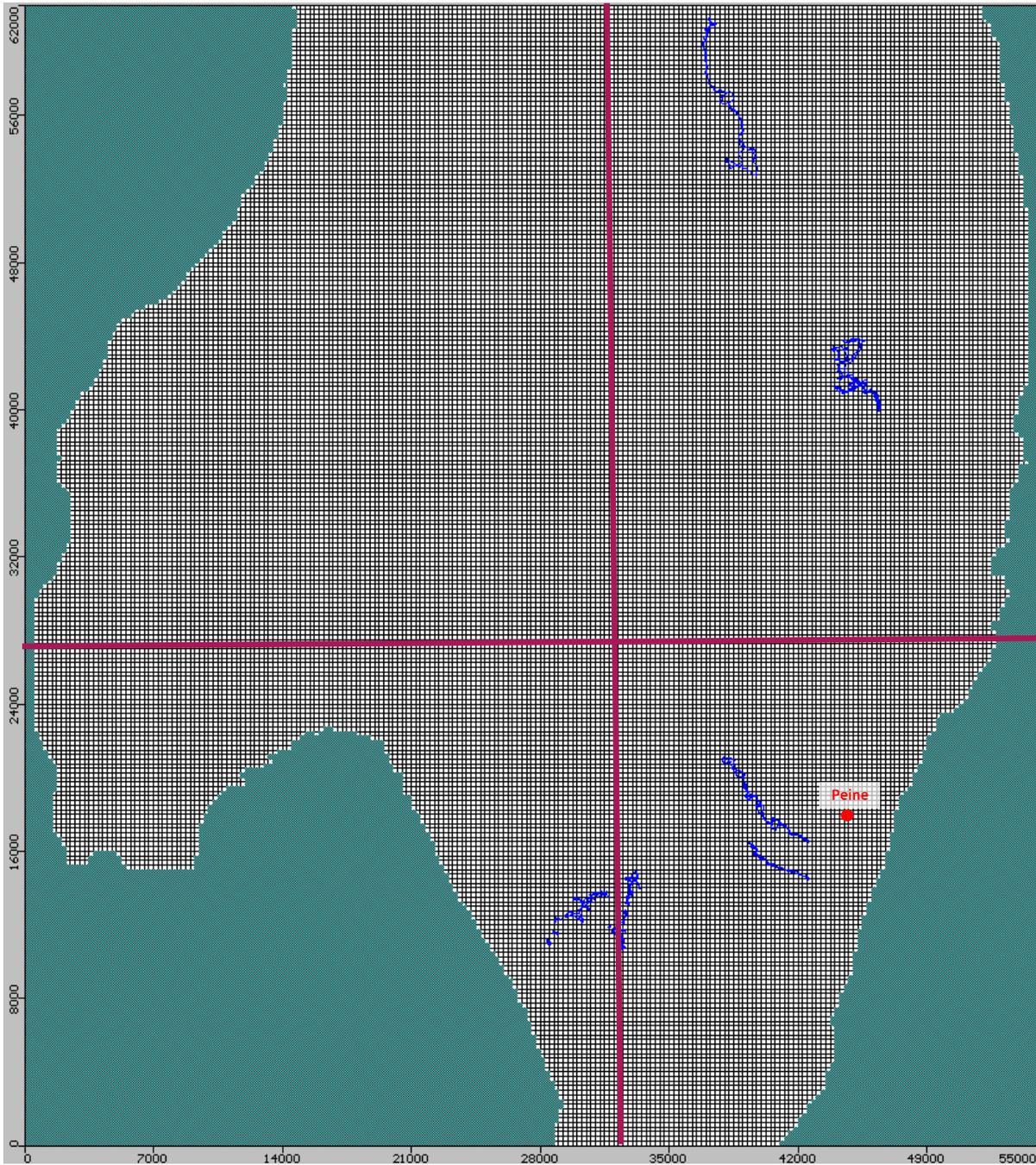
En la Figura 10-4 se muestra la elevación topográfica adoptada en el modelo y en la Figura 10-5 se muestra la grilla del modelo donde la línea de contacto roca-sedimentos limita el área de celdas activas e inactivas. Las dos líneas vertical y horizontal corresponden a la fila y columna del modelo que se muestran en los perfiles de la Figura 10-6.

**Figura 10-4 Elevación topográfica modelo MODFLOW (msnm)**



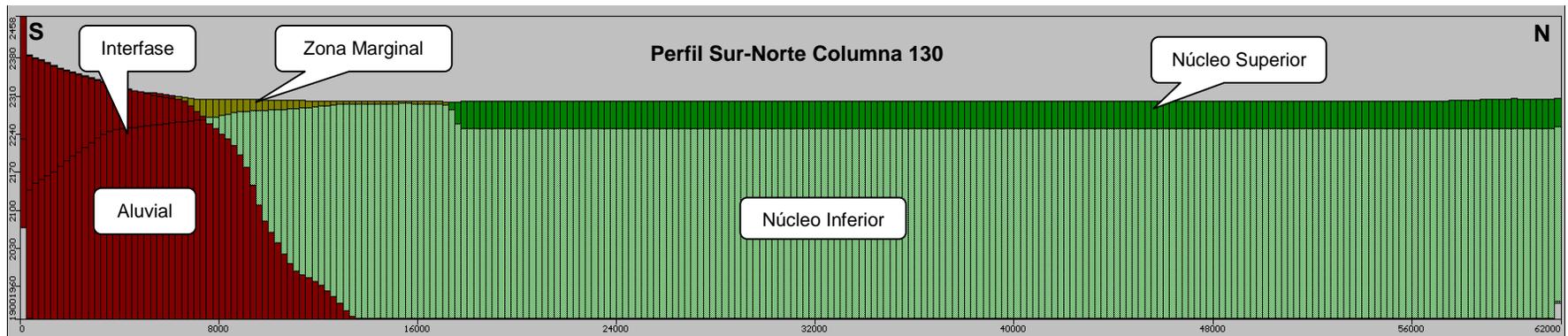
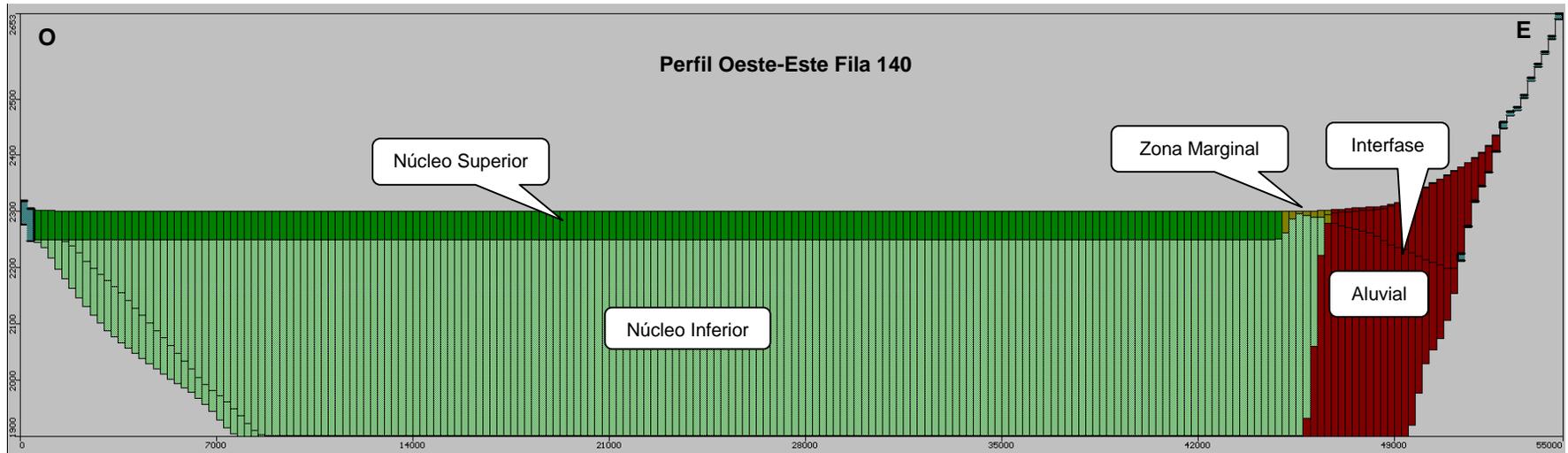
Fuente: Elaboración propia (Output Visual MODFLOW)

**Figura 10-5 Área Grilla Modelo**



Fuente: Elaboración propia (Output Visual MODFLOW)

**Figura 10-6 Perfiles de la Malla del Modelo**



Fuente: Elaboración propia (Output Visual MODFLOW)

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

### 10.2.2.2 Parámetros Hidráulicos

#### Conductividad hidráulica

Con la distribución de los valores puntuales de permeabilidad presentados en el Capítulo 8. Hidrogeología, obtenidos de pruebas de bombeo y recopilados de terceros y, considerando las unidades hidrogeológicas descritas en el mismo capítulo (ver Figura 8-8 y Figura 8-9) se generaron mapas con macro-zonas donde el valor de K fuera uniforme para el inicio de la calibración del modelo. Esto se realizó dividiendo el área del modelo en polígonos agrupando los puntos que presentan valores similares de permeabilidad, adoptando el valor promedio de las pruebas de bombeo representativas del polígono. En el caso de valores discrepantes ubicados en zonas próximas se utilizó como criterio adoptar aquellos valores obtenidos en pruebas de bombeo frente a otros métodos (Lefranc, Slug Test).

En los polígonos sin pruebas se asignaron valores basados en la caracterización de las unidades hidrogeológicas a que pertenecen y/o se tomaron en cuenta, además, la distribución de permeabilidad presentada en la segunda actualización del modelo numérico de SQM (Geohidrología, 2013) y que se muestra en la Figura 3-8.

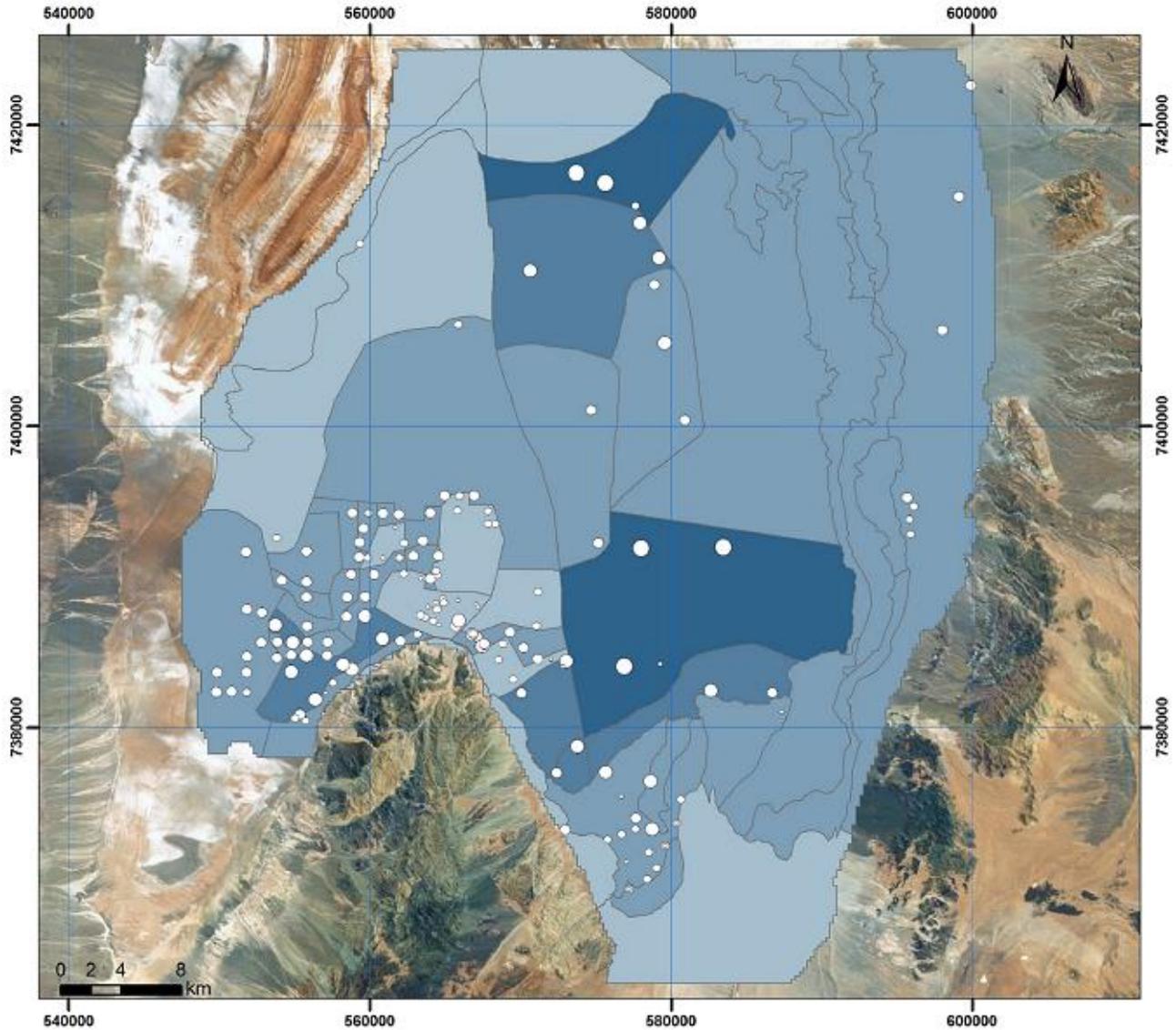
Estos polígonos de conductividad sólo se han definido para la capa 1 en el Núcleo y en la Zona Marginal Intermedia, cuyas cotas van 2.300 a 2.250 msnm. A la capa 2 inferior (con cota comprendida entre 2.250 y 1.900 msnm.) se le asignó un valor inicial homogéneo de  $5 \times 10^{-2}$  m/día en atención a que la mayoría de los valores disponibles se encuentran en el rango  $10^{-2}$  y  $10^{-1}$  m/día. En lo referente a las fallas, las cuales fueron descritas en el capítulo de Geología (sección 3.1.3.2.) sólo se representó en el modelo la Falla de Salar, debido a su mayor entidad, como límite inicial de zonas de permeabilidad en el modelo en la capa 1. Se considera que, debido al comportamiento dúctil de las evaporitas, el efecto de la presión litostática hace similar las características hidráulicas en profundidad a un lado y otro de la Falla de Salar.

Para representar la condición de no flujo que genera la presencia de la interfase salina, a los materiales (evaporíticos y aluviales) situados bajo el límite de la interfase, se le asignó una permeabilidad menor que aquellos que están sobre este límite, en este caso  $5 \times 10^{-2}$  m/d, representando de esta manera la condición de no flujo inferida para la interfase. Esto explica que la descarga del flujo subterráneo en la Zona Marginal se realice mediante evaporación o por los afloramientos que alimentan los sistemas de lagunas, de acuerdo al modelo conceptual explicado en el punto 9.1.1.

Los materiales asignados a la Unidad Hidrogeológica de Baja Permeabilidad (correspondientes a la Formación San Pedro, Paleozoico Cordón de Lila, entre otras) se han definido como celdas inactivas del modelo por lo que no se le asignaron parámetros hidráulicos.

En la Figura 10-7 se representan los puntos con el valor de conductividad hidráulica para la capa superior del modelo, que definieron los polígonos de conductividad para el inicio de la calibración.

**Figura 10-7 Distribución conductividad hidráulica inicial de la capa superior**



**Pruebas de permeabilidad Distribución inicial permeabilidad hidráulica**

**K**

- < 1 m/día
- 1 - 10 m/día
- 10- 100 m/día
- 100 - 1000 m/día
- >1000 m/día

**K**

- < 1 m/día
- 1- 10 m/día
- 10-100 m/día
- 100-1000 m/día
- > 1000 m/día

Fuente: Elaboración propia

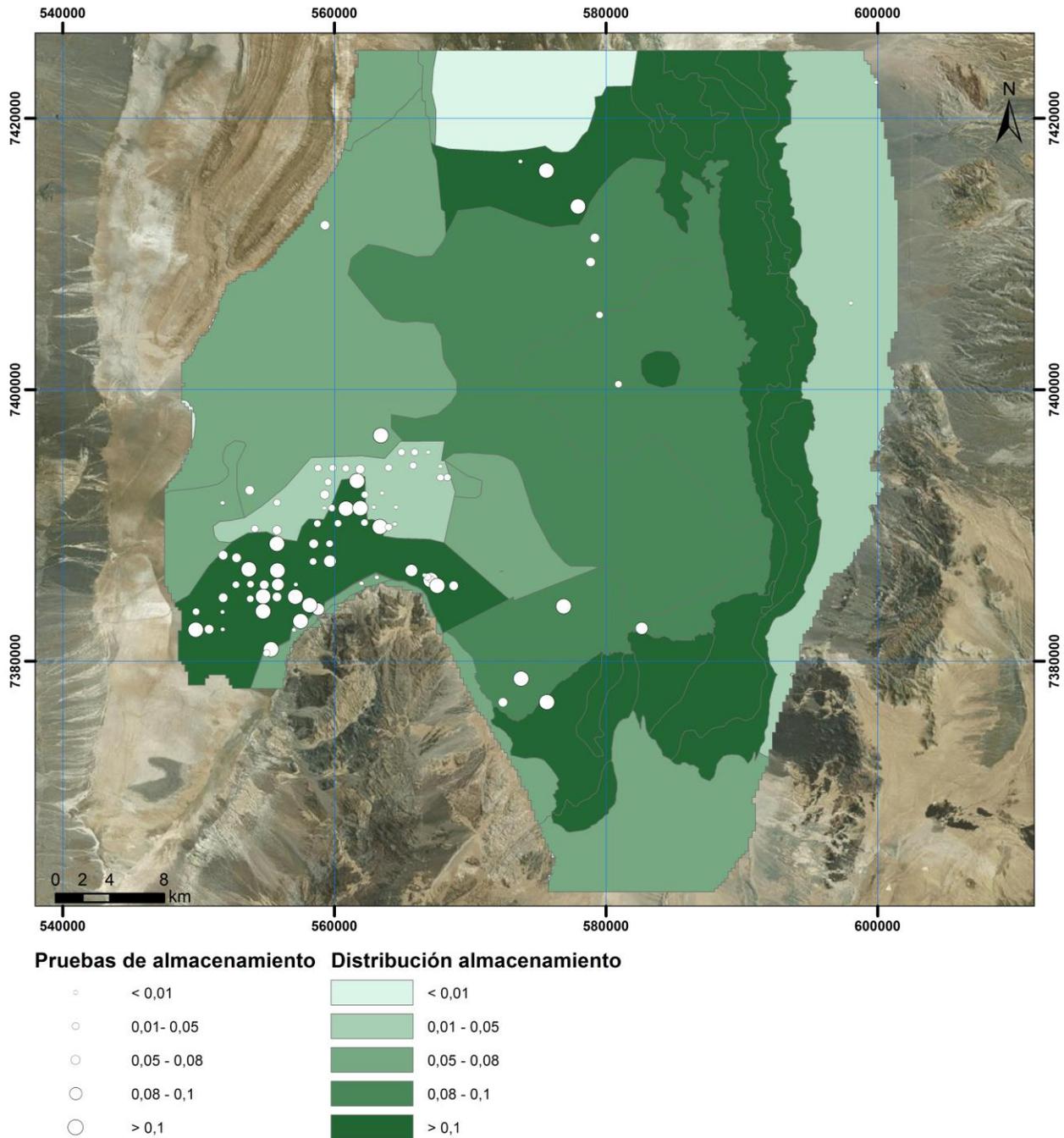
	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

### Coeficiente de almacenamiento

Para asignar el coeficiente de almacenamiento a las distintas áreas se procedió de manera similar a la conductividad hidráulica. Para el área de modelación se definieron diferentes polígonos con coeficiente de almacenamiento dentro del rango de valores recopilados para cada sector de la cuenca y que también se describen en el Capítulo 8. Hidrogeología (ver Figura 8-10). La Figura 10-8 representa los polígonos definidos para el inicio de la calibración del modelo junto con las localizaciones con valores de coeficiente de almacenamiento.

En los polígonos en los que no existe información para este parámetro, se asignaron valores basados en las unidades hidrogeológicas a que pertenecen. Los valores anormalmente altos no se tuvieron en cuenta ya que se asume que debieran representar condiciones muy locales que no son representativos de la unidad. En las zonas del núcleo en las que no se disponía de información, se les asignó un valor en función del mapa de porosidad drenable reportada por Geohidrología (2013), el cual se ha mostrado en la Figura 8-2.

**Figura 10-8 Distribución coeficiente de almacenamiento inicial de la capa superior**



Fuente: Elaboración propia

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

### 10.2.2.3 Discretización temporal

Considerando que se trata simular escenarios a largo plazo, se determinó que una escala mensual de intervalo de tiempo es suficiente para representar las acciones variables en el tiempo aplicadas al modelo, como recargas y bombeos.

Estos periodos de simulación, mensuales, en la ejecución del modelo son divididos en 10 pasos de tiempo (*Time Steps*) con un valor multiplicador de 1,2 (*Multiplier*), factor que define el incremento de cada paso de tiempo en el periodo mensual.

El horizonte de tiempo utilizado en la modelación se extiende desde noviembre de 1997, fecha elegida como la más antigua con información suficiente, principalmente registro de niveles, y con el sistema en relativo equilibrio. Conforme a ello, el año 1997 ha sido escogido para la calibración permanente del modelo.

De acuerdo con lo anterior, la discretización temporal en cada etapa de la simulación es la siguiente:

- Calibración transiente:      noviembre 1997 – diciembre 2008      →      134 periodos
- Validación:                      enero 2009 – diciembre 2013              →      60 periodos
- Simulación escenarios:      enero 2014 – diciembre 2065              →      624 periodos

### 10.2.2.4 Condiciones de Borde

Las condiciones de borde del modelo, que definen el comportamiento hidrogeológico del modelo de flujo, se definieron en concordancia a la dinámica del sistema establecida en el modelo conceptual y balance hídrico presentado en el capítulo anterior. A continuación se detallan las condiciones de borde aplicadas al sistema.

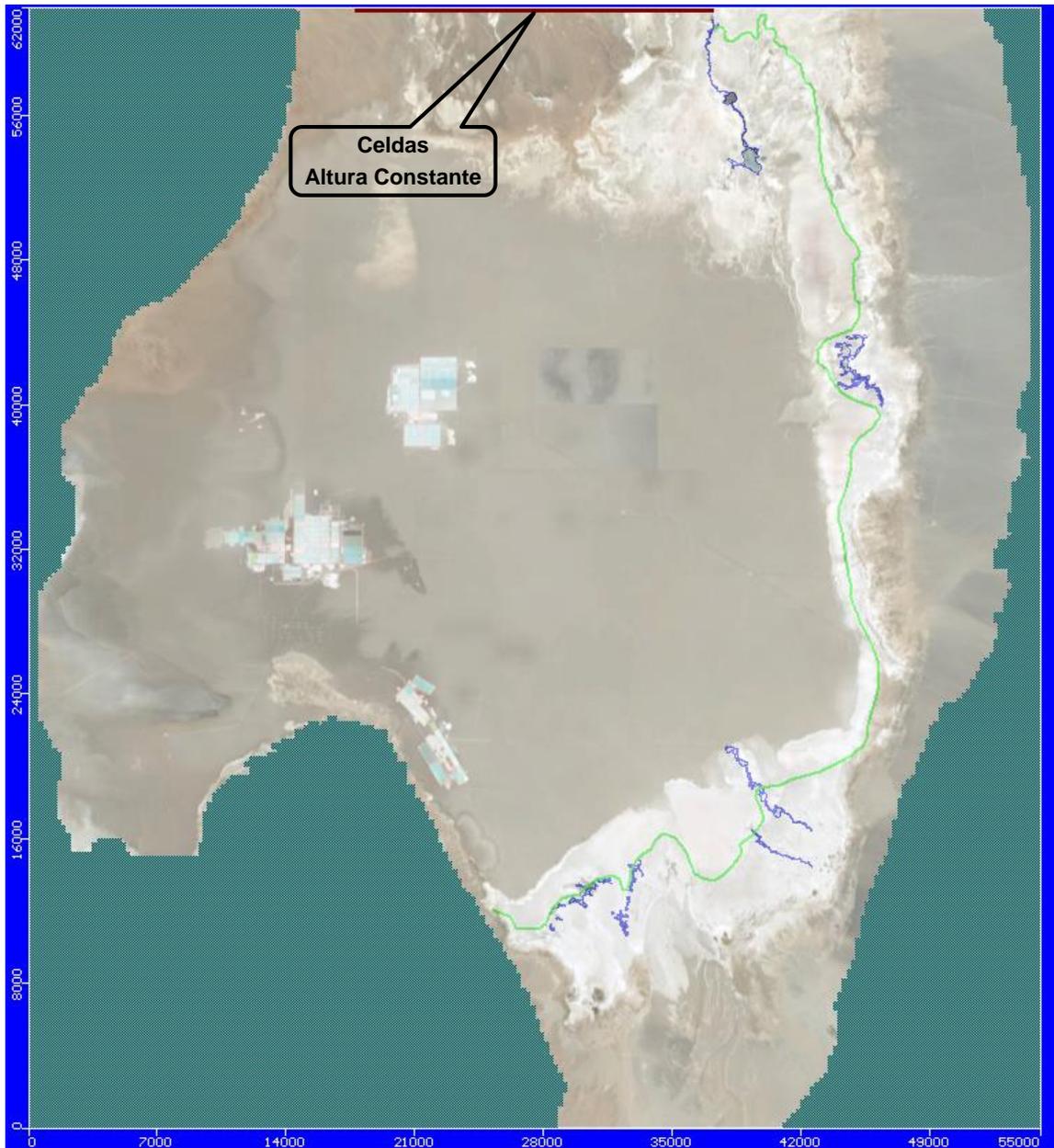
#### 10.2.2.4.1 Flujo Subterráneo desde el Norte del Salar

Considerando que el límite Norte del modelo atraviesa el Núcleo del Salar, el flujo subterráneo proveniente desde el Norte, específicamente de las subcuencas 1, 2, 3, 4, 5, 14 y 16N definidas en el balance hídrico, debe ingresar al área del modelo como flujo entrante (recarga norte).

Para la calibración permanente este flujo se genera con la condición de borde de *altura constante*, y su valor debe ser similar al calculado en el balance hídrico, de 679 L/s, como se muestra en la Tabla 9-15. Para esto, se fijó en la fila 1 de las tres capas del modelo (límite Norte) valores de altura constante entre la cota 2.303,8 msnm. (columna 72) y 2.301,8 msnm. (columna 149). Estos valores fueron definidos sobre la base de información de la superficie freática elaborada por Rockwood para el año 1997, y que se muestra en la Figura 8-48. En la Figura 10-9 se muestra la ubicación de las celdas de altura constante implementadas en el modelo numérico.

En el modelo transiente (calibración y simulación de escenarios), este flujo es variable mensualmente según los valores obtenidos para el balance hídrico mensual descrito en punto 9.3.3 (cuyos resultados en el Apéndice K), y es implementado en el modelo mediante *pozos de inyección*.

**Figura 10-9 Celdas de Altura Constante en Recarga desde el Norte**



Fuente: Elaboración propia

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

#### 10.2.2.4.2 Recarga Directa en el Área del Modelo

La precipitación directa que cae sobre el área del modelo, gran parte de ella es inmediatamente evaporada. Para precipitaciones de poca magnitud ésta no alcanza a generar una infiltración que alcance nivel freático en el Salar. Sin embargo, para eventos de lluvia importantes sí se produce una infiltración que recarga al acuífero.

Para cuantificar la recarga directa por precipitación en el Núcleo y en la Zona Marginal Intermedia (hasta la interfase) según se analiza en el punto 9.3.1 Balance hídrico en la Cuenca del Salar de Atacama, se utilizó la expresión propuesta en el informe del Dictuc (2004b), que estima en 5 mm la evaporación que ocurre instantáneamente después de la precipitación que alcanza la costra del Salar, y que sobre este valor el agua caída infiltra al acuífero de salmuera en el Salar. Adicionalmente, y como se explica en el mismo punto, se consideró que cuando la precipitación efectiva es mayor a 13 mm, de la excedencia sólo infiltra un 10%. De acuerdo con los cálculos expuestos en el balance hídrico, donde la precipitación se asignó según método de polígonos de Thiessen asociados a las tres estaciones pluviométricas ubicadas en el Salar, los valores de precipitación y recarga aplicados al modelo como valor medio de recarga, calculada sobre la estadística de precipitaciones de 1990 a 2013 y aplicada al régimen permanente, son los siguientes:

**Tabla 10-1 Recarga por precipitación directa en Núcleo y Zona Marginal Intermedia**

Polígono	Área (Km <sup>2</sup> )	Pp Efectiva (mm/año)	Pp Efectiva (L/s)	Recarga Modelo (m/d)
Chaxa SQM	468	4,79	71	1,31·10 <sup>-5</sup>
Salar SQM	674	1,91	41	5,23·10 <sup>-6</sup>
Planta SCL	568	3,74	67	1,03·10 <sup>-5</sup>
Total	1.710	3,31	179	

Fuente: Elaboración propia

La recarga directa por precipitación estimada para la Zona Marginal Acuífero, de acuerdo con la metodología expuesta en capítulo 9, se ha obtenido utilizando el gradiente de altura de manera similar que en las subcuencas aportantes. El resultado de la recarga media de las zonas asociadas a cada subcuenca (régimen permanente), es la siguiente:

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

**Tabla 10-2 Recarga por precipitación directa en la Zona Marginal**

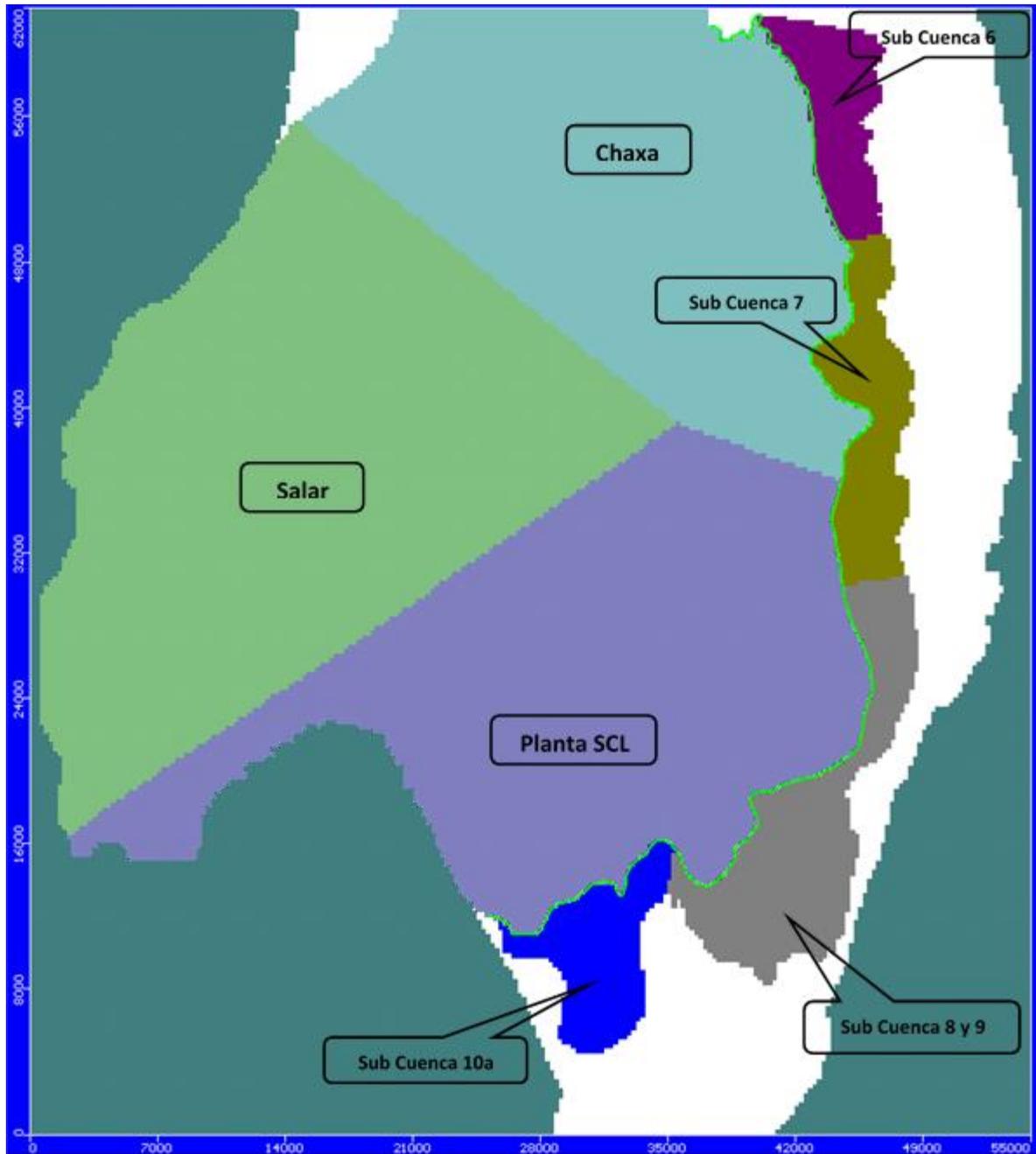
Subcuenca	Área (km <sup>2</sup> )	Pp efectiva (L/s)	Recarga Modelo (m/d)
6	42,39	10,7	$2,19 \cdot 10^{-5}$
7	59,64	8,9	$1,28 \cdot 10^{-5}$
8 y 9	98,38	7,5	$6,55 \cdot 10^{-6}$
10a	49,16	3,1	$5,48 \cdot 10^{-6}$
Total	249,57	30,2	

Fuente: Elaboración propia

Para el modelo transiente (calibración y simulación de escenarios), esta recarga en el Salar (Núcleo y Zona Marginal) es variable mensualmente según balance hídrico mensual desarrollado en punto 9.3.3 y es implementado en el modelo como celdas de recarga en la capa superior (los valores obtenidos para la recarga se presentan en el Apéndice K).

En la Figura 10-10 se muestra la configuración de la recarga por precipitación directa implementada en el modelo numérico, mediante celdas de recarga (RCH).

**Figura 10-10 Áreas de recarga en el modelo MODFLOW**



Fuente: Elaboración propia

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

#### 10.2.2.4.3 Recarga Subterránea Lateral

La recarga lateral subterránea afluyente al área del modelo fue determinada sobre la base del modelo de recarga hidrológico expuesto en el capítulo 9 Modelo Conceptual y Balance Hídrico. Para este cálculo, la cuenca del Salar de Atacama se dividió en 15 subcuencas afluentes al Salar. Los valores de recarga obtenidos para las subcuencas afluentes a las zonas Este y Sur se muestran en la Tabla 9-18, y son los valores ingresados al modelo.

Para la recarga proveniente de las subcuencas de la zona Oeste, los valores determinados en el balance hídrico se muestran en la Tabla 9-20, sin embargo, como se describe en el punto 9.3.2 Balance hídrico en el área del modelo, debido a que el modelo considera en este sector celdas inactivas dentro de las subcuencas, el valor ingresado al modelo es levemente menor. Este cálculo se muestra en los valores de recarga presentados en la Figura 9-47 y en la Tabla 9-23.

En la Tabla 10-3 se presenta la recarga subterránea ingresada en el modelo correspondiente a los aportes subterráneos laterales de las subcuencas aportantes.

**Tabla 10-3 Recarga subterránea desde las subcuencas afluentes al Salar**

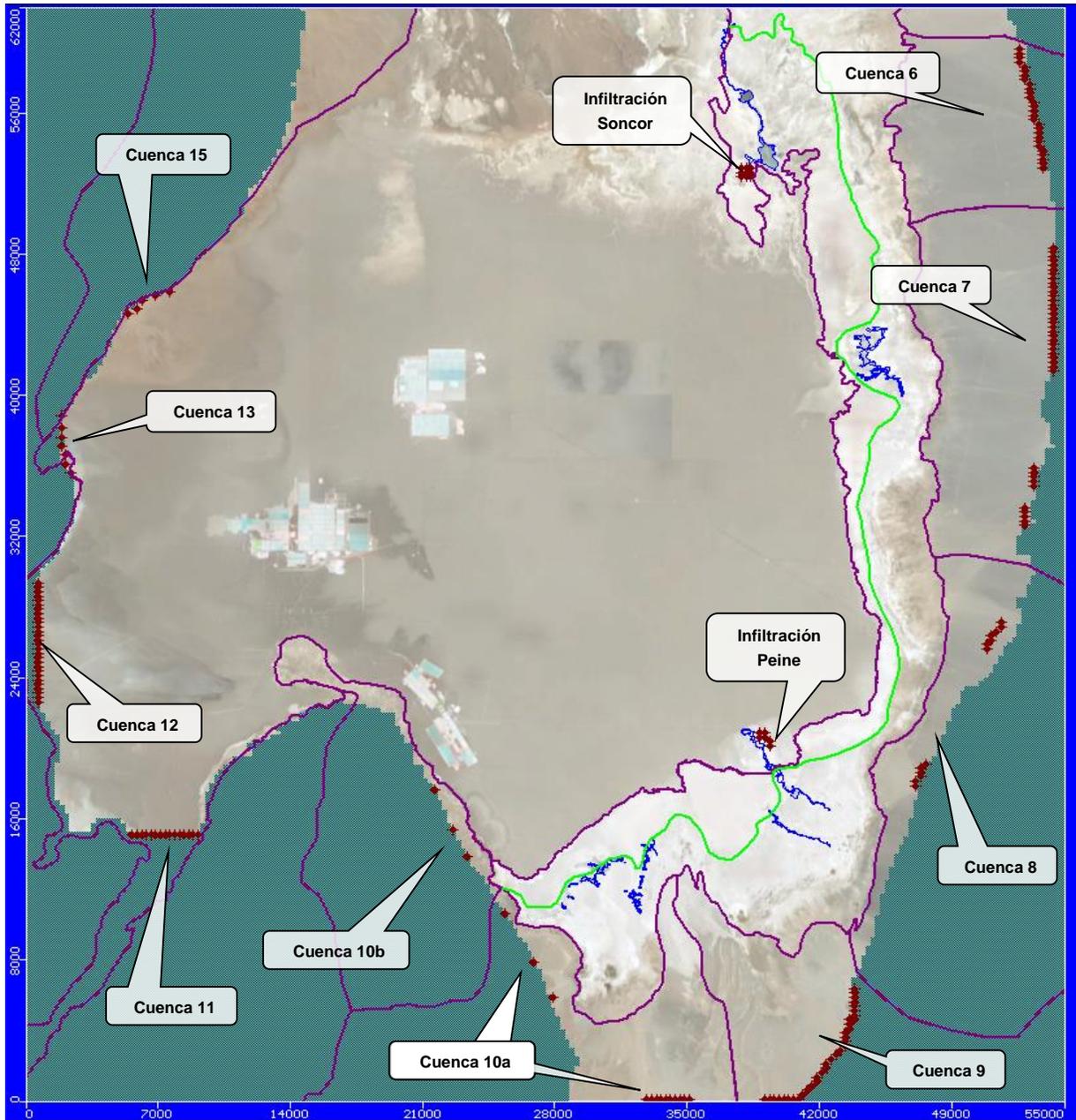
Subcuenca	Flujo Subterráneo (L/s)	Nº de Pozos de Inyección	Recarga Modelo (m <sup>3</sup> /d)
6	205	28	4.437
7	427	39	947
8	43	13	286
9	396	34	1.007
10a	612	10	5.287
<b>Total Zona Este-Sur</b>	<b>1.684</b>		
10b	4,6	6	66
11	86	15	496
12	8,1	28	25
13	90	7	1.108
15	6,9	5	119
<b>Total Zona Oeste</b>	<b>196</b>		

Fuente: Elaboración propia

La recarga lateral, calculada para las subcuencas aportantes hasta la zona marginal, se implementó en el modelo como pozos de inyección (Figura 10-11). Su ubicación tuvo en cuenta los criterios hidrogeológicos que definen direcciones preferenciales de flujo subterráneo para representar correctamente los gradientes hidráulicos conocidos. Las diferencias numéricas que pudieran existir entre esta implementación, cerca de los límites del modelo, e incorporar la recarga en el límite de las subcuencas con la Zona Marginal es

despreciable considerando que gran parte de la precipitación, y en consecuencia la recarga, se produce aguas arriba del límite de modelación.

**Figura 10-11 Pozos de recarga en modelo MODFLOW**



Fuente: Elaboración propia

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

#### 10.2.2.4.4 Recarga desde Lagunas

Esta recarga se refiere a la infiltración directa hacia el acuífero de salmuera que se produce en los sistemas lagunares, que son los de Soncor y de Peine, definido como parte del flujo que sobrepasa la interfase, de acuerdo a lo indicado en el capítulo 9 y con más detalle en el Apéndice I de este Anexo 1.

En el caso de Soncor, donde las lagunas se sitúan en la Zona Marginal Intermedia, el resultado del balance estima un flujo de 76 L/s que sobrepasa sub-superficialmente la interfase. Sin embargo, conforme al mismo balance de este sistema lagunar en condiciones promedio, sólo un flujo de 25 L/s se incorpora finalmente al acuífero de salmuera en el Núcleo.

En el caso del sistema Peine, parte del flujo sobrepasa superficialmente la interfase a través de los canales que comunican la laguna Saladita con la laguna Interna, y se estima que 11 L/s se incorporan directamente al acuífero de salmuera en el Núcleo desde la laguna Interna (Figura 9-39).

La recarga desde lagunas se implementó en el modelo como pozos de inyección, 9 pozos en el caso de Soncor y 6 en el caso de Peine, y su ubicación dentro del Núcleo se muestra en la Figura 10-11.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

#### 10.2.2.4.5 Recarga Total

De acuerdo con lo expuesto, la recarga total del sistema, directa sobre el área modelada, flujo subterráneo lateral (subcuencas), flujo desde el Norte, e infiltración desde lagunas, calculadas como valores medios que se aplican al modelo permanente, se resume en la Tabla 10-4:

**Tabla 10-4 Recarga incorporada en el área del modelo**

<b>Subcuenca o Zona</b>	<b>Recarga (L/s)</b>	<b>Total (L/s)</b>
<b>Flujo desde el Norte Salar</b>	679	<b>679</b>
<b>Directa Núcleo y Zona Marginal Intermedia</b>		
Chaxa SQM	71	<b>179</b>
Salar SQM	41	
Planta SCL	67	
<b>Directa Zona Marginal Acuífero</b>		
Subcuenca 6	11	<b>30,2</b>
Subcuenca 7	8,9	
Subcuencas 8 y 9	7,5	
Subcuenca 10a	3,1	
<b>Lateral Zona Este-Sur</b>		
Subcuenca 6	205	<b>1.684</b>
Subcuenca 7	427	
Subcuencas 8	43	
Subcuenca 9	396	
Subcuenca 10a	612	
<b>Lateral Zona Oeste</b>		
Subcuenca 10b	4,6	<b>196</b>
Subcuenca 11	86	
Subcuenca 12	8,1	
Subcuenca 13	90	
Subcuenca 15	6,9	
<b>Lagunas</b>		
Sistema Soncor	25	<b>36</b>
Sistema Peine	11	
<b>TOTAL MODELO</b>		<b>2.804</b>

Fuente: elaboración propia

Estos valores de recarga, determinados a nivel medio anual, son implementados en el modelo numérico como celdas de recarga o pozos de inyección, y se verifica en la ejecución del modelo (permanente y transiente) que éste represente los valores de recarga determinados por el balance hídrico.

#### 10.2.2.4.6 Evapotranspiración

La descarga natural del sistema modelado, tanto del acuífero del Núcleo como de la Zona Marginal, se realiza a través de la evapotranspiración desde la superficie freática que se encuentra a poca profundidad

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

respecto de la superficie. La aplicación de esta descarga requiere definir zonas de evapotranspiración y su tasa de evaporación en función del nivel de agua bajo la superficie.

En el punto 6.4 del capítulo de Hidrología y 9.2.4.2 del capítulo de Modelo Conceptual y Balance Hídrico de este Anexo 1, se explica en detalle la metodología y cálculo de tasas de evaporación para cada área del Salar, tanto en el Núcleo como Zona Marginal.

La delimitación de las zonas de evaporación, basadas en las definidas por Mardones (1984) fueron implementadas en el modelo como se muestra en la Figura 10-12, subdividiéndolas según su posición con respecto a la interfase salina, aguas arriba de la interfase denominada Zona Marginal Acuífero (ac) y aguas abajo de la interfase denominada Zona Marginal Intermedia (int).

Para cada zona de evaporación, se definió una curva de evaporación (tasa de evaporación vs profundidad), conforme se explica en detalle en el Apéndice J del presente Anexo. A partir de estas curvas, considerando una profundidad del nivel freático representativa de cada zona, se definió una tasa de evaporación para una fecha determinada que, como se ha indicado, que la calibración del modelo en régimen permanente corresponde al año 1997. Así, para cada zona se determinó el caudal de evaporación utilizado en el balance hídrico desarrollado que en detalle se explica en el punto 9.3, que se muestra en la Tabla 10-5 a continuación:

**Tabla 10-5 Flujo de evaporación por zonas (L/s)**

<b>Zona Mardones</b>	<b>Agua salobre</b>	<b>Intermedia</b>	<b>Núcleo/Lagunas</b>
A1	95,4		
A2	16,3	0,7	
A3	18,6	34,1	
A4	802,6		
A5	625,3		
A6		3,5	
A7	495,0	9,6	
A8-1	32,5		
A8-2	189,1		
A9-1	53,8	46,1	
A9-2	52,1	21,9	
A10-1	45,3	11,5	
A10-2	381,8	49,0	
A11- lagunas			704,7
A12	777,8		
A13 – núcleo			1117,7
<b>Total (L/s)</b>	<b>3585,7</b>	<b>176,4</b>	

Fuente: elaboración propia

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

Para implementar la evapotranspiración en el modelo y representar la variabilidad de este parámetro en función de la profundidad de la superficie freática, se utilizó la subrutina del MODFLOW ETS (Evapotranspiration Segments Package), que permite obtener la curva de evaporación mediante dos o más segmentos. Se eligió la representación de dicha curva mediante dos segmentos, debido a que con éstos se logró representar adecuadamente las tasas de evaporación estimadas, evitando inestabilidades numéricas en el modelo. Conforme a ello, además de la profundidad de extinción de la evaporación y del valor de ésta en superficie, se incorporó un punto intermedio de evaporación-profundidad de acuerdo con la curva de evaporación definida para cada zona, como se muestra en la Figura 10-13.

Para definir los parámetros de profundidad de extinción y valor de la evaporación para la profundidad del nivel en cada zona de evaporación, se consideraron las curvas Evaporación-Profundidad desarrolladas por SGA-Rockwood a partir de las mediciones con domos en 23 puntos del Salar, cuyos resultados y metodología se describe en el Capítulo 6 Hidrología y, con más detalle, en el Apéndice J Evaporación de este Anexo 1.



	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

Cabe precisar que los sistemas lagunares son representados en el modelo como afloramientos de agua subterránea que posteriormente alimentan las lagunas a través de flujos superficiales. Es por esto que las celdas que corresponden a áreas de laguna, no se asignan como zona de evaporación, ya que el agua que éstas evaporan está considerada como una salida del modelo desde las celdas Dren (afloramientos).

En tanto, las celdas que representan los afloramientos de agua que alimentan las lagunas, representadas como celdas tipo Dren, tampoco se asignan como zona de evaporación, ya que celdas con dos condiciones de borde presentan problemas en la convergencia del modelo. Estas celdas excluidas de las zonas de evaporación por las razones mencionadas se establecieron en el modelo con valor cero (celdas color rojo en Figura 10-12).

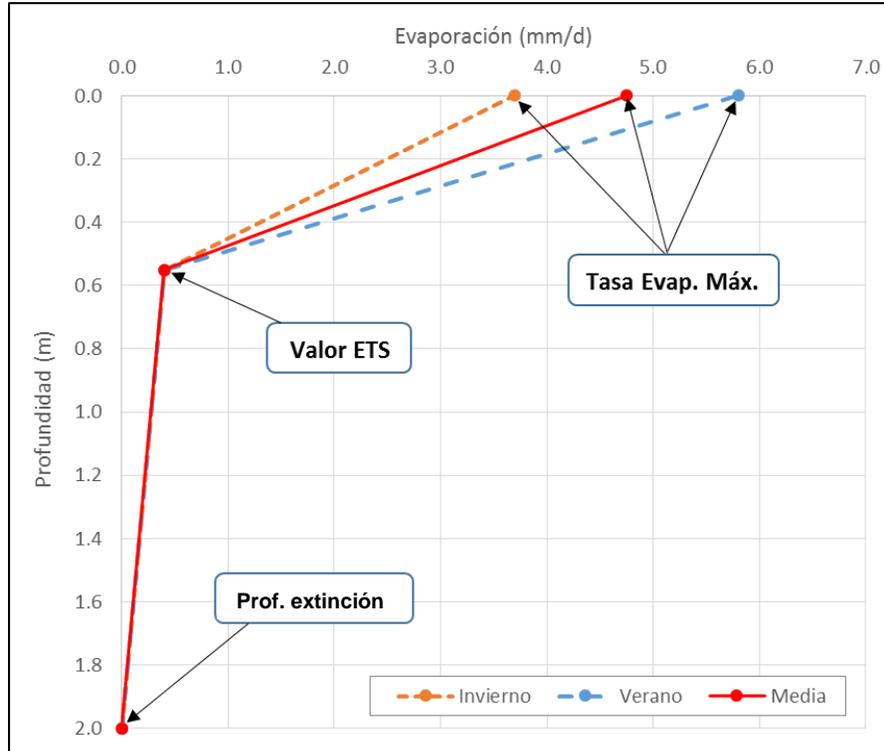
Cabe señalar que la evaporación desde la superficie freática es muy sensible a la profundidad de ésta bajo la superficie, en especial cuando el nivel se encuentra a menos de 1 m de profundidad. En este sentido, la precisión con que se define en el modelo la cota de la superficie de terreno y la posición que adopta el nivel de agua toma relevancia en la tasa de evaporación que utiliza en el cálculo de la evaporación en el balance hídrico. En la Zona Marginal, donde se produce gran parte de la evaporación, y en el Núcleo, Rockwood realizó un levantamiento topográfico de detalle de manera de disponer de una representación lo más precisa posible de la superficie del terreno. Este levantamiento ha significado una mejora significativa, respecto a estudios anteriores, pasando la precisión de varios metros, a menos de 0,5 m (ver Apéndice A), por lo que se considera suficiente para representar la profundidad del nivel freático en toda la zona de evaporación del modelo, teniendo en cuenta además su gran extensión.

De acuerdo con el análisis de los niveles medidos en pozos ubicados tanto en la Zona Marginal como en algunos de los ubicados en el Núcleo (punto 8.3 Evolución de niveles y superficie freática), éstos presentan oscilaciones periódicas entre invierno y verano. Esto es debido a que el nivel freático, que se encuentra muy próximo a la superficie del terreno, queda fuertemente expuesto a la evaporación, cuya tasa máxima es mayor en verano que en invierno, haciendo descender los niveles en verano y ascender en invierno. Esta variabilidad se debe a que la tasa de evaporación está sujeta a las condiciones climáticas diferentes entre invierno y verano (temperatura, humedad, etc.). Además, la evaporación también es mayor cerca de la superficie del terreno y menor en profundidad. Para representar estas oscilaciones de nivel se definió, una tasa máxima de evaporación de verano y una de invierno (en superficie), tal y como se explica en el Apéndice J. En régimen permanente se utilizó como tasa máxima de evaporación en superficie, el valor medio de las curvas anteriores.

En la Tabla 10-6 se muestran los parámetros que definen la evapotranspiración de la superficie freática para cada zona de evaporación mostrada anteriormente. Los valores indicados corresponden a los determinados para definir las curvas de evaporación de cada zona, que se muestran en el Apéndice J: Estimación de Tasas de Evaporación y Evapotranspiración en el Salar de Atacama del presente Anexo, y que se consideraron para definir las tasas de evaporación que se utilizaron en la resolución del balance

hídrico desarrollado anteriormente. Estos parámetros se representan, a modo de ejemplo, en la siguiente curva esquemática de evaporación considerando dos segmentos (ver Figura 10-13).

**Figura 10-13 Curva de evaporación modelo dos segmentos**



	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

**Tabla 10-6 Parámetros de evapotranspiración**

Zona de Evaporación	Descripción	Profundidad Extinción (m)	Tasa Evaporación Máxima			Valores ETS	
			Media (m/d)	Verano (m/d)	Invierno (m/d)	% Prof Extinción	% Evap Max
2	A2 Ac	2	3,59	4,70	2,48	21,25	8,35
3	A13 Nucleo Sureste	2	2,90	3,80	2,00	20,00	3,98
4	A3 Ac	2	4,04	5,29	2,79	20,00	5,30
6	A7 Ac	2	3,67	4,80	2,54	20,00	6,81
7	A9-1 Ac	2	4,15	5,43	2,87	20,00	10,33
8	A9-2 Ac	2	3,82	5,00	2,64	15,00	3,92
9	A13 Nucleo sur-oeste	2	2,90	3,80	2,00	20,00	3,98
10	A10-1 Ac	2	4,25	5,00	3,50	17,50	7,06
11	A10-2 Ac	2	3,82	5,00	2,64	20,00	5,23
12	A-12 Ac	2	4,59	6,00	3,17	22,50	5,45
14	A3 Int	2	2,83	3,70	1,96	20,00	5,30
15	A6 Int	2	2,68	3,50	1,85	20,00	3,92
17	A9-1 Int	2	2,91	3,80	2,01	20,00	10,33
18	A9-2 Int	2	3,60	4,71	2,49	30,00	3,61
19	A10-1 Int	2	2,98	3,50	2,45	17,50	7,06
20	A10-2 Int	2	2,72	3,56	1,88	20,00	5,23
22	A2 Int	2	3,08	4,02	2,13	21,25	8,35
26	A-12 Ac Tibpozo	2	4,59	6,00	3,17	22,50	5,45
27	Nucleo sur-este	2	2,90	3,80	2,00	20,00	3,98
28	A-12 Ac Tibmonte	2	4,59	6,00	3,17	22,50	5,45
29	A13 Nucleo norte	2	2,90	3,80	2,00	20,00	3,98
30	A13 Nucleo centro-norte salar	2	2,90	3,80	2,00	20,00	3,98
31	A-7 Ac Subcuenca 6	2	3,67	4,80	2,54	20,00	6,81

Ann: zona de evaporación (base Mardones)

Ac: acuífero agua salobre

Int: zona marginal intermedia

Fuente: Elaboración propia

#### 10.2.2.4.7 Afloramientos

Como se describió en el capítulo 9, específicamente en el punto 9.1.2 Comportamiento Hidrogeológico de las lagunas, éstas se alimentan del agua que alcanza la Zona Marginal procedente de las subcuencas aportantes del Sur y Este del Salar, la cual se canaliza de manera preferente a través de “callejones” situados entre materiales geológicos de muy baja permeabilidad. Una vez que alcanza la parte topográficamente más baja de la cuenca, se encuentra con la salmuera del núcleo y el agua salobre se ve forzada a ascender hasta niveles cercanos o que alcanzan la superficie del terreno. En esta situación el agua salobre sale del sistema debido a los efectos de la evaporación, pudiéndose dar dos casos: (1) sale por evaporación desde el terreno, en los sectores donde la evaporación es mayor que el potencial caudal

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

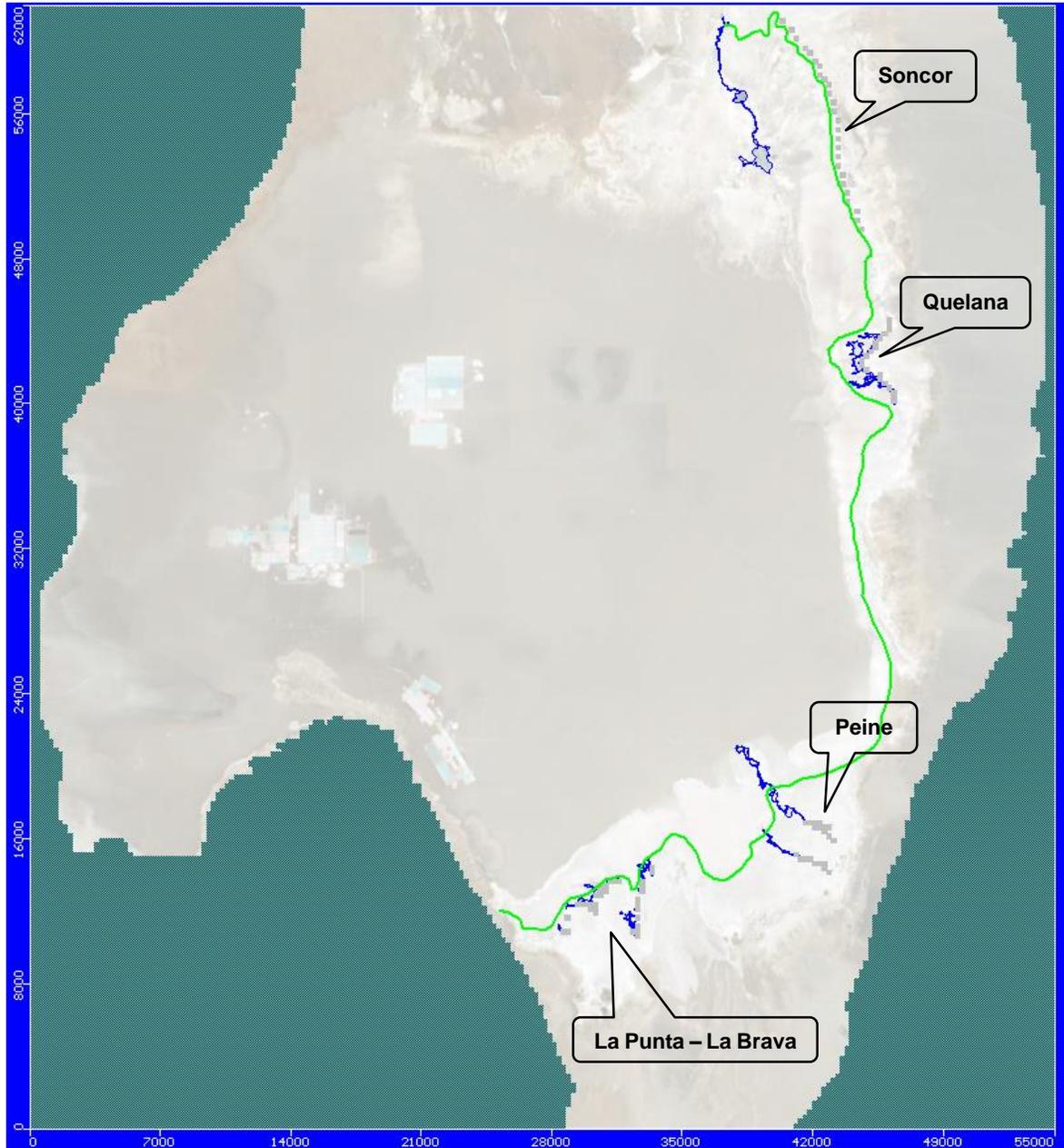
de descarga sin que el agua aflore en superficie. En este caso no se forman lagunas, sino extensas áreas con el nivel freático muy próximo a superficie, implementado en el modelo como se describió en el punto anterior a través de las curvas de evaporación; (2) sale por evaporación directa desde los sistemas lagunares alimentados por los afloramientos de agua que ocurren en el lugar porque la evaporación desde el terreno es menor al caudal de descarga. Las características de la alimentación de cada uno de estos sistemas lagunares se describe en el Apéndice I.

Para representar los afloramientos de agua que alimentan las lagunas, se definieron en el modelo celdas tipo Dren, ubicadas en las zonas detectadas de afloramientos de acuerdo a imágenes satelitales y observación en terreno. Las propiedades físicas de la celda dren son la cota de fondo y la conductancia. En la Figura 10-14 se muestra la ubicación de las celdas tipo *Dren*. Los caudales de afloramientos que se generen en estas celdas deben representar los caudales que mantienen las lagunas, descritos en el Apéndice I, estimados a partir del área de las lagunas y la tasa de evaporación de la superficie libre (Apéndice J) y cuyos valores se muestran en la Tabla 10-7. Estos valores representan un valor promedio de afloramiento, calculados sobre la base de una superficie media de las lagunas.

**Tabla 10-7 Caudal medio afloramientos**

<b>Sistema Lagunar</b>	<b>Caudal (L/s)</b>
Soncor	76
Aguas de Quelana	142
Peine	79
La Punta – La Brava	113

**Figura 10-14 Descarga en celdas tipo Dren**



Fuente: Elaboración propia

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

### 10.2.3 Calibración del modelo

#### 10.2.3.1 Metodología

La calibración del modelo consiste básicamente en variar sistemáticamente ciertos parámetros con el objetivo de reproducir lo más fielmente posible ciertas variables observadas, que en el caso de un modelo de flujo usualmente son los niveles piezométricos medidos. Los parámetros involucrados en la calibración son principalmente la conductividad hidráulica y el coeficiente de almacenamiento, cuyos valores iniciales son los estimados en el capítulo de hidrogeología y que el proceso de calibración debe mantener los valores dentro de un rango realista.

El proceso de calibración, considera en primer lugar, realizar la calibración para el régimen permanente que busca reproducir los niveles piezométricos del año de calibración de esta condición y el balance hídrico resuelto en el modelo conceptual. La calibración en régimen transiente busca además reproducir la evolución de niveles en el tiempo considerando las variaciones históricas de precipitaciones y bombeos, y demás procesos considerados en el balance.

En este proceso general de calibración (permanente y transiente), la distribución de las tasas de recarga superficial y flujo de recarga lateral son asignados bajo cierto criterios hidrogeológicos, de manera de que el modelo reproduzca el balance hídrico, es decir, caudales de entrada y salida del sistema, para cada una de las subcuencas consideradas. Las entradas del sistema, determinadas en el balance hídrico, son impuestas en el modelo como celdas de recarga, pozos de inyección o generada por condición de altura constante, para reflejar que se produzcan las recargas impuestas en todo instante de tiempo. Las salidas del modelo (descargas), en este caso evaporación, afloramientos y bombeos, deberán ser verificadas de tal manera que el modelo reproduzca los valores estimados en el balance hídrico (para los procesos naturales). También se debe reproducir el efecto de la interfase salina, que limita el flujo subterráneo desde el acuífero de agua salobre hacia el Núcleo en el sector Este y Sur del área modelada.

El modelo fue calibrado inicialmente en régimen permanente, considerando el año 1997 como situación de equilibrio a representar por el modelo, reproduciendo los niveles piezométricos observados en esa fecha. Posteriormente, utilizando el modelo calibrado en régimen permanente, se calibró en régimen transiente considerando el periodo 1997 – 2013. En esta última etapa (transiente), el modelo consideró un proceso de calibración de parámetros para el periodo 1997 – 2008 y de validación para el periodo 2009 – 2013, periodos en que el modelo debe reproducir la tendencia observada de los niveles piezométricos. Más adelante se describe con más detalle el proceso de calibración en cada etapa, permanente y transiente.

Considerando la conveniencia de que un proceso de calibración involucre el mínimo de parámetros necesarios, para evitar así que el modelo pueda reproducir resultados similares bajo distintas combinaciones de parámetros, se consideró aquellos con mayor incertidumbre y que además puedan ser sensibles a la modelación. En este sentido, y teniendo presente que el modelo debe reproducir las recargas

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

y descargas calculadas por el balance, los parámetros utilizados para la calibración fueron el conductividad hidráulica y coeficiente de almacenamiento.

### 10.2.3.2 Pozos de calibración

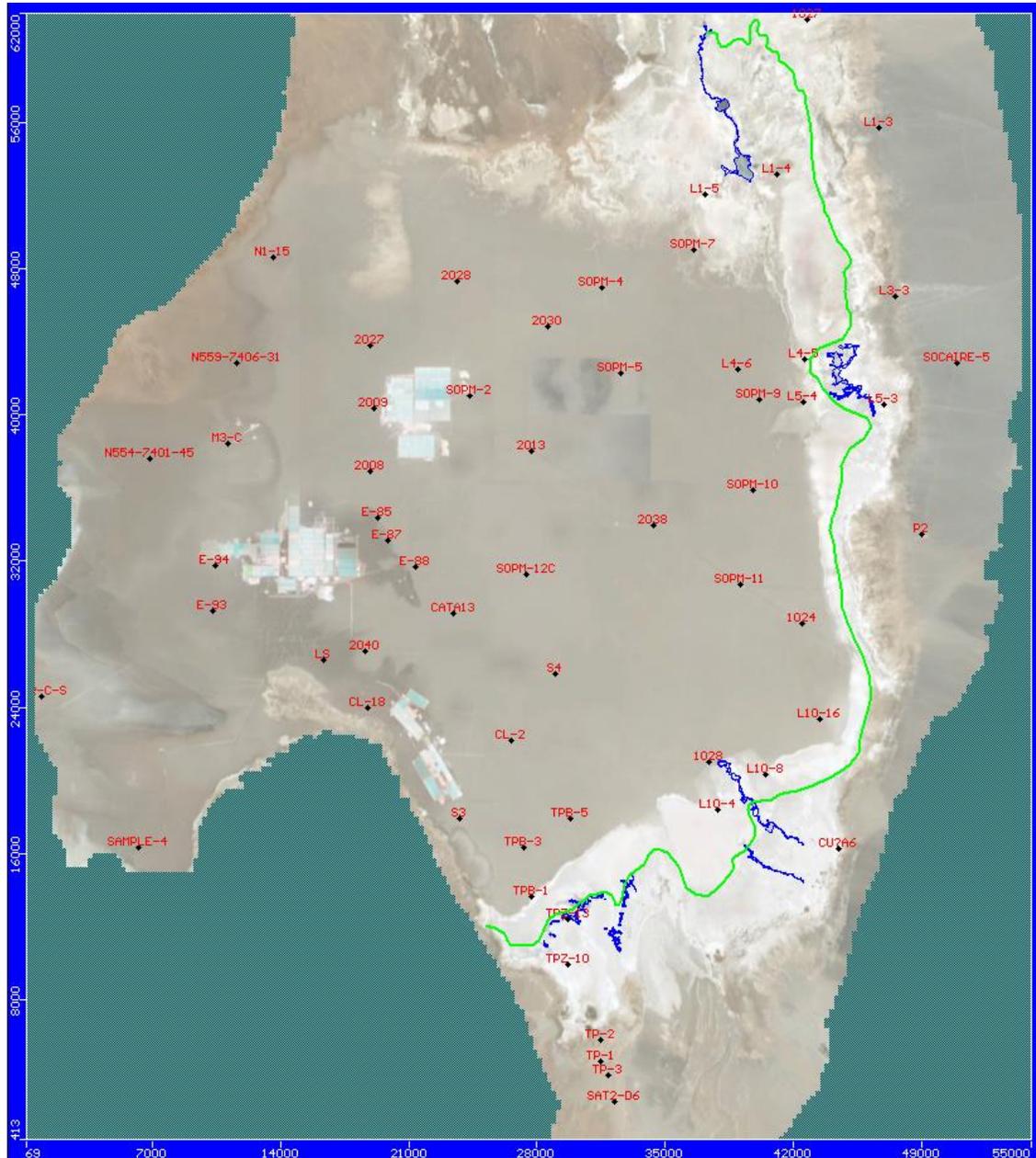
Para la calibración se utilizó un conjunto de pozos pertenecientes tanto a Rockwood, como a SQM y a MEL. La selección de los pozos para la calibración, se realizó considerando la información de niveles para la fecha requerida, su ubicación geográfica y la cota de elevación, privilegiando que el conjunto de pozos seleccionados tuviera una distribución homogénea dentro del área modelada.

Para la calibración en régimen permanente se seleccionaron 59 pozos, cuya ubicación en el modelo se muestra en la Figura 10-15 y sus coordenadas en Tabla 10-10. La mayoría de estos pozos cuenta con información de nivel freático para el año 1997, para los que se utilizó el nivel promedio de todo el año. Además, para contar con mejor cobertura de pozos de calibración en el área modelada se incluyeron algunos pozos cuyo valor del nivel para esa fecha fue extrapolado a partir de información de otros años. Los pasos metodológicos de las extrapolaciones realizadas fueron los siguientes:

- 1) Identificación de pozos con información histórica de niveles, determinando el inicio y el final de la serie de medidas, obteniendo así su duración en años.
- 2) Identificación del propietario del pozo, determinación de su ubicación, tipo de agua, profundidad y habilitación en los casos que se dispone de dicha información.
- 3) Selección de aquellos pozos con información más próxima al año 1997, para realizar la extrapolación de la serie histórica, manteniendo la tendencia lineal, si la hubiere, y coherencia con la posición de la superficie topográfica.
- 4) En aquellos pozos de los que no se dispone una serie larga de registros, éstos se compararon con las tendencias de los pozos cercanos, utilizando sus tendencias como criterio para realizar la extrapolación.

Se destaca que el nivel de confianza de las cotas piezométricas de cada pozo son distintas en función de la fuente de información disponible. Al respecto, en el marco de este trabajo se realizaron distintos levantamientos de topografía para minimizar estas incertidumbres (Apéndice A. Topografía).

**Figura 10-15 Distribución Pozos Calibración Permanente**

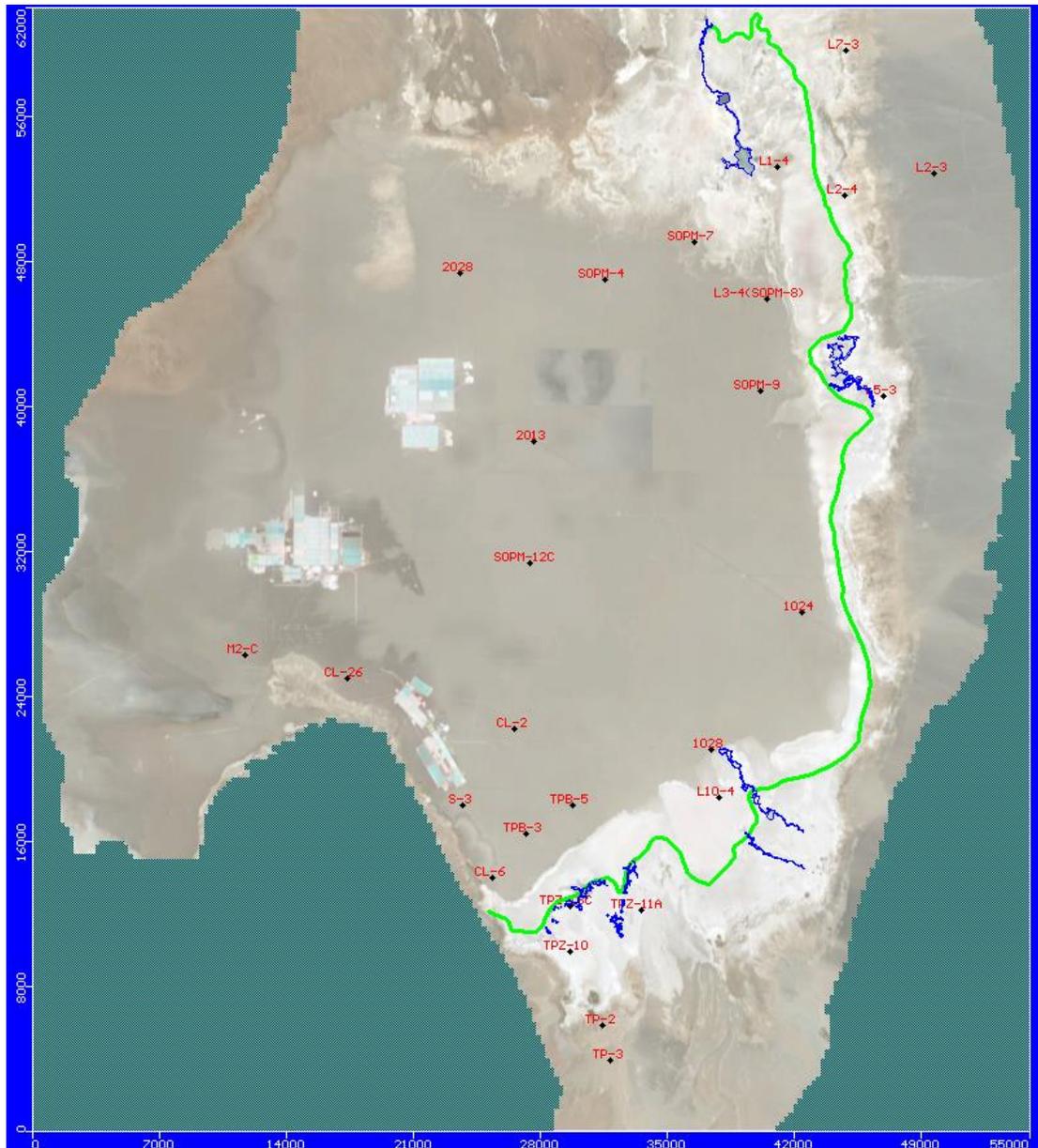


Fuente: Elaboración propia (Output Visual-MODFLOW)

Para la calibración en régimen transiente se seleccionaron 27 pozos, cuya ubicación en el modelo se muestra en la Figura 10-16. Se seleccionaron pozos con información periódica de niveles estáticos dentro del periodo 1997 – 2008 considerado para la calibración del modelo, y con a lo menos 7 años de información en dicho periodo, condiciones que hace que no sean coincidentes los pozos utilizados en la calibración permanente y transiente. Cabe señalar que la zona oeste del núcleo no tiene pozos para la calibración

transiente, y que los considerados en esta zona para la calibración permanente, correspondiente a pozos pertenecientes a NX UNO, no cuentan con series temporales de niveles dentro del periodo de calibración 1997-2008.

**Figura 10-16 Distribución Pozos Calibración Transiente**



Fuente: Elaboración propia (Output Visual-MODFLOW)

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

### 10.2.3.3 Calibración en régimen permanente

El proceso de calibración en régimen permanente consiste en operar el modelo para una fecha en que el acuífero se encuentre en un estado de equilibrio y sin explotación. Lo más próximo a esta situación, y que además cuente con información de niveles de agua del acuífero, es el año 1997. Para esa fecha la explotación en el Salar era muy baja por lo que se asumió como despreciable, considerándola como situación de equilibrio para esta etapa de la calibración del modelo. Para el ajuste de la calibración se utilizó una estadística de 59 pozos distribuidos en el área del modelo que cuentan con información de nivel freático en el año 1997.

El proceso de calibración consistió en operar el modelo considerando su configuración inicial descrita anteriormente, y ajustando principalmente los valores de permeabilidad en los rangos de valores determinados inicialmente, los cuales son representativos de las condiciones hidrogeológicas del medio, descritos en detalle en el capítulo 8 Hidrogeología.

Para reproducir los flujos de descarga por evaporación del sistema determinados en el balance hídrico, también se debió ajustar la representación de algunas de las curva de evaporación en el modelo (módulo ETS del programa) en cuanto al punto de quiebre de esta curva representada mediante dos segmentos. Estos ajustes se requirieron ya que el modelo calcula el flujo de evaporación en función de la curva de evaporación teórica ingresada como condición de borde y la profundidad que adopta el nivel de agua en cada celda, la cual depende de la precisión de la superficie topográfica disponible. Los ajustes realizados se mantuvieron en el modelo transiente.

#### 10.2.3.3.1 Conductividad Hidráulica

El ajuste de la permeabilidad de las 3 capas del modelo se realizó sobre la base de la distribución de propiedades hidráulicas para cada una de las unidades hidrogeológicas y de la configuración geométrica utilizada en las capas del modelo.

Para la capa 1, cuyos valores iniciales estimados, según análisis hidrogeológico, se presentaron en la Figura 10-7, se ajustaron de la siguiente forma: para el Núcleo, valores entre 3 y 1000 m/d, siendo en general, iguales o muy similares a los iniciales determinados según información hidrogeológica. En la Zona Marginal, los valores ajustados fueron entre 3 y 130 m/d, los que se encuentran dentro del rango aceptable respecto a los valores disponibles de pruebas de bombeo en el sector Sur de esta área. Al este de la Zona Marginal, los valores ajustados varían entre 2 y 100 m/d, similares a la información disponible del sector centro-norte del área (pozos de SQM) con valores de pruebas de bombeo entre 6 y 26 m/d.

En la Figura 10-17 se muestran los valores de permeabilidad finalmente calibrados para esta capa. En esta figura se observa una franja con dirección Norte-Sur ubicada al sur del modelo (subcuenca 9), la que se incorporó para representar una falla que separa los callejones de Tilopozo y de Tilomonte, disponiéndose

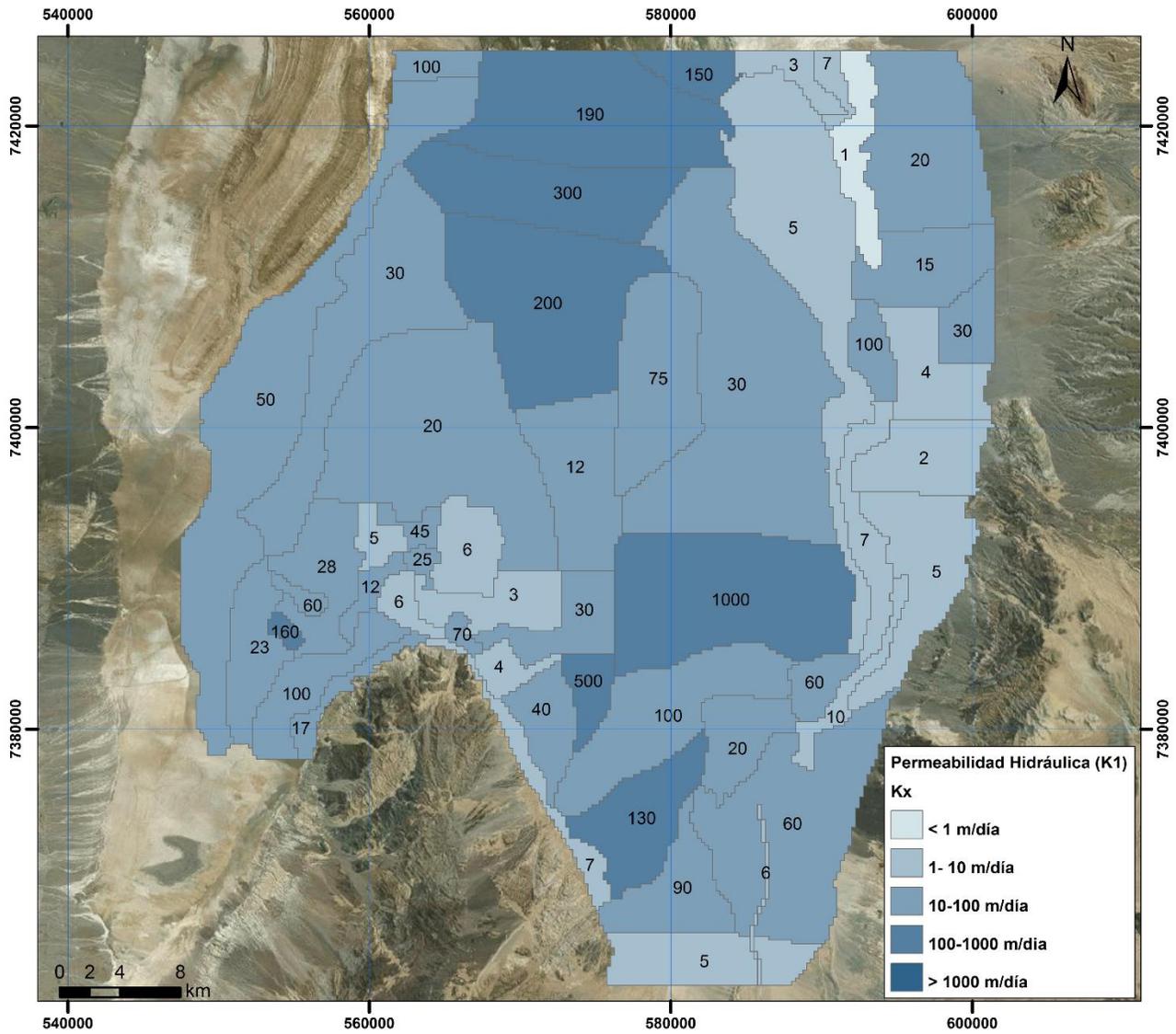
	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

paralela al relieve de las lomas de Tilocalar. Esta falla, ya existente en la Carta geológica de Chile N°54. Hoja de Toconao, fue observada también en los perfiles de geofísica realizados por Rockwood (véase Apéndice B, Figura 3-2) y se considera hidrogeológicamente como una zona limitante para el flujo subterráneo entre ambos callejones, por lo que se le asignó una permeabilidad igual a 6 m/d.

Para la capa 2, en la unidad del acuífero de agua dulce-salobre, al este de la interfase y donde el aluvial se presenta sobre ésta, las permeabilidades son las mismas que en la capa 1, ya que se representa la misma unidad hidrogeológica. En el Núcleo esta capa representa la unidad inferior bajo los 50 m, que de acuerdo con lo señalado en el análisis hidrogeológico presenta una menor permeabilidad que la superior. El valor ajustado en la calibración fue de 0,1 m/d, a excepción de la zona más al norte del modelo donde su valor fue más alto, de 5 m/d, que se asimila a la unidad hidrogeológica *Delta del río San Pedro*, y como se describe en capítulo de hidrogeología, puede presentar valores más altos de permeabilidad producto de los materiales acumulados en la desembocadura del río San Pedro sobre el Núcleo de halita del Salar. En la Figura 10-18 se muestran los valores calibrados en esta capa del modelo.

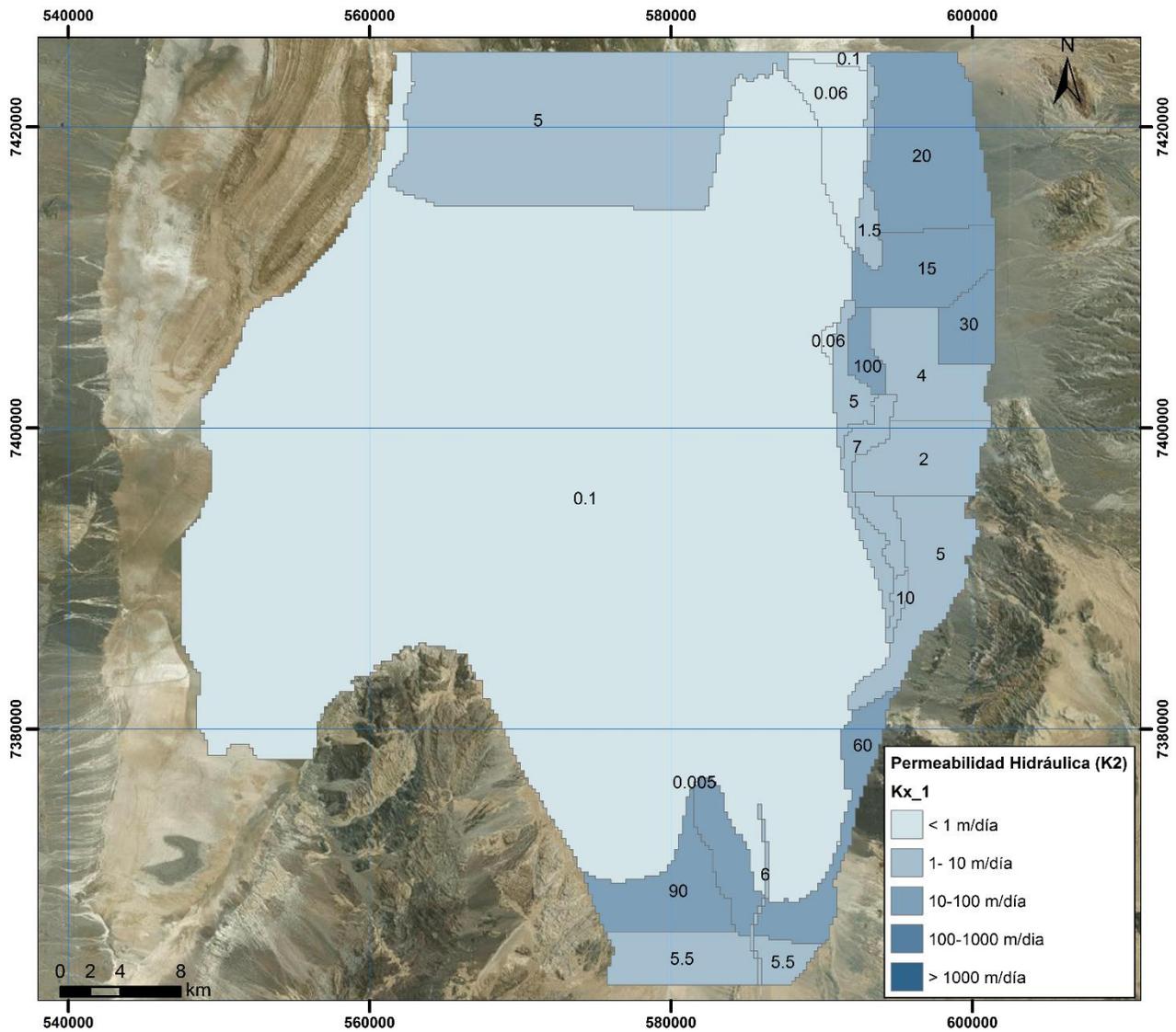
La capa 3 del modelo, como se señaló, tiene como objetivo representar la intrusión salina en el aluvial, por lo que en el núcleo esta capa mantiene los parámetros de la capa 2. Al Este y Sur del Núcleo del Salar, el límite superior de esta capa representa la interfase salina, por lo que a esta capa, siendo también parte de la unidad aluvial presentes en las capas 1 y 2, se le asigna una permeabilidad menor para representar la cuña salina que provoca la condición de no flujo subterráneo hacia el centro del Salar. Los valores ajustados fueron de  $5 \cdot 10^{-3}$  m/d en la zona Sur (subcuencas 9 y 10) y de  $6 \cdot 10^{-2}$  m/d en la zona Este (subcuencas 6, 7 y 8). En la Figura 10-19 se muestran los valores calibrados en esta capa del modelo.

**Figura 10-17 Permeabilidad calibración modelo (m/d) capa 1**



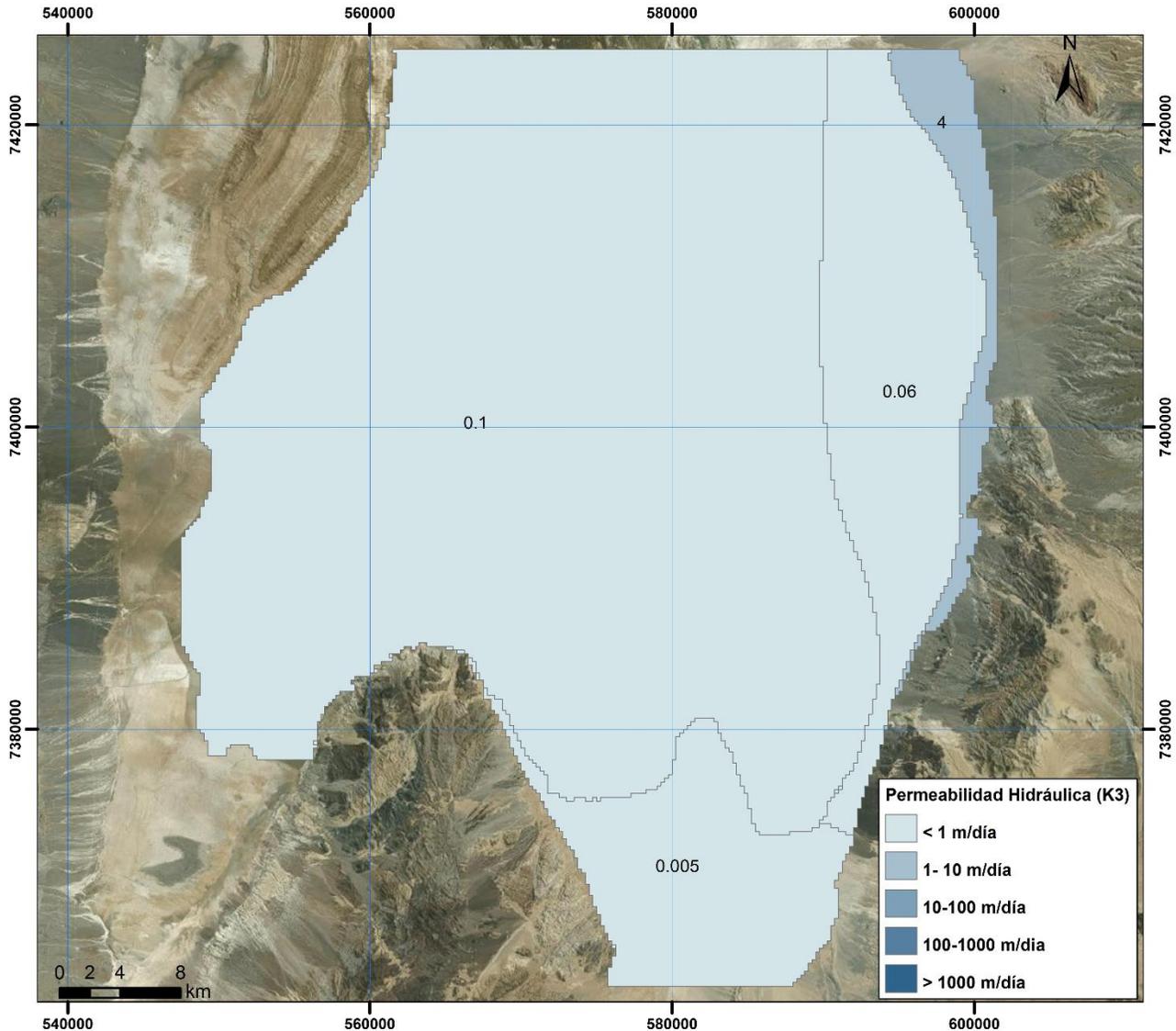
Fuente: Elaboración propia

**Figura 10-18 Permeabilidad calibración modelo (m/d) capa 2**



Fuente: Elaboración propia

**Figura 10-19 Permeabilidad calibración modelo (m/d) capa 3**



Fuente: Elaboración propia

### 10.2.3.3.2 Descarga Subterránea

La descarga del modelo se realiza por dos vías, la evapotranspiración desde la superficie freática y los afloramientos de agua que alimentan los sistemas de lagunas. Estas dos variables de salida del modelo se incorporan al modelo a través de las condiciones de borde de Evapotranspiración (EVT) y Afloramiento, esta última representada mediante celdas de drenaje (DRN), las que fueron descritas anteriormente.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

Como se explicó anteriormente, el modelo debe reproducir los flujos de recarga y descarga del sistema definidos en el balance hídrico, lo que requirió un ajuste de los parámetros iniciales que se estimaron para definir las curvas de evaporación, buscando que el modelo reproduzca las descargas por evaporación determinadas en el balance hídrico, es decir, las condiciones de flujo presentadas en el modelo conceptual. En general, se mantuvieron los parámetros de profundidad de extinción, definidos en 2 m, y la tasa máxima de evaporación a nivel de superficie. Lo ajustado correspondió al punto de unión de los dos segmentos que define la curva de evaporación (valor ETS en Figura 10-13), con lo que se logró un buen ajuste de la evaporación por zona como se muestra en la Tabla 10-8.

Para la descarga por afloramiento, la efectividad de esta condición de borde se obtuvo con una profundidad del dren entre 0,7 y 1 m, y conductancia entre 625.000 y 1.250.000 m<sup>2</sup>/día. Los parámetros de cada celda dren se incluyen en el Apéndice K. Estos valores resultan del proceso de calibración del modelo y permitieron un buen ajuste del caudal que aflora en los sistemas lagunares determinados en el balance hídrico, como se muestra en la Tabla 10-8.

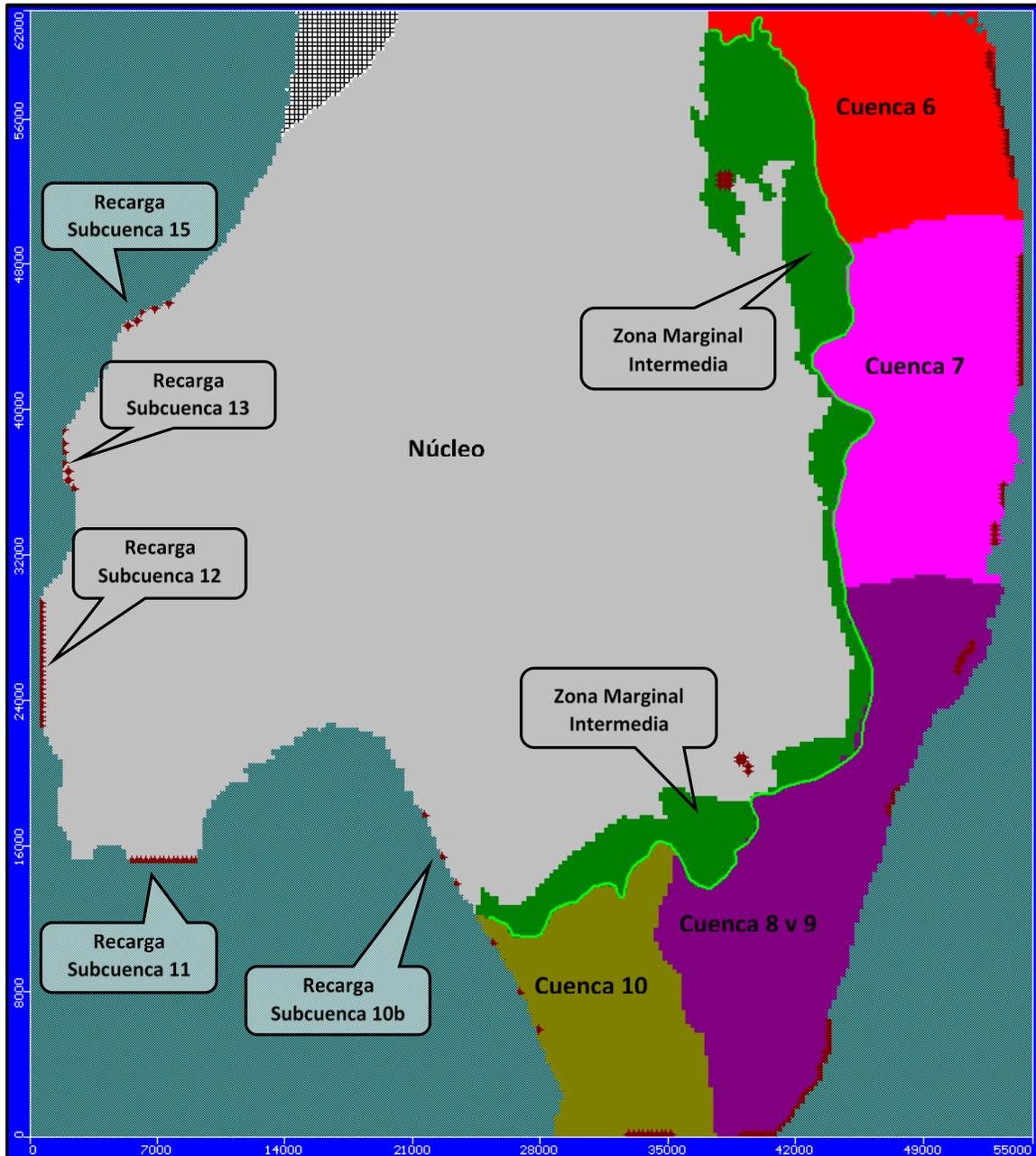
#### 10.2.3.3 Balance Hídrico

Para verificar el comportamiento del modelo, éste debe representar adecuadamente el balance hídrico propuesto (Capítulo 9), tanto en el Núcleo como en la Zona Marginal. Las recargas determinadas como aportantes al área del modelo, determinadas en el balance hídrico, e impuestas como input del modelo, deben ser reproducidas correctamente por el modelo, es decir, que la totalidad del caudal de entrada ingresado al modelo esté finalmente reproducido.

El modelo se considera que representa adecuadamente el balance hídrico cuando la descarga que genera el modelo, por evaporación (EVT) y afloramiento (DRN), son las determinadas en el balance hídrico. Para esto se requirió ajustes en los parámetros que definen la curva de evaporación y las celdas tipo Dren, además del proceso de calibración de la conductividad hidráulica.

Para evaluar el balance hídrico en el modelo, se crearon zonas de balance (Zone Budgets) para las subcuencas afluentes al Salar, la porción correspondiente de Zona Marginal Acuífero, para la Zona Marginal Intermedia (aguas abajo de la interfase) y para el Núcleo (salmuera), como se muestra en la Figura 10-20, en donde además se han incluido los pozos de inyección utilizados para ingresar la recarga subterránea.

**Figura 10-20 Zonas de Balance Modelo Numérico**



Fuente: Elaboración propia (Output Visual-MODFLOW)

En la Tabla 10-8 se presentan los resultados de los flujos entrantes y salientes del modelo en su calibración permanente (año 1997) de acuerdo con las zonas definidas en la figura anterior.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

**Tabla 10-8 Balance hídrico año 1997 modelo numérico (L/s)**

ZONA	Recarga				Descarga						Difer Desc c/r Total
	Balance Hídrico		Modelo		Balance Hídrico			Modelo			
	Subt	Superf	Subt	Superf	EVT	Afloram	Total	EVT	Afloram	Total	
<b>Subcuenas afluentes ZM</b>											
SubC 6	205	11	205	11	129	76	204	150	26	176	-16%
SubC 7	427	8,9	428	8,8	286	142	428	273	138	412	-4,0%
SubC 8y9	439	7,5	439	7,6	317	79	395	358	77	435	10%
SubC 10a *	614	3,1	614	3,1	462	113	576	454	128	582	1,1%
<b>Total afluente ZMarginal</b>	<b>1686</b>	<b>30</b>	<b>1687</b>	<b>30</b>	<b>1194</b>	<b>410</b>	<b>1604</b>	<b>1235</b>	<b>370</b>	<b>1605</b>	<b>0,1%</b>
<b>Núcleo</b>											
Zona Marginal Intermedia **		46		46	176		176	173		173	-2%
Núcleo (salmuera) ***		169		168	1023		1023	1018		1018	-1%
Lateral Oeste	193		194								
Flujo Norte modelo	679		674								
<b>Total Núcleo</b>	<b>872</b>	<b>214</b>	<b>868</b>	<b>214</b>	<b>1200</b>		<b>1200</b>	<b>1191</b>		<b>1191</b>	<b>-0,7%</b>
<b>Total Area Modelo</b>	<b>2558</b>	<b>245</b>	<b>2554</b>	<b>245</b>	<b>2394</b>	<b>410</b>	<b>2804</b>	<b>2426</b>	<b>370</b>	<b>2796</b>	<b>-0,3%</b>

(\*) Incluye 50% recarga subcuenca 10b que descarga antes de interfase

(\*\*) Incluye recarga por infiltración laguna Soncor (25 l/s)

(\*\*\*) Incluye recarga por infiltración laguna Peine (10 l/s)

Fuente: Elaboración propia

De la tabla anterior, se observa que el modelo representa correctamente los caudales de entrada impuestos como recarga, es decir, el modelo no presenta singularidades que impidan la entrada de flujo impuesta en cada celda de recarga. En cuanto a la descarga que genera el modelo, se observa que la calibración lograda tiene en general diferencias bajas entre las descarga que simula el modelo y la determinada por el balance hídrico. Si bien hay algunas diferencias en algunas zonas, éstas se consideran aceptables para un modelo, en especial considerando la complejidad y extensión del desarrollado en el Salar. La diferencia a nivel total del área modelada, entre descarga simulada y calculada en balance hídrico es de sólo 0.3%.

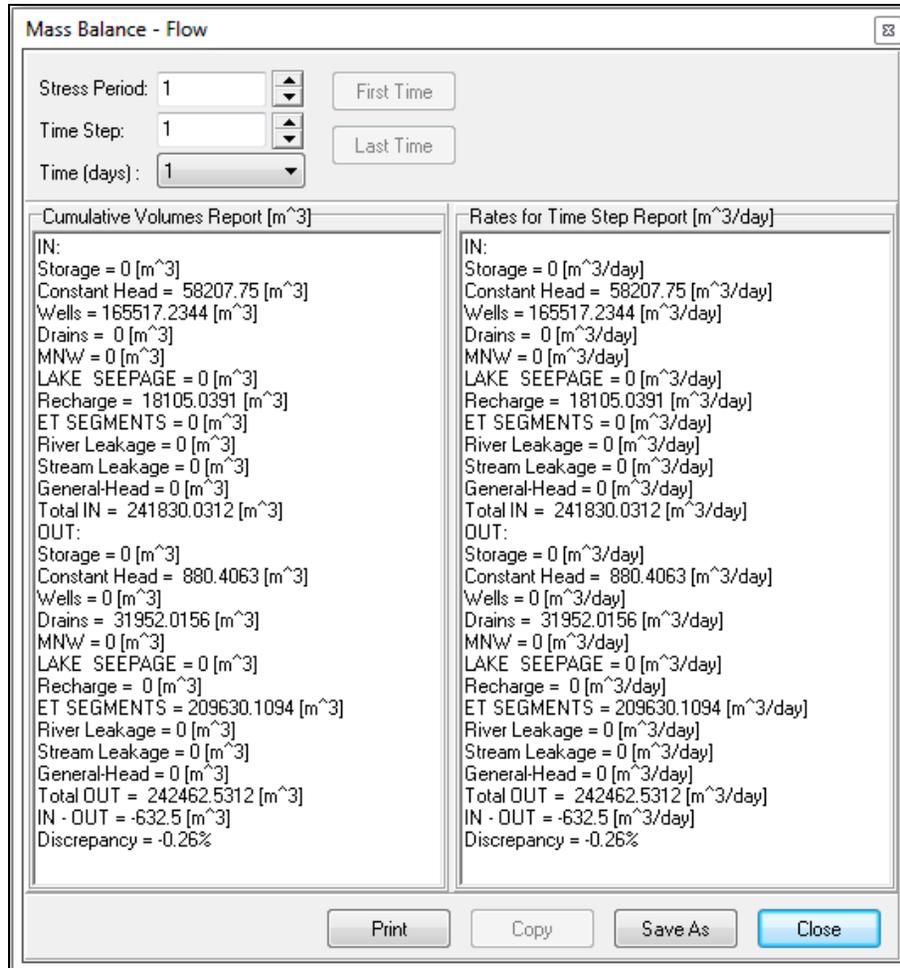
En la Tabla 10-9 se presentan los caudales generados entre las zonas (subcuenas) ubicadas al Este de la interfase y la Zona Marginal Intermedia (y Núcleo), es decir, representa el flujo subterráneo que sobrepasa la interfase salina. Este flujo representa, de acuerdo con lo señalado en el modelo conceptual (capítulo 9), un escurrimiento sub-superficial o de “desborde” de aguas salobres desde la Zona Marginal Acuífero, por encima de la interfase salina hacia la Zona Marginal Intermedia y el Núcleo.

**Tabla 10-9 Flujo a través de Interfase**

Subcuenca	Caudal (L/s)
SubC 6	27
SubC 7	19
SubC 8y9	47
SubC 10a	33
<b>Total</b>	<b>126</b>

En la Figura 10-21 se muestra el balance de masas del modelo (Entradas/Salidas), donde se visualiza un error de discrepancia de 0,26%, lo que refleja un buen ajuste numérico.

**Figura 10-21 Balance de Masas Calibración Régimen Permanente**



Fuente: Elaboración propia de Output de Visual-MODFLOW

#### 10.2.3.3.4 Calibración Niveles

Como se mencionó anteriormente, el modelo se calibró utilizando 59 pozos con niveles observados para el año 1997, cuya ubicación se mostró en Figura 10-15. En la Tabla 10-10 se muestra el ajuste logrado para los pozos utilizados para la calibración y a continuación en la Figura 10-22 la representación gráfica de este ajuste. En la Tabla 10-11 se señalan los parámetros estadísticos que muestran la bondad del ajuste de la calibración en relación con los pozos controlados, donde se observa un Error Medio Absoluto Normalizado (NMAE) de 2,3%, dando así cumplimiento a lo requerido en la Guía de Uso de Modelos de Aguas Subterráneas en el SEIA, (SEA 2012).

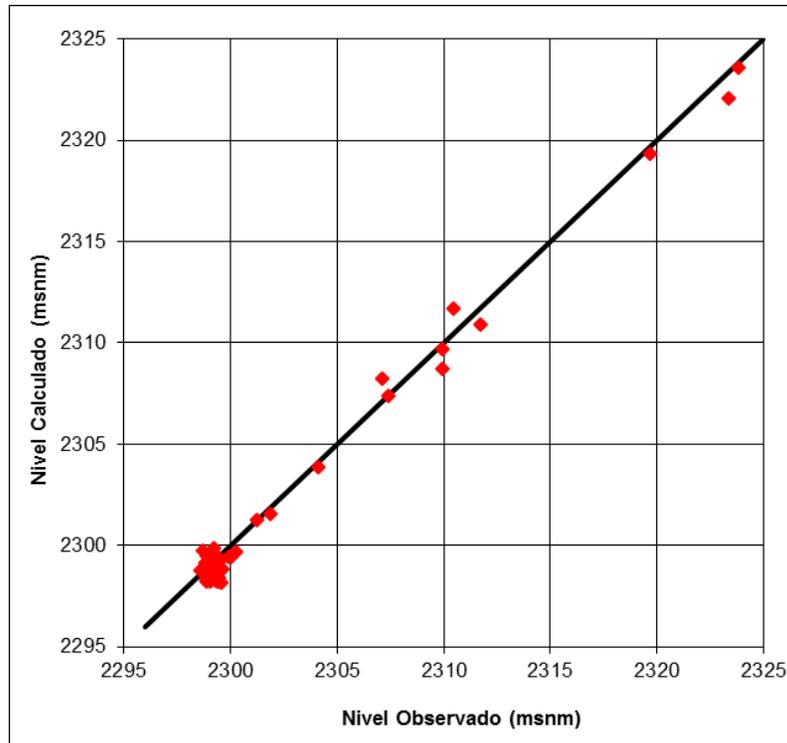
**Tabla 10-10 Niveles Medidos y Simulados calibración permanente**

Pozo	UTM Norte m	UTM Este m	Nivel Obs 1997 msnm	Nivel Simulado msnm	Diferencia Obs-Simul msnm
'ZAR-C-S'	547.920	7.387.593	2299,60	2298,86	-0,74
'TPZ-13'	576.674	7.375.391	2300,28	2299,68	-0,60
'TPZ-10'	576.704	7.372.928	2301,86	2301,59	-0,27
'TPB-5'	576.841	7.380.935	2299,40	2298,65	-0,75
'TPB-3'	574.251	7.379.371	2299,38	2298,68	-0,70
'TPB-1'	574.714	7.376.652	2298,60	2298,78	0,18
'TP-3'	578.925	7.366.868	2309,94	2309,72	-0,22
'TP-2'	578.497	7.368.805	2307,42	2307,40	-0,02
'TP-1'	578.503	7.367.615	2309,91	2308,75	-1,16
'SOPM-9'	587.169	7.403.826	2298,86	2298,39	-0,47
'SOPM-7'	583.567	7.412.049	2298,80	2299,12	0,32
'SOPM-5'	579.549	7.405.280	2298,93	2298,87	-0,06
'SOPM-4'	578.576	7.409.933	2298,87	2299,51	0,64
'SOPM-2'	571.301	7.404.054	2299,14	2299,12	-0,02
'SOPM-12C'	574.438	7.394.297	2299,26	2298,31	-0,95
'SOPM-11'	586.119	7.393.745	2299,07	2298,49	-0,58
'SOPM-10'	586.801	7.398.889	2299,03	2298,36	-0,67
'SOCAIRE 5'	597.952	7.405.823	2323,81	2323,58	-0,23
'SAT2-D6'	579.241	7.365.455	2323,37	2322,08	-1,29
'SAMPLE-4'	553.219	7.379.373	2299,90	2299,46	-0,44
'S4'	575.984	7.388.860	2299,29	2298,54	-0,75
'S3'	570.775	7.380.949	2299,36	2298,72	-0,64
'P2'	596.063	7.396.456	2311,70	2310,88	-0,82
'N559-7406-31'	558.615	7.405.822	2299,44	2299,36	-0,08
'N554-7401-45'	553.815	7.400.627	2299,20	2299,87	0,67
'N1-15'	560.609	7.411.612	2300,05	2299,44	-0,61
'M3-C'	558.083	7.401.450	2299,48	2299,19	-0,29
'LS'	563.340	7.389.614	2298,85	2298,24	-0,61
'L5-4'	589.542	7.403.729	2298,91	2298,37	-0,54
'L5-3'	593.971	7.403.546	2301,24	2301,24	0,00
'L4-6'	585.966	7.405.471	2298,85	2298,46	-0,39
'L4-5'	589.607	7.406.040	2299,09	2298,54	-0,55
'L3-3'	594.614	7.409.499	2310,45	2311,69	1,24
'L1-5'	584.211	7.415.044	2298,72	2299,76	1,04
'L1-4'	588.137	7.416.188	2299,06	2298,76	-0,30
'L1-3'	593.704	7.418.731	2319,65	2319,37	-0,28
'L10-8'	587.478	7.383.326	2298,86	2298,70	-0,16
'L10-4'	584.907	7.381.410	2299,16	2298,81	-0,35
'L10-16'	590.452	7.386.336	2298,83	2298,58	-0,25
'E-94'	557.409	7.394.767	2299,10	2298,66	-0,44
'E-93'	557.276	7.392.261	2299,01	2298,53	-0,48
'E-88'	568.336	7.394.700	2299,42	2298,21	-1,21
'E-87'	566.861	7.396.125	2299,42	2298,25	-1,17
'E-85'	566.291	7.397.371	2299,41	2298,30	-1,11
'CUNA 6'	591.500	7.379.267	2304,14	2303,90	-0,24
'CL-2'	573.582	7.385.213	2299,15	2298,61	-0,54
'CL-18'	565.732	7.386.970	2298,85	2298,29	-0,56
'CATA 13'	570.426	7.392.150	2299,06	2298,21	-0,85
'2040'	565.599	7.390.082	2299,56	2298,18	-1,38
'2038'	581.341	7.396.950	2299,46	2298,42	-1,04
'2030'	575.621	7.407.829	2299,43	2299,36	-0,07
'2028'	570.638	7.410.289	2299,09	2299,69	0,60
'2027'	565.866	7.406.777	2299,40	2299,34	-0,06
'2013'	574.681	7.401.050	2299,42	2298,73	-0,69
'2009'	566.066	7.403.337	2299,34	2298,79	-0,55
'2008'	565.862	7.399.890	2299,34	2298,45	-0,89
'1028'	584.432	7.384.000	2299,37	2298,63	-0,74
'1027'	589.796	7.424.648	2307,10	2308,25	1,15
'1024'	589.474	7.391.603	2299,13	2298,56	-0,57

Coordenadas UTM Datum WGS84

Fuente: Elaboración propia

**Figura 10-22 Ajuste entre niveles observados y simulados**



Fuente: elaboración propia

**Tabla 10-11 Estadísticos de la calibración permanente**

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Nº Pozos de Observación	59
Promedio Residual (m)	-0,38
Error Medio Absoluto MAE (m)	0,58
Error Estándar (m)	0,07
RMS (m)	0,68
Normal MAE	<b>2,3%</b>
Normal RMS	<b>2,7%</b>

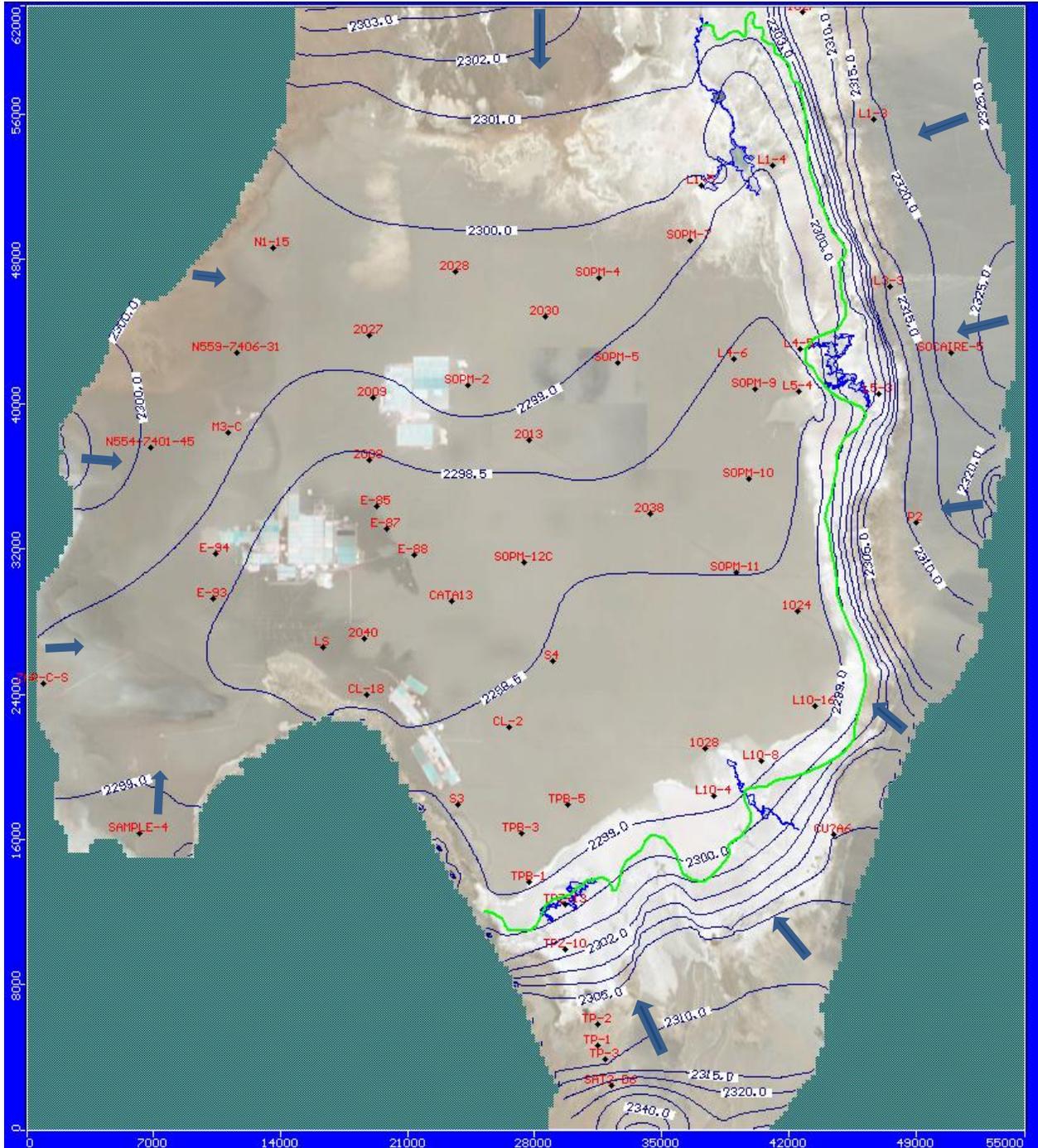
Fuente: elaboración propia

Si bien esta calibración es adecuada de acuerdo con los parámetros estadísticos obtenidos, donde el error medio absoluto (MAE) es de 0,58 m, 10 de los 59 pozos utilizados en la calibración presentan diferencias entre niveles medidos y simulados mayores a 1 metro. Estas diferencias se consideran aceptables teniendo presente principalmente que dichos pozos, pertenecientes a terceros, no cuentan con información topográfica homologada. En todo caso, el objetivo de la calibración ha sido representar el balance hídrico y reproducir los niveles observados en los pozos cercanos a las áreas de mayor interés ambiental.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

En la Figura 10-23 se muestra la superficie freática generada por el modelo MODFLOW para la calibración permanente, donde se indican las direcciones de flujo consistentes con el modelo conceptual, reflejando adecuadamente los flujos subterráneos y los gradientes hidráulicos desde el norte y desde las subcuencas aportantes hacia el Núcleo.

**Figura 10-23 Superficie freática calibración permanente**



Fuente: Elaboración propia (Output de Visual-MODFLOW)

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

### 10.2.3.4 Calibración régimen transiente

La calibración en transiente consiste en operar el modelo calibrado en régimen permanente observando que éste reproduzca una evolución o tendencia temporal de niveles medidos en un periodo de explotación del acuífero, y que en lo posible abarque un periodo largo de tiempo. Además debe reproducir con buena coherencia el balance hídrico de cada subcuencas para sus flujos de entradas y salidas. Esto permite fundamentalmente validar el modelo en cuanto a descensos producidos por variaciones en las variables controlables del sistema, como es el bombeo, y las estocásticas como es la recarga asociada a factores hidrológicos y climáticos.

Para esto debe seleccionarse un periodo de tiempo lo más extenso posible pero que cumpla con la condición de tener un registro de información que permita determinar las variables señaladas (explotación del acuífero y registro de precipitaciones para definir la recarga variable en el periodo de calibración). Además, debe contarse con un registro de niveles que incluya varios pozos representativos del sistema y con una extensión del registro que cubra el total del periodo de calibración en la mayor cantidad posible de pozos.

Considerando que el principal objetivo de la calibración transiente es reproducir la tendencia observada en los niveles durante el periodo seleccionado de calibración, es importante destacar que como la calibración transiente se realiza tomando como base el modelo calibrado en régimen permanente, ajustando el coeficiente de almacenamiento, sensible a la variable tiempo, las diferencias en cota de los niveles medidos y simulados obtenidas en la calibración permanente, se mantienen en general durante el resto del periodo de calibración.

Como se mencionó anteriormente, el período considerado para la calibración va desde noviembre de 1997 hasta diciembre de 2008, y posteriormente el modelo fue validado para el período 2009-2013. Para representar lo mejor posible la alta variabilidad estacional del sistema, en este caso marcada por las altas precipitaciones en verano en la zona Este de la cuenca y casi nulas el resto del año, se utilizan períodos mensuales de tiempo. Con esto, el periodo de calibración abarca 11 años y dos meses, divididos en 134 períodos (meses).

La configuración geométrica y de conductividades hidráulicas para la calibración en régimen transiente, son las definidas en la calibración en régimen permanente y se mantienen fijos en este proceso. La recarga y evapotranspiración, al igual que en régimen permanente, son impuestas al modelo de acuerdo con los valores mensuales definidos en el balance hídrico.

De esta manera, durante este proceso de calibración en régimen transiente el parámetro de calibración es el coeficiente de almacenamiento del acuífero, parámetro sensible a la variable tiempo y a la variación de niveles por efecto de un bombeo. Los valores calibrados de este parámetro deben ajustarse a un rango de valores medidos o estimados en el análisis hidrogeológico.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

Para verificar el ajuste durante el proceso de calibración, se tuvo información de 27 pozos con registro de niveles dentro del periodo considerado para la calibración, cuya ubicación se mostró en la Figura 10-16.

#### *10.2.3.4.1 Recarga mensual*

La recarga del sistema, que debe incorporarse al modelo para cada periodo mensual, presenta una gran variabilidad estacional, para lo cual se desarrolló un modelo de balance hídrico basado en las precipitaciones mensuales registradas en cada periodo, de acuerdo con la metodología expuesta en el cálculo del balance hídrico (ver más detalles en punto 9.3). Esta variabilidad mensual también se aplicó a la infiltración desde los sistemas lagunares de Soncor y Peine, como se explica en el Apéndice I Funcionamiento Hidrogeológico de las Lagunas.

En la Figura 10-24 se muestra la recarga mensual incorporada al modelo obtenida del balance hídrico mensual, para el periodo de calibración y validación, es decir noviembre 1997 a diciembre 2013, mostrando separadamente la recarga directa y subterránea (lateral) para el Núcleo y Zona Marginal y para acuífero (agua salobre), además la recarga total incorporada al modelo. En la Tabla 10-12 se presentan los valores de recarga media obtenida por subcuenca, correspondiente al promedio mensual de los 16 años del periodo de calibración y validación, cuyos valores mensuales ingresados en el modelo se incluyen en el Apéndice K.

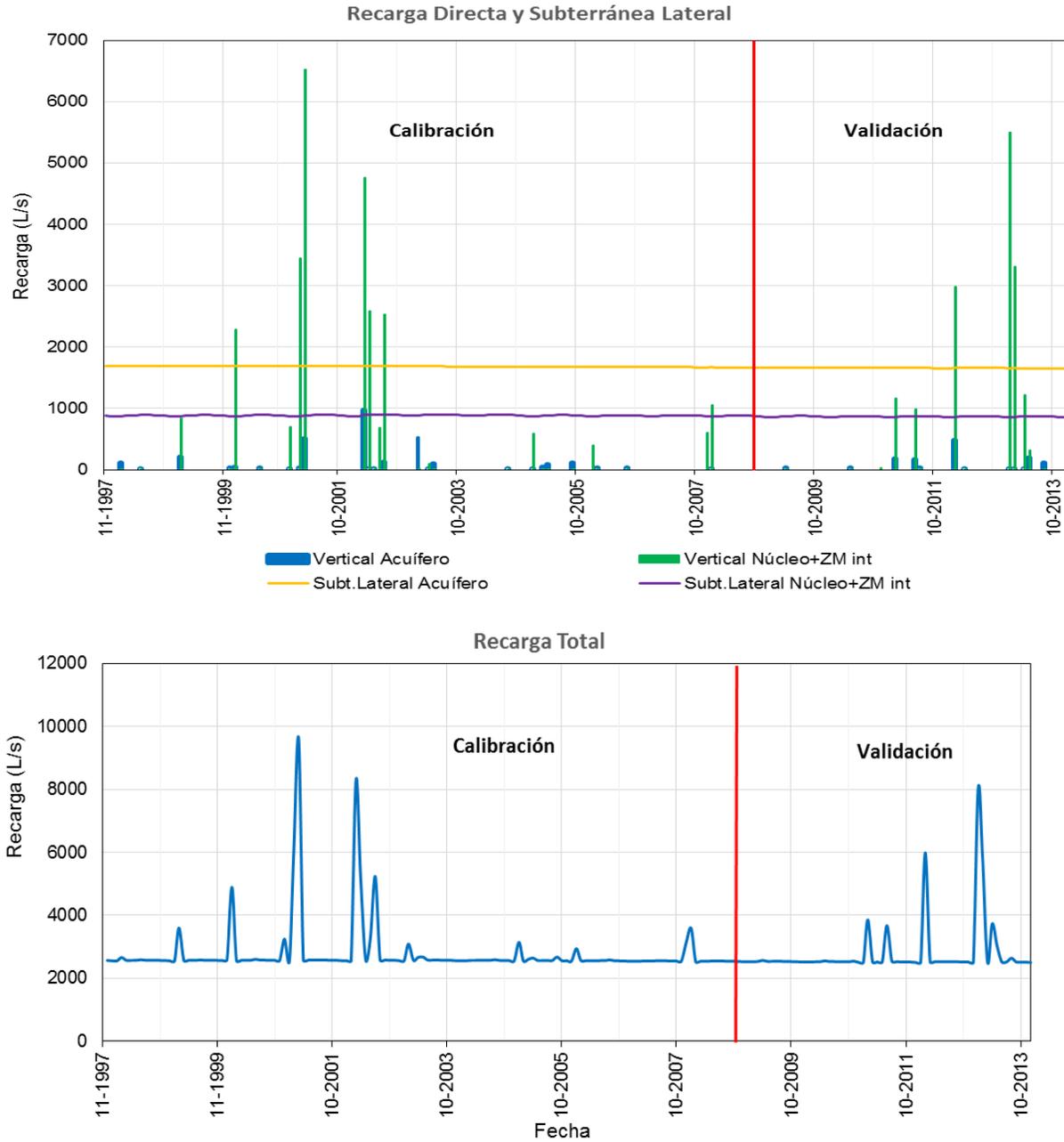
	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

**Tabla 10-12 Recarga Media Periodo Calibración y Validación en Régimen Transiente (1998-2013)**

<b>ZONA</b>	<b>Recarga (L/s)</b>
<b>Acuífero</b>	
Subcuenca 6	204
Subcuenca 7	426
Subcuenca 8	43
Subcuenca 9	396
Subcuenca 10a	602
Precipitación Directa Subcuencas	22
<b>Total Acuífero</b>	<b>1693</b>
<b>Núcleo</b>	
Subcuenca 10b	4,6
Subcuenca 11	86
Subcuenca 12	8,2
Subcuenca 13	90
Subcuenca 15	6,9
Precipitación Directa Núcleo	328
Flujo Norte modelo	675
<b>Total Núcleo</b>	<b>1198</b>
<b>Total Area Modelo</b>	<b>2890</b>

Fuente: Elaboración propia (Zonas en Figura 10-20)

**Figura 10-24 Recarga Mensual Área del Modelo**



Fuente: Elaboración propia

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

#### 10.2.3.4.2 Explotación mensual

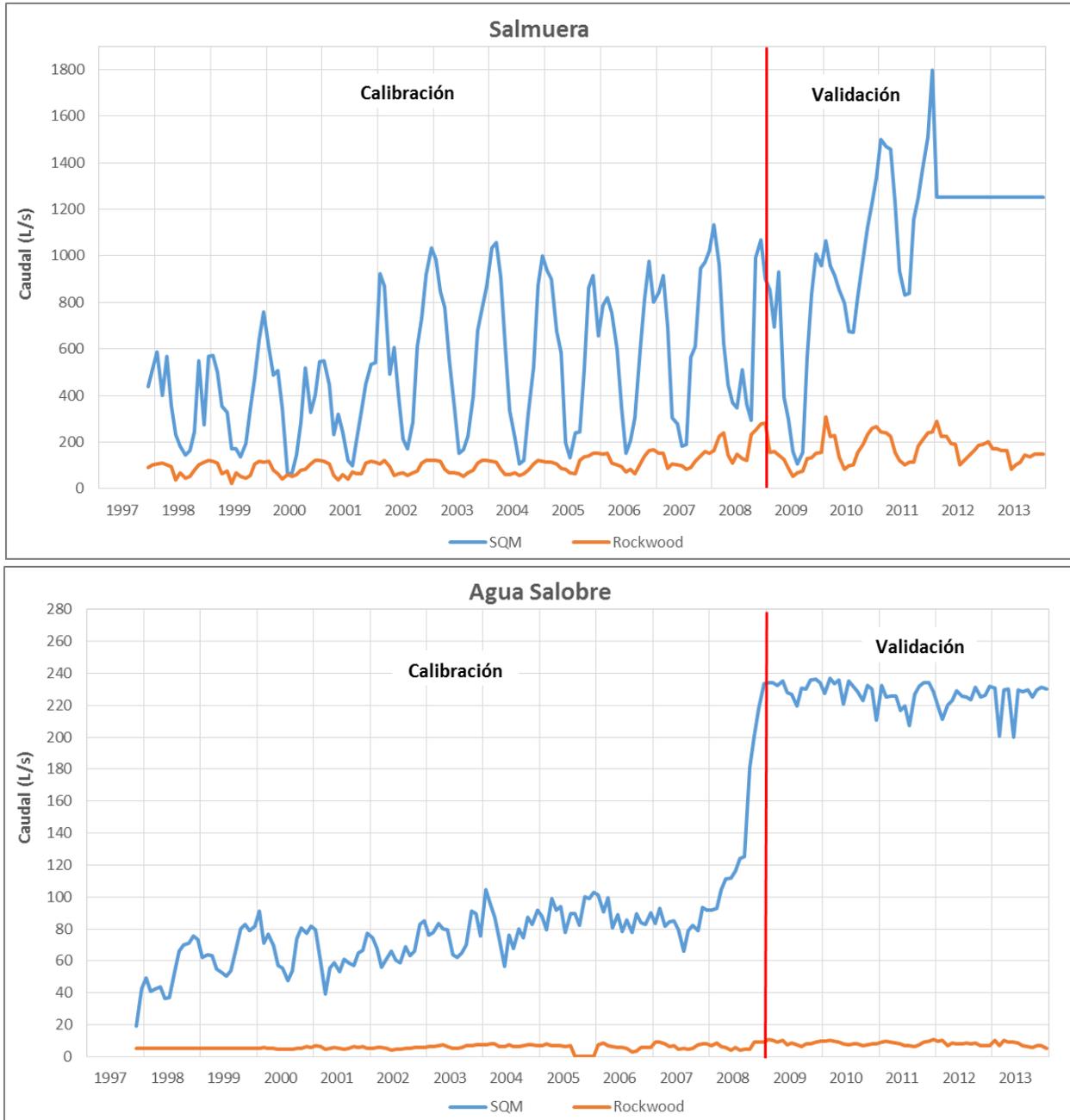
Para el periodo de calibración y validación considerado, debe ingresarse al modelo la estimación de la explotación real del sistema en caudales medios mensuales de bombeo por cada pozo. A partir de la información analizada y expuesta en el capítulo 5 Explotación de la Cuenca, se determinó la explotación del periodo en la salmuera y de agua salobre, de SQM y Rockwood en el área del modelo. En la Tabla 10-13 se indica, para el periodo de calibración y validación, el caudal medio mensual de bombeo total de cada compañía tanto en el Núcleo (salmuera) como en el acuífero de agua dulce-salobre (borde Este del Salar), y en la Figura 10-25 se presentan de manera gráfica.

**Tabla 10-13 Bombeo durante el periodo de calibración**

Mes	Salmuera SQM	RWL	Agua SQM	Salobre RWL	Total (L/s)	Mes	Salmuera SQM	RWL	Agua SQM	Salobre RWL	Total (L/s)	Mes	Salmuera SQM	RWL	Agua SQM	Salobre RWL	Total (L/s)
nov-97	437	93	19	5	555	abr-03	557	68	80	7	712	sep-08	294	233	181	5	713
dic-97	514	101	42	5	662	may-03	341	67	79	7	494	oct-08	991	251	201	9	1452
ene-98	587	106	49	5	748	jun-03	150	63	64	5	283	nov-08	1069	277	218	9	1573
feb-98	398	111	41	5	556	jul-03	166	51	62	5	284	dic-08	900	280	233	9	1422
mar-98	568	101	43	5	717	ago-03	224	67	65	6	362	ene-09	856	154	234	11	1256
abr-98	359	96	44	5	503	sep-03	395	80	70	7	552	feb-09	695	161	234	10	1101
may-98	232	36	36	5	310	oct-03	681	110	91	7	889	mar-09	929	144	233	9	1315
jun-98	184	70	37	5	296	nov-03	773	121	90	8	991	abr-09	393	124	235	10	762
jul-98	145	44	53	5	248	dic-03	865	122	76	7	1070	may-09	297	88	228	8	620
ago-98	162	54	66	5	287	ene-04	1036	119	105	8	1267	jun-09	158	54	227	9	447
sep-98	245	78	70	5	398	feb-04	1057	115	96	8	1276	jul-09	107	66	220	8	401
oct-98	549	103	71	5	728	mar-04	908	84	87	8	1087	ago-09	155	74	231	6	467
nov-98	275	114	76	5	471	abr-04	615	60	74	7	756	sep-09	563	128	230	8	930
dic-98	570	121	73	5	769	may-04	334	60	57	6	457	oct-09	835	132	236	8	1211
ene-99	573	117	62	5	758	jun-04	217	67	76	7	368	nov-09	1007	154	236	9	1407
feb-99	501	111	64	5	681	jul-04	106	57	68	7	237	dic-09	956	154	234	10	1354
mar-99	354	65	63	5	488	ago-04	122	66	80	6	274	ene-10	1066	307	227	10	1610
abr-99	328	77	55	5	465	sep-04	325	79	74	7	485	feb-10	960	223	237	10	1430
may-99	169	23	53	5	251	oct-04	523	104	87	8	722	mar-10	916	230	233	10	1389
jun-99	169	67	50	5	292	nov-04	872	119	83	8	1082	abr-10	856	137	236	9	1238
jul-99	137	54	54	5	251	dic-04	1000	118	92	7	1217	may-10	798	85	221	8	1112
ago-99	193	46	66	5	310	ene-05	938	113	88	7	1146	jun-10	677	98	235	8	1017
sep-99	342	55	80	5	482	feb-05	901	113	80	8	1102	jul-10	670	103	232	8	1013
oct-99	478	106	83	5	672	mar-05	673	105	99	7	884	ago-10	825	154	229	8	1216
nov-99	641	116	79	5	841	abr-05	582	86	92	7	766	sep-10	989	191	223	7	1410
dic-99	758	115	82	5	961	may-05	196	81	94	7	378	oct-10	1122	231	232	7	1592
ene-00	603	116	91	5	816	jun-05	134	66	78	6	284	nov-10	1224	258	230	8	1721
feb-00	489	81	71	6	647	jul-05	240	66	90	7	402	dic-10	1335	267	211	8	1820
mar-00	507	64	77	5	654	ago-05	245	122	89	0	456	ene-11	1499	244	233	9	1985
abr-00	348	40	69	5	463	sep-05	511	137	82	0	731	feb-11	1469	238	225	10	1942
may-00	59	61	57	5	181	oct-05	864	141	100	0	1105	mar-11	1460	225	226	9	1920
jun-00	68	54	55	5	182	nov-05	917	153	99	0	1169	abr-11	1227	154	226	9	1616
jul-00	143	61	48	5	256	dic-05	657	151	103	0	911	may-11	933	120	217	8	1278
ago-00	285	79	54	5	422	ene-06	787	149	101	8	1045	jun-11	831	101	220	7	1159
sep-00	517	83	74	5	679	feb-06	820	153	91	9	1072	jul-11	838	115	207	7	1167
oct-00	327	107	81	5	520	mar-06	757	111	99	7	975	ago-11	1158	115	227	6	1506
nov-00	399	120	77	6	603	abr-06	598	103	81	6	787	sep-11	1247	183	232	7	1670
dic-00	545	121	82	6	753	may-06	349	96	89	6	539	oct-11	1374	208	234	9	1825
ene-01	551	117	80	7	754	jun-06	151	70	78	6	305	nov-11	1510	239	234	10	1993
feb-01	447	107	58	6	619	jul-06	204	82	86	5	378	dic-11	1799	242	229	11	2281
mar-01	233	57	39	5	333	ago-06	306	63	78	3	450	ene-12	1250	288	220	9	1768
abr-01	321	37	55	5	418	sep-06	595	107	89	3	795	feb-12	1250	224	211	10	1696
may-01	242	60	59	6	367	oct-06	816	140	84	6	1045	mar-12	1250	225	220	7	1703
jun-01	121	43	53	5	223	nov-06	977	162	83	6	1228	abr-12	1250	195	223	8	1677
jul-01	100	70	61	5	236	dic-06	801	166	90	6	1063	may-12	1250	192	229	8	1679
ago-01	216	65	59	5	345	ene-07	844	152	84	9	1089	jun-12	1250	104	226	8	1587
sep-01	331	66	57	7	460	feb-07	917	152	93	9	1171	jul-12	1250	120	225	9	1603
oct-01	449	111	65	6	632	mar-07	693	89	82	8	871	ago-12	1250	145	224	8	1627
nov-01	532	118	67	6	724	abr-07	307	105	85	6	503	sep-12	1250	162	231	9	1651
dic-01	540	114	77	5	737	may-07	277	102	85	7	471	oct-12	1250	184	225	7	1666
ene-02	923	108	74	5	1111	jun-07	184	99	80	5	368	nov-12	1250	192	226	7	1675
feb-02	868	120	68	6	1062	jul-07	191	84	66	5	345	dic-12	1250	202	232	7	1691
mar-02	491	94	56	6	647	ago-07	565	90	79	5	738	ene-13	1250	173	231	10	1663
abr-02	607	56	62	5	730	sep-07	612	116	82	5	815	feb-13	1250	173	200	7	1630
may-02	397	64	66	4	532	oct-07	948	140	79	8	1175	mar-13	1250	163	230	10	1653
jun-02	212	69	60	5	346	nov-07	973	159	93	8	1234	abr-13	1250	165	230	9	1654
jul-02	171	57	59	5	292	dic-07	1023	153	92	8	1276	may-13	1250	82	200	9	1541
ago-02	287	68	69	5	429	ene-08	1132	164	92	7	1396	jun-13	1250	102	230	9	1591
sep-02	611	77	63	5	757	feb-08	960	225	93	9	1287	jul-13	1250	112	228	7	1598
oct-02	731	109	66	6	912	mar-08	625	241	105	6	977	ago-13	1250	143	230	6	1629
nov-02	919	122	83	6	1130	abr-08	447	146	111	6	710	sep-13	1250	136	225	6	1617
dic-02	1033	122	85	6	1246	may-08	370	110	112	4	596	oct-13	1250	146	230	7	1633
ene-03	986	122	76	6	1190	jun-08	347	149	116	6	618	nov-13	1250	149	231	7	1637
feb-03	848	117	78	6	1049	jul-08	510	130	124	4	768	dic-13	1250	147	230	5	1633
mar-03	777	85	83	7	952	ago-08	363	123	125	5	616						

Fuente: elaboración propia

**Figura 10-25 Bombeo Periodo Transiente**



Fuente: elaboración propia

En relación con la ubicación de los pozos de explotación, en el caso de los pozos de bombeo de salmuera de Rockwood la posición de éstos en el modelo, así como los valores de caudal bombeado promedio en cada uno de ellos, son los reales y han sido reportados por esta compañía (ver Capítulo 5. Explotación de la cuenca, de este Anexo).

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

En el caso de SQM, que no se dispone de información exacta de la posición y caudal de los pozos, éstos se han distribuido de manera homogénea y con una separación realista entre ellos considerando las áreas de extracción ambientalmente autorizadas (MOP y SOP) antes y después de la RCA N°0226/2006 (cuya explotación inicia en 2009), que se muestran con detalle en la Figura 5-14. Se consideraron caudales netos de extracción y específicamente se tomaron en cuenta las consideraciones siguientes:

- Entre 1997 y 2008 (Figura 10-26), las extracciones se ubican dentro de los antiguos polígonos MOP y SOP, anteriores a la RCA N°0226/2006, que se muestran en el Capítulo 2: Descripción del proyecto, del EIA de SQM. Los caudales de extracción de cada una de esta área se tomaron de la información reportada por el titular en su EIA del año 2005 y en la segunda actualización del modelo de 2013 (ver Figura 5-15 del Capítulo 5. Explotación de la cuenca de este Anexo)
- Entre 2009 y 2013 (Figura 10-37), se consideró la nueva área MOP aprobada en la RCA N°0226/2006, donde los pozos se repartieron uniformemente en la misma. Para el área SOP, sin embargo, los pozos se mantuvieron dentro de la antigua área SOP anterior a la RCA N°0226/2006, ya que de esta manera se consigue un mejor ajuste de la evolución observada de niveles en los pozos cercanos del Noreste del Salar. Para este período se consideró que el 40% se extrae de la zona Norte de extracción (SOP) y el 60% de la zona Sur (MOP) según se infiere a partir de la información que reporta esta compañía.

En la Figura 10-26 se muestra la distribución en el modelo de los pozos de bombeo del periodo de calibración (1997-2008). Para el periodo de validación (2009-2013), la distribución de los pozos en la zona SOP se amplió a la nueva área SOP aprobada en la RCA N°0226/2006 (Figura 10-37).



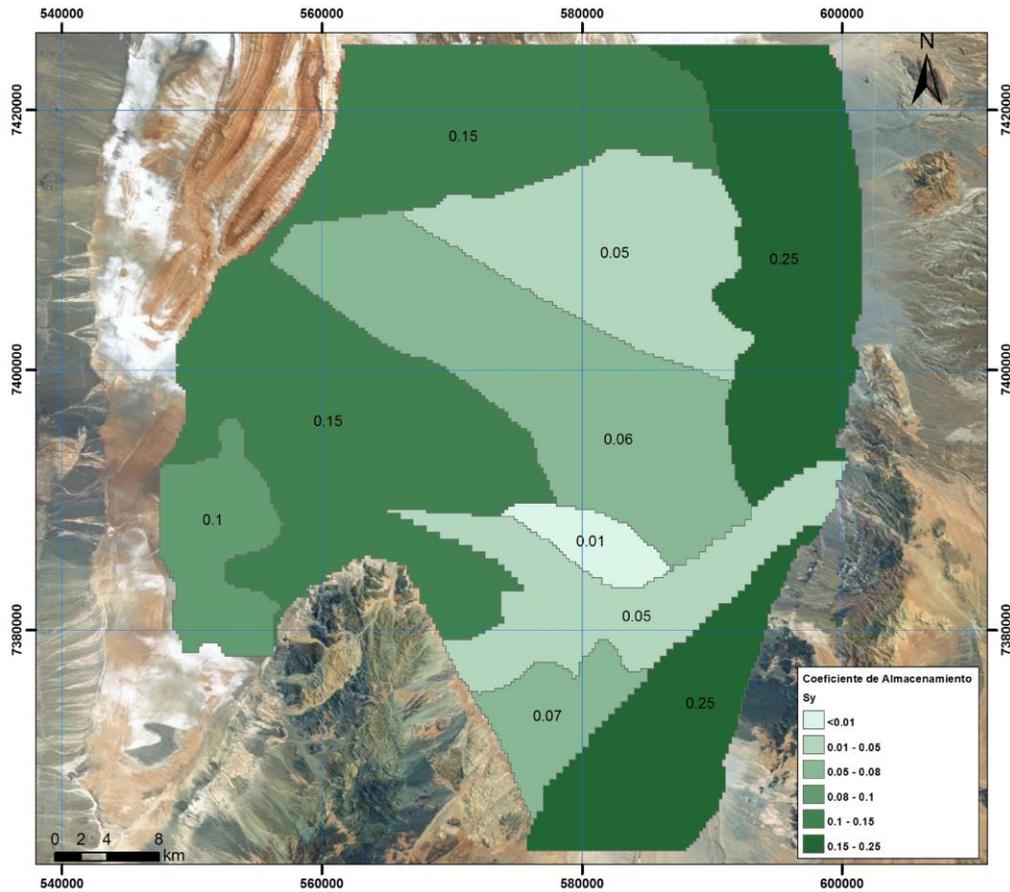
	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

#### 10.2.3.4.3 Coeficiente de almacenamiento

Como se señaló en la metodología de calibración, un parámetro del modelo a calibrar es el coeficiente de almacenamiento, el cual incide con la variable tiempo involucrada en la simulación, por lo que se ajusta en la calibración en régimen transiente.

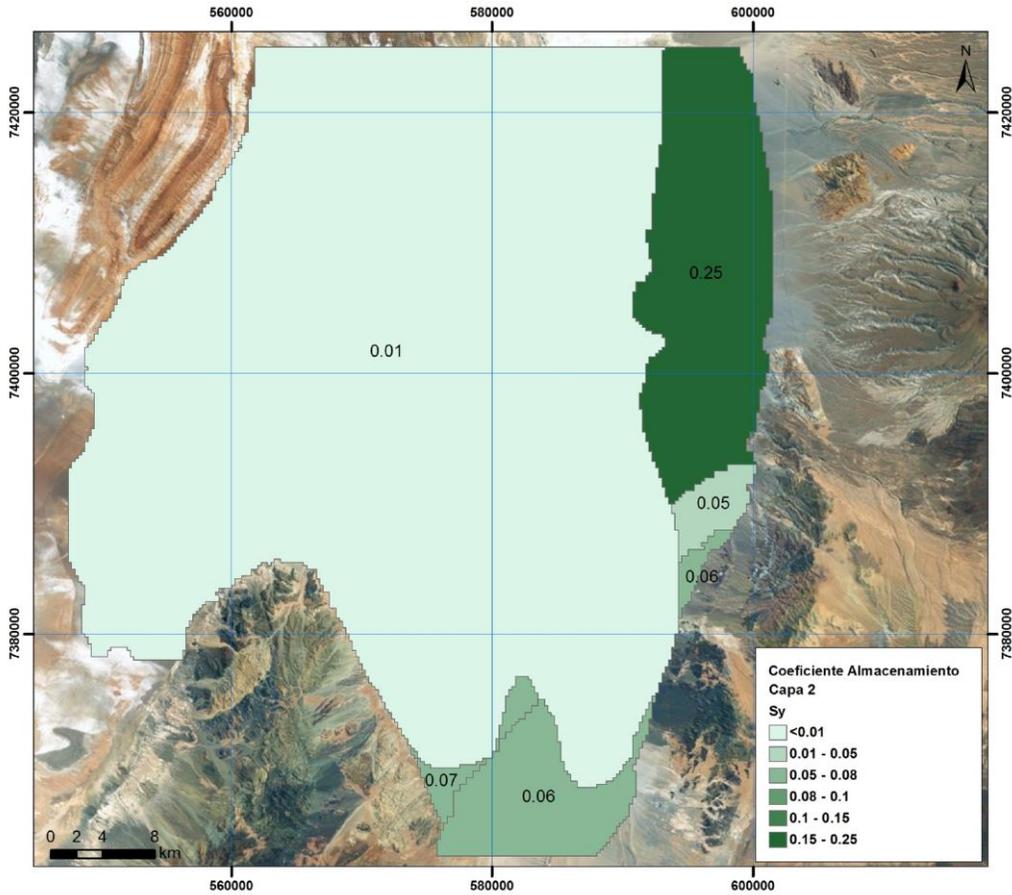
A partir de una definición preliminar de este parámetro sobre la base de antecedentes bibliográficos descritos en el punto 8.2.3 del capítulo de Hidrogeología, se asignó este coeficiente para las 3 capas del modelo. Posteriormente este coeficiente se ajustó en la Capa 1, teniendo como objetivo de calibración la tendencia, en general al descenso, de los niveles observados en los pozos de observación utilizados en este proceso. Así, los valores para la Capa 1 del modelo, que corresponde principalmente al estrato donde se produce la explotación de la salmuera fueron entre 1 y 25% ( $S_y$ ), cuya distribución se muestra en la Figura 10-27. Para las otras capas del modelo, los valores utilizados fueron también entre 1 y un 25% en la Capa 2 y de 15% en la Capa 3.

**Figura 10-27 Coeficiente de almacenamiento en la Capa 1**



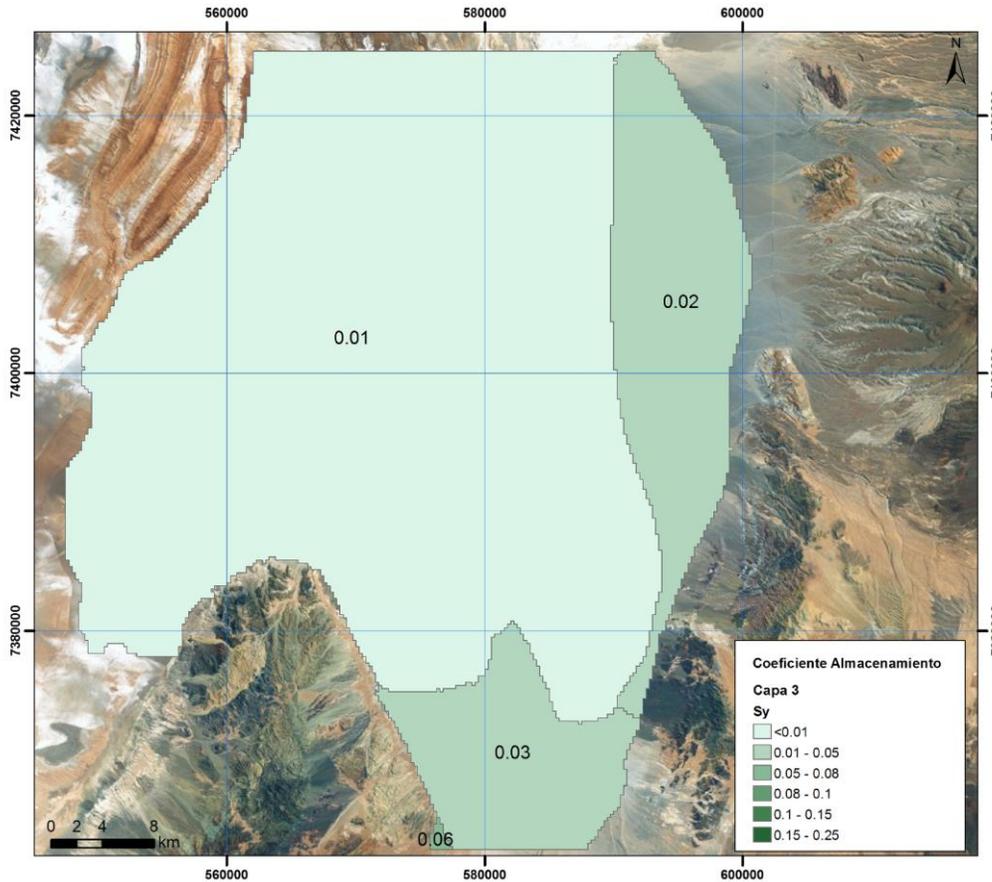
Fuente: Elaboración propia

**Figura 10-28 Coeficiente de almacenamiento en la capa 2**



Fuente: Elaboración propia

**Figura 10-29 Coeficiente de almacenamiento en la Capa 3**



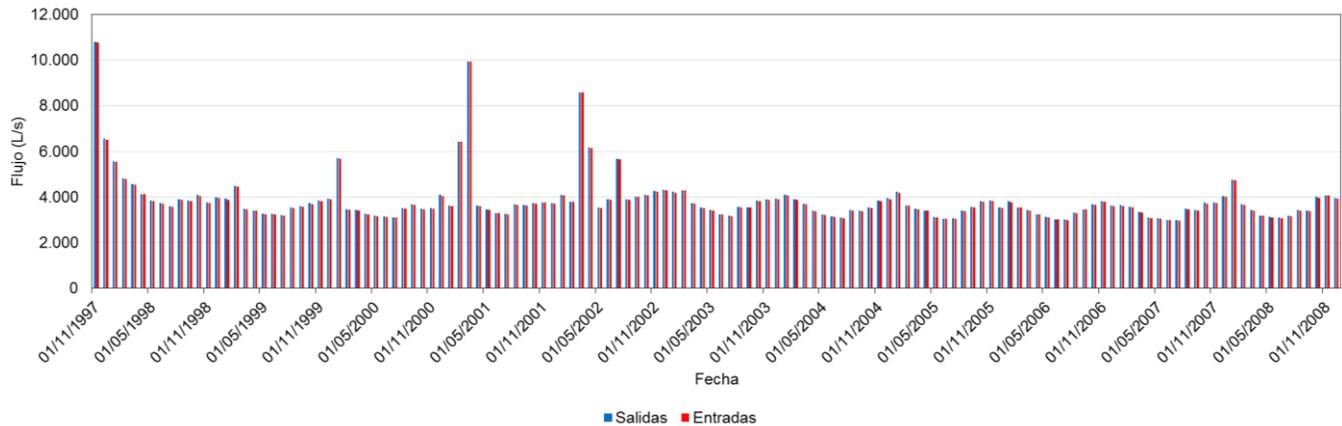
Fuente: Elaboración propia

#### 10.2.3.4.4 Balance de masas

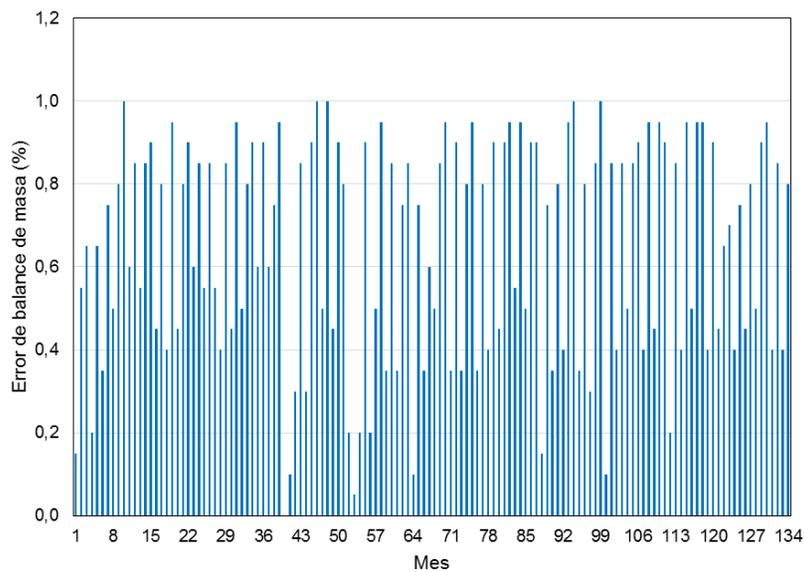
El error de balance del modelo numérico se calcula a partir de la diferencia entre las entradas y las salidas para cada uno de los periodos de estrés (meses) de la calibración. Según la Guía de Modelación (SEIA, 2012), esta diferencia expresada en términos porcentuales debe ser menor al 1% en todos los periodos considerados en la calibración.

En este modelo, donde las entradas y salidas han variado, conforme lo muestra la Figura 10-30 entre 2.978 y 10.789 L/s, la diferencia máxima medida en uno de los 134 meses modelados, es de 40 L/s, que equivale en términos porcentuales, a un error de balance de masas absoluto inferior al 1%. Adicionalmente, en la Figura 10-31 se puede apreciar que para cada uno de los periodos de stress el error de balance es inferior o igual al 1%, siendo en promedio de 0,56%, dando así cumplimiento a las exigencias de la Guía de Uso de Modelos de Aguas Subterráneas (SEIA, 2012) en esta materia.

**Figura 10-30 Entradas y salidas período de calibración**



**Figura 10-31 Error de balance de masa período de calibración**



#### 10.2.3.4.5 Descarga natural generada por el modelo

Como se ha señalado, la descarga natural del sistema modelado, tanto en el núcleo como la zona marginal, se produce por la evapotranspiración del nivel de agua subterránea próximo a la superficie, representada en el modelo por condición de borde EVT con curvas de evaporación de 2 segmentos diferentes para invierno y verano, y por afloramientos de agua representados en el modelo por celdas tipo dren. Los parámetros de estas dos condiciones de borde se mantienen a los especificados en modelo permanente.

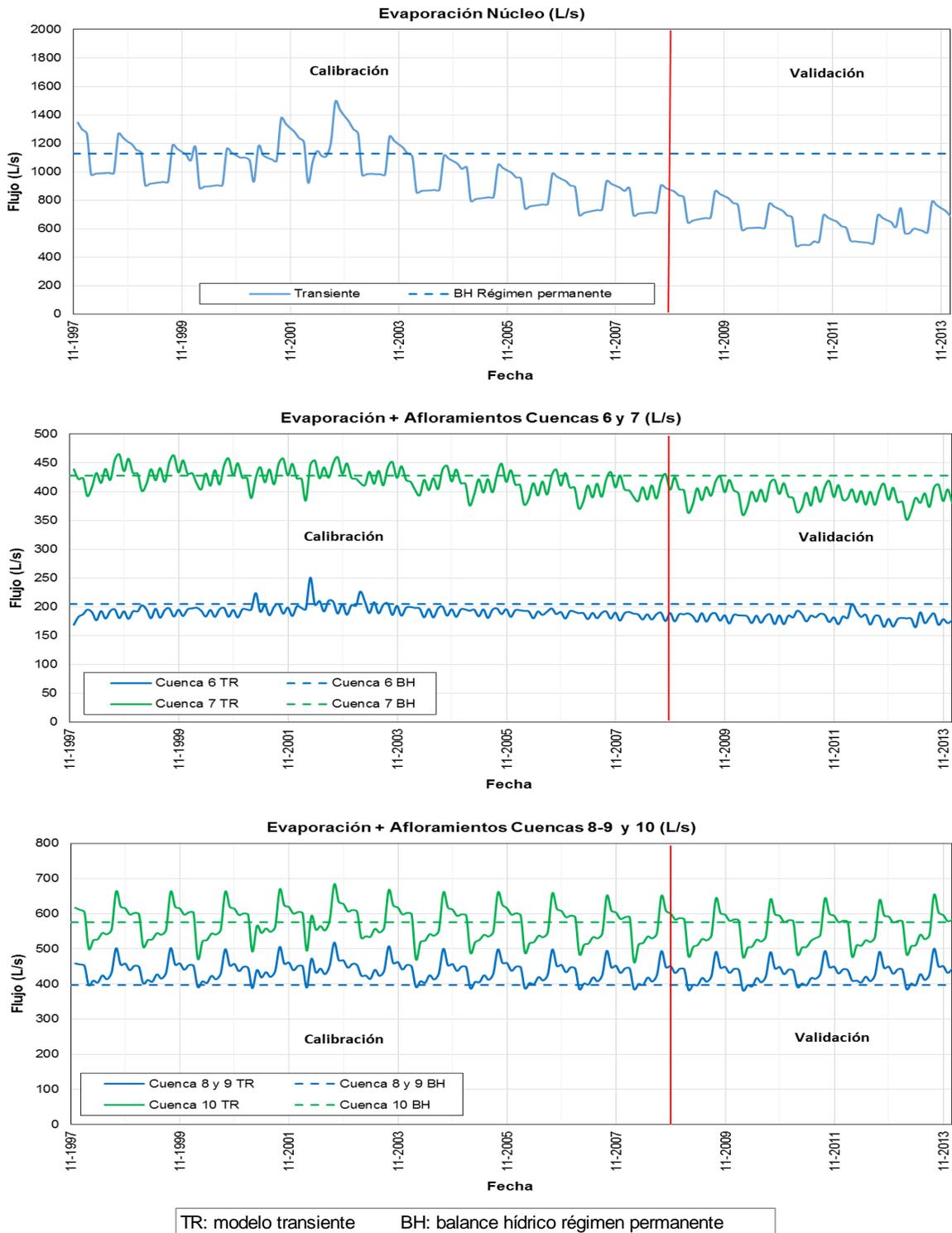
En los gráficos de la Figura 10-32 se muestra la evolución de la descarga del modelo (evaporación más afloramiento) en el período de calibración transiente, donde se ha agregado como línea horizontal el valor

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

determinado por el balance hídrico utilizado en la calibración permanente. Se observa una variación estacional de la descarga que corresponde a la mayor evaporación que se produce en verano que en invierno, representada en el modelo, como se explicó anteriormente, mediante una tasa de evaporación máxima (correspondiente a profundidad igual a cero en curvas de evaporación) diferente para invierno y verano. En consecuencia, el modelo representa adecuadamente la descarga por evaporación y afloramientos que alimentan las lagunas, mayor en verano y menor en invierno.

En estos gráficos se observa que el modelo reproduce bien las variaciones en la descarga de invierno y verano, que en los primeros años se mantiene en torno a la determinada para el año 1997. Los afloramientos de la subcuenca 6 representan el aporte al sistema lagunar de Soncor, de la subcuenca 7 al de Quelana, de las subcuencas 8 y 9 al de Peine y de la subcuenca 10 al de La Punta – La Brava. La disminución de la descarga que se muestra a partir de aproximadamente el año 2002 en las subcuencas 6, 7 y 10, y en el Núcleo, se explica debido a que en estas zonas el aumento del bombeo ha producido descensos en los niveles piezométricos provocando también que disminuya la tasa de evaporación.

**Figura 10-32 Descarga Modelo Calibración Transiente**



Fuente: Elaboración propia

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

#### 10.2.3.4.6 Niveles simulados

En los gráficos de la Figura 10-33 y Figura 10-34 se muestra la bondad del ajuste de la calibración transiente, comparando los niveles medidos y simulados para los 27 pozos de observación señalados anteriormente. Como se señaló anteriormente, la calibración transiente tiene como objetivo calibrar la tendencia de la evolución de los niveles piezométricos y las diferencias que se presentan en la cota topográfica, que son de pocos centímetros, se deben principalmente a las diferencias obtenidas en la calibración permanente y además posibles imprecisiones de la información disponible respecto de las cotas de los pozos de observación.

Analizando los resultados, se observa en general un buen ajuste de tendencia entre los niveles medidos y simulados, tanto en el acuífero de agua salobre como en el núcleo del Salar (salmuera) es decir, podemos afirmar que el modelo representa bien la evolución y tendencia de los niveles de agua observados, en cuanto a descensos producto del bombeo, oscilaciones estacionales del nivel entre invierno y verano, y ascensos bruscos producto de los eventos extremos de precipitación.

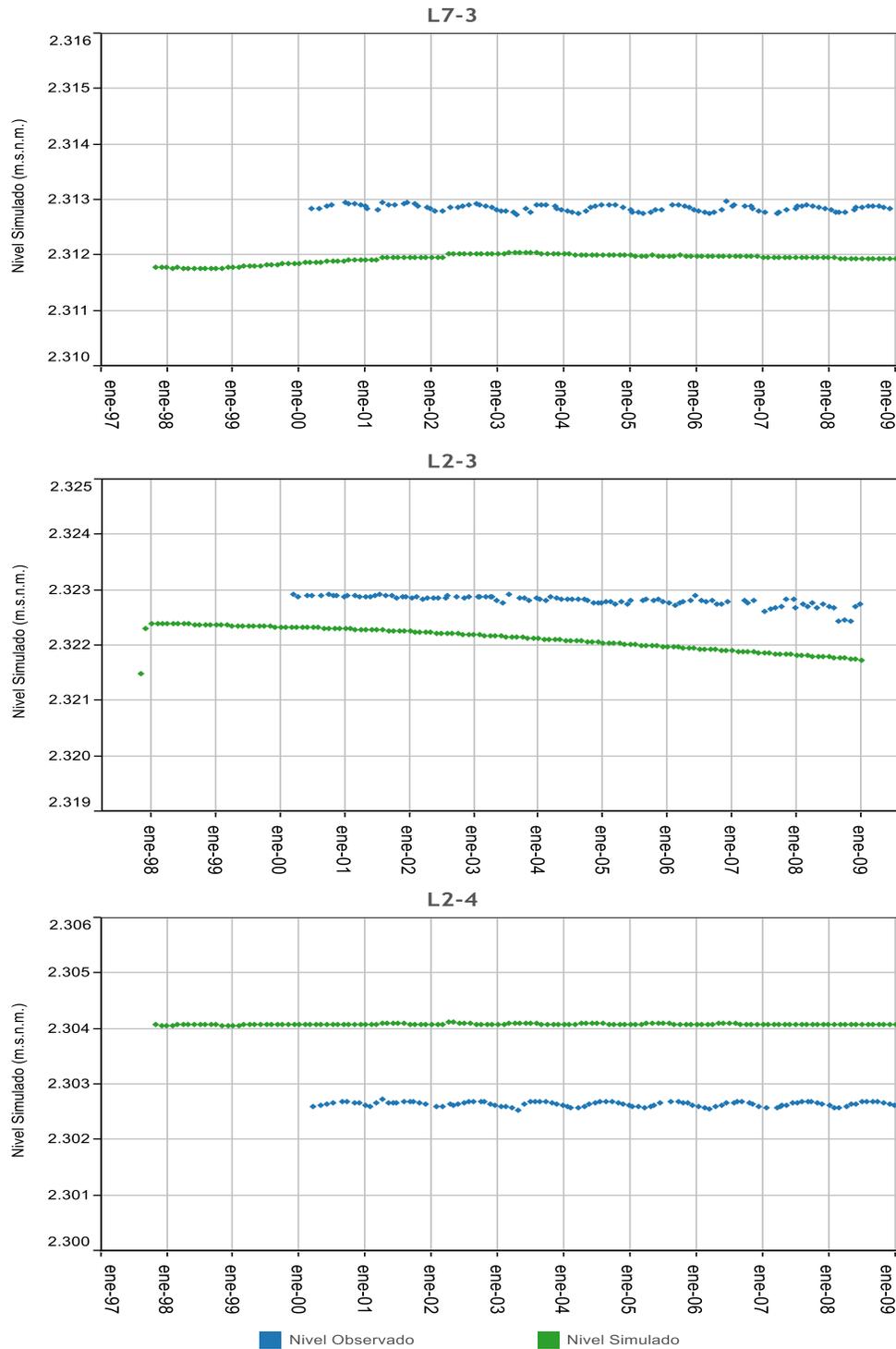
En la Tabla 10-14 se señalan los parámetros estadísticos que muestran la bondad del ajuste de la calibración transiente en relación con los pozos controlados, donde se observa un Error Medio Absoluto Normalizado (Normal MAE) de 2,5% como promedio de los 134 periodos, con un valor mensual máximo de 2,9%. Este valor se encuentra dentro de lo requerido en la Guía de Uso de Modelos de Aguas Subterráneas (SEA 2012).

**Tabla 10-14 Estadísticos calibración transiente**

Parámetro	Nov-1997 a Dic-2008
Nº Pozos de Observación	27
Número de residuales	3645
Promedio Residua (m)	-0,39
Error Medio Absoluto MAE (m)	0,63
RMS (m)	0,78
Normal MAE (%)	2,52
Normal RMS (%)	3,11

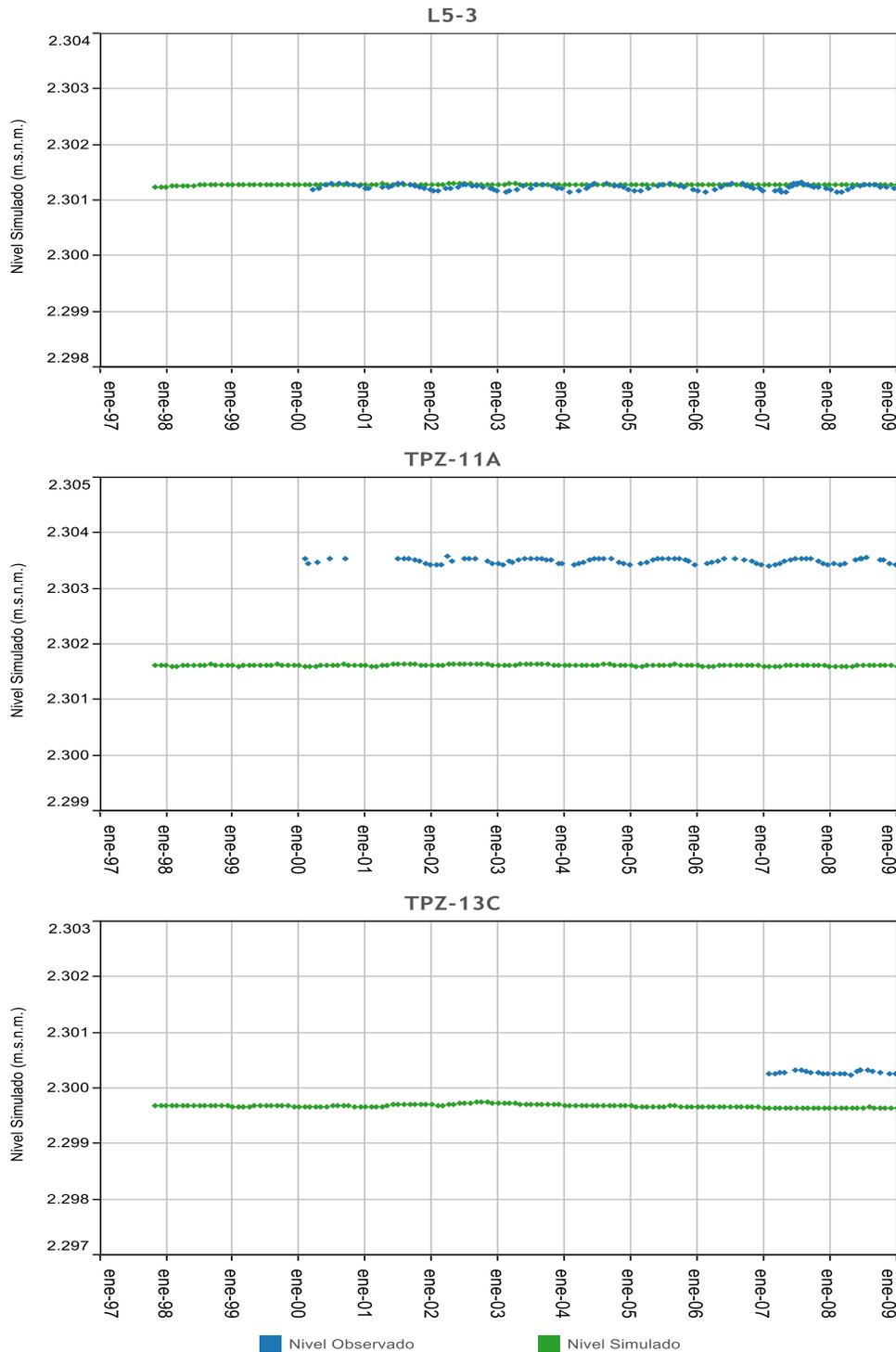
Fuente: Elaboración propia

**Figura 10-33 Calibración niveles sector Agua Salobre**



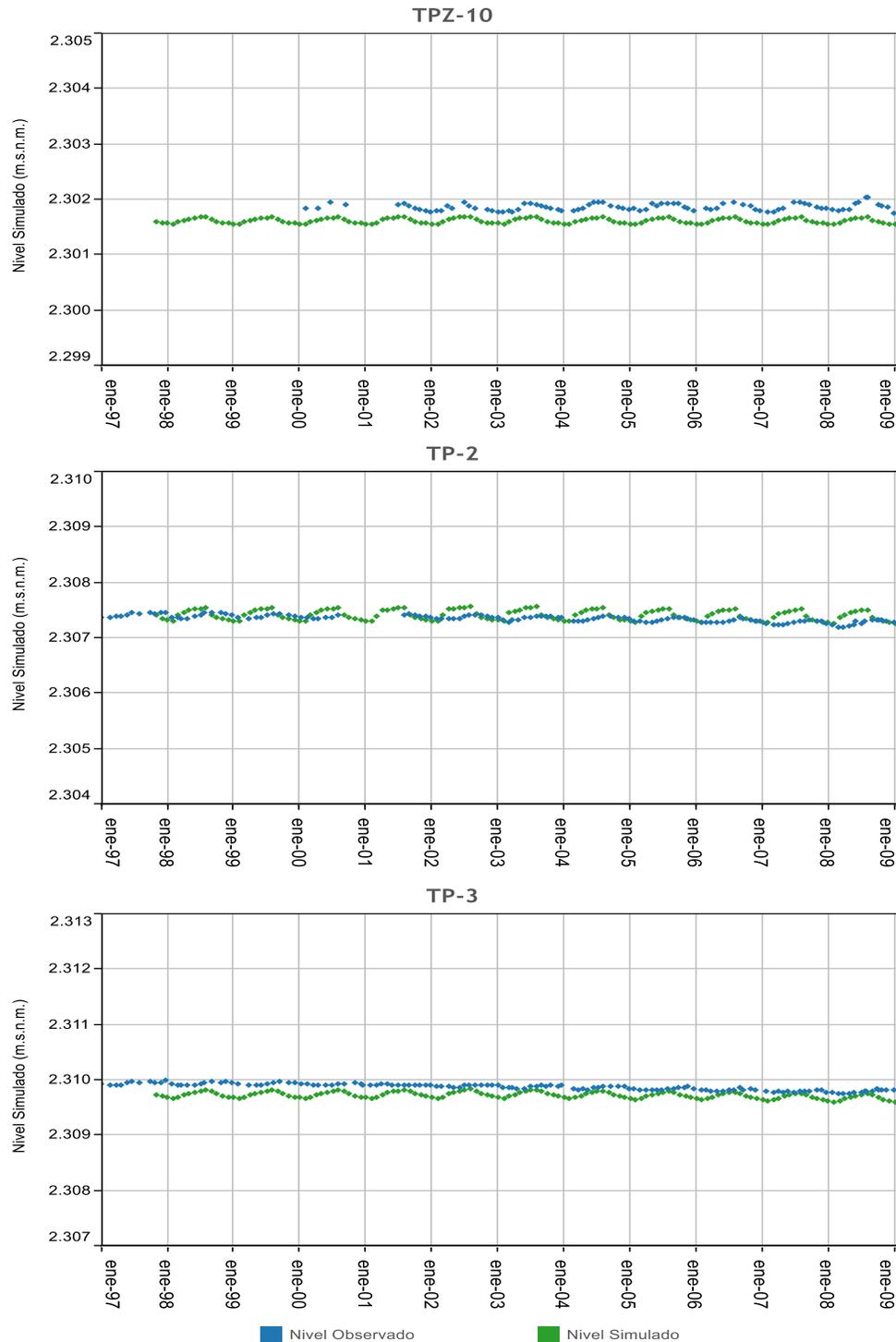
Fuente: Elaboración propia

**Figura 10-33 Calibración niveles sector Agua Salobre (Cont.)**



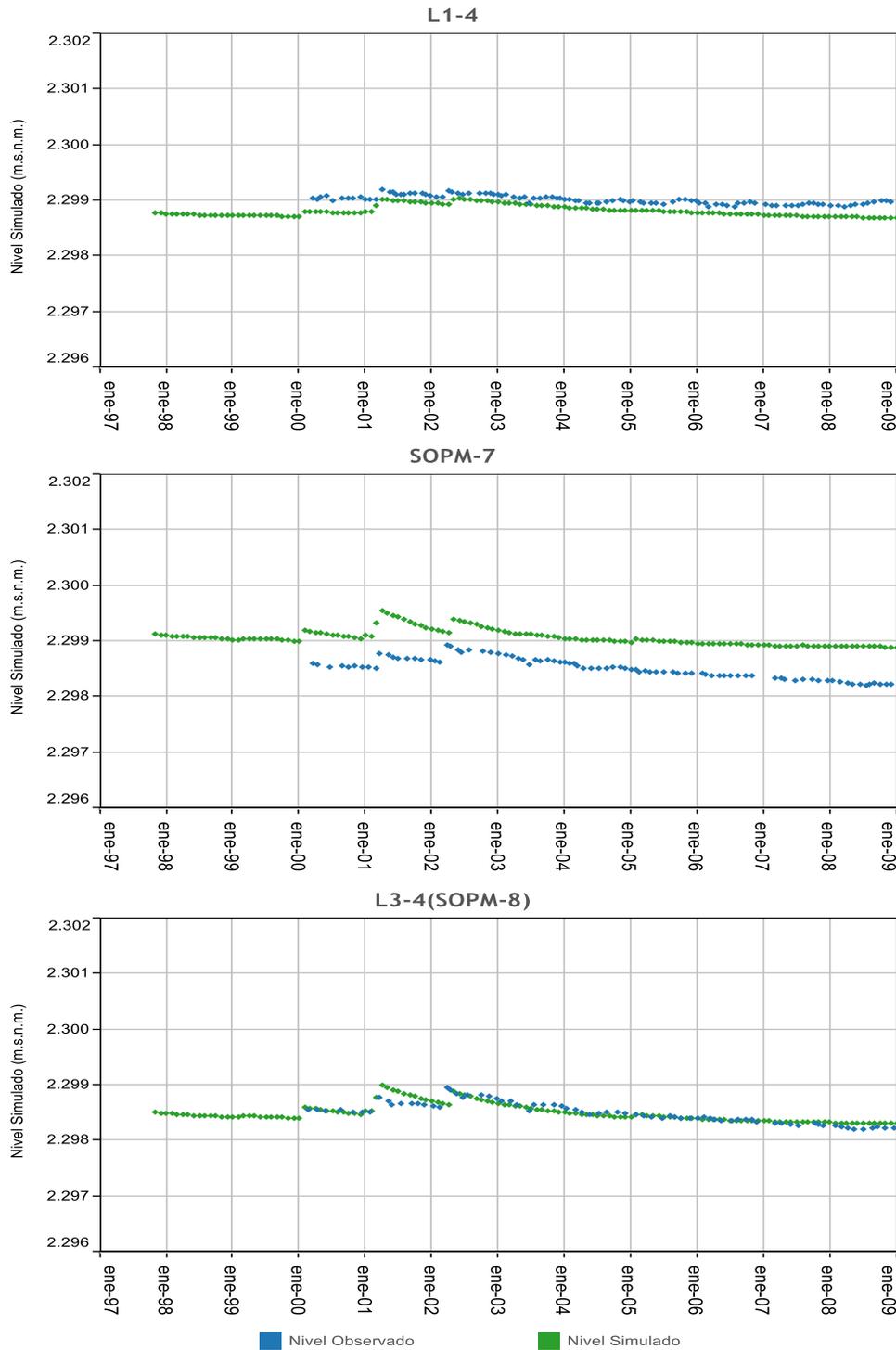
Fuente: Elaboración propia

**Figura 10-33 Calibración niveles sector Agua Salobre (Cont.)**



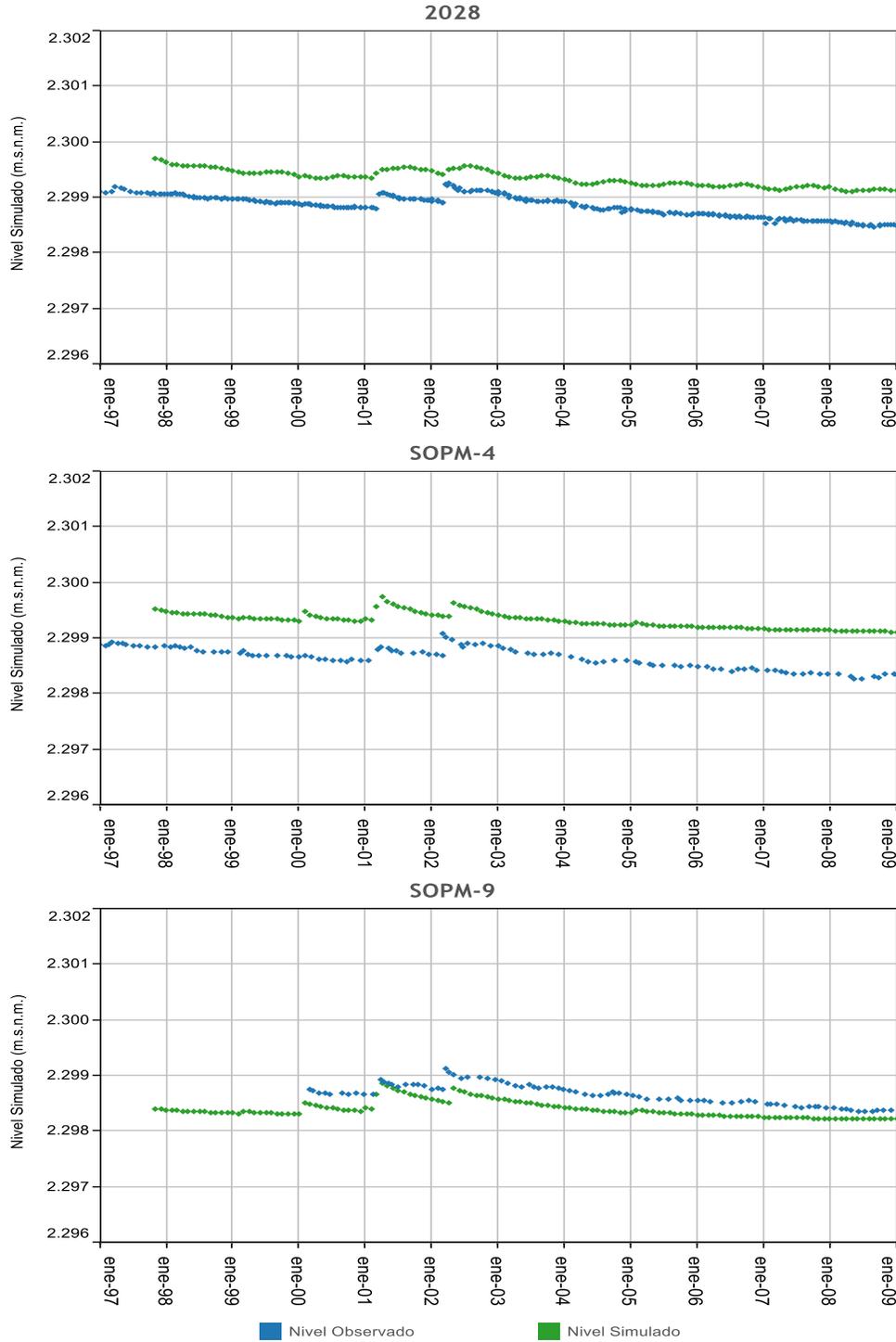
Fuente: Elaboración propia

**Figura 10-34 Calibración de niveles en el sector de salmuera**



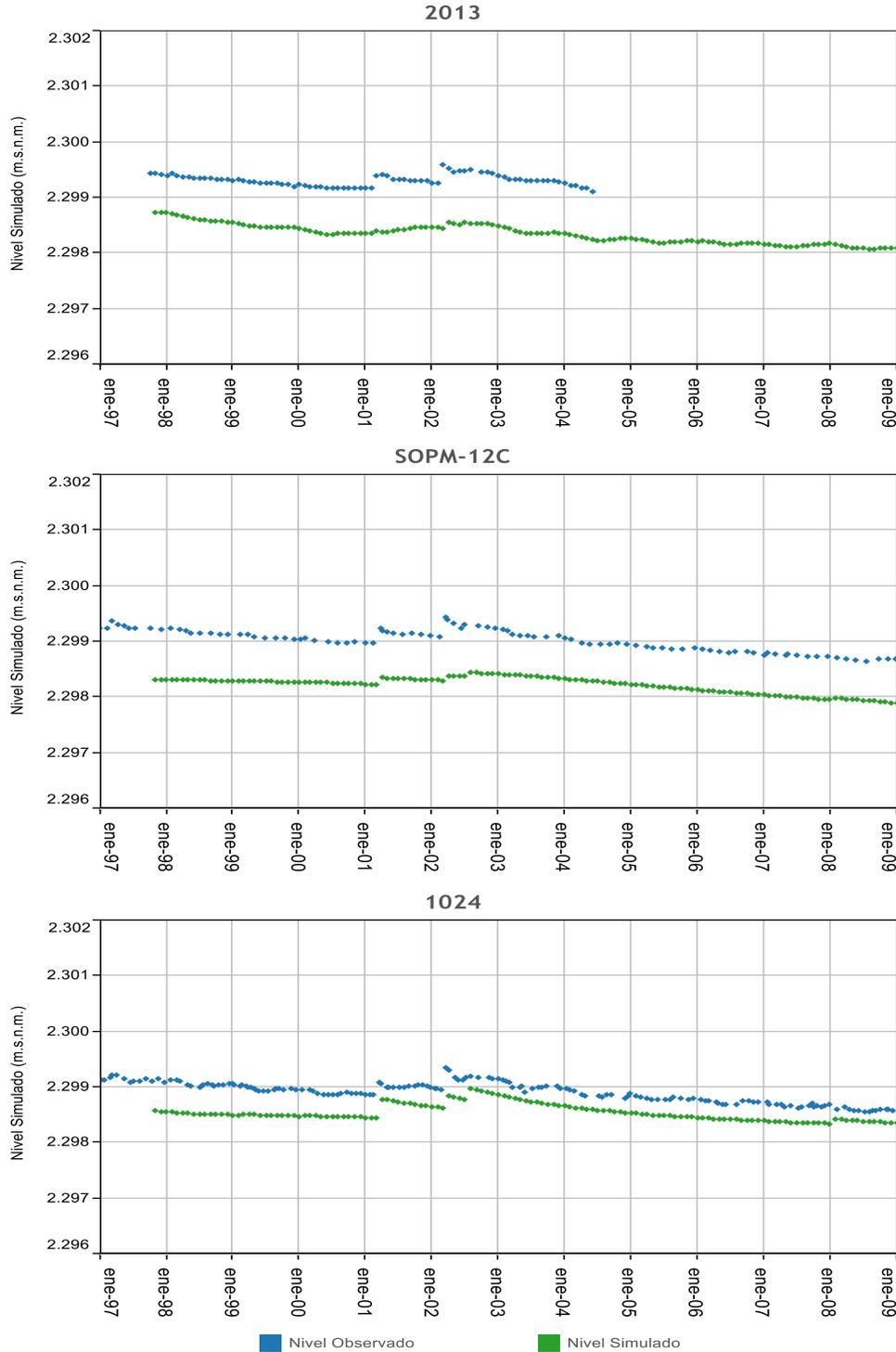
Fuente: Elaboración propia

**Figura 10-34 Calibración de niveles en el sector de salmuera (Cont.)**



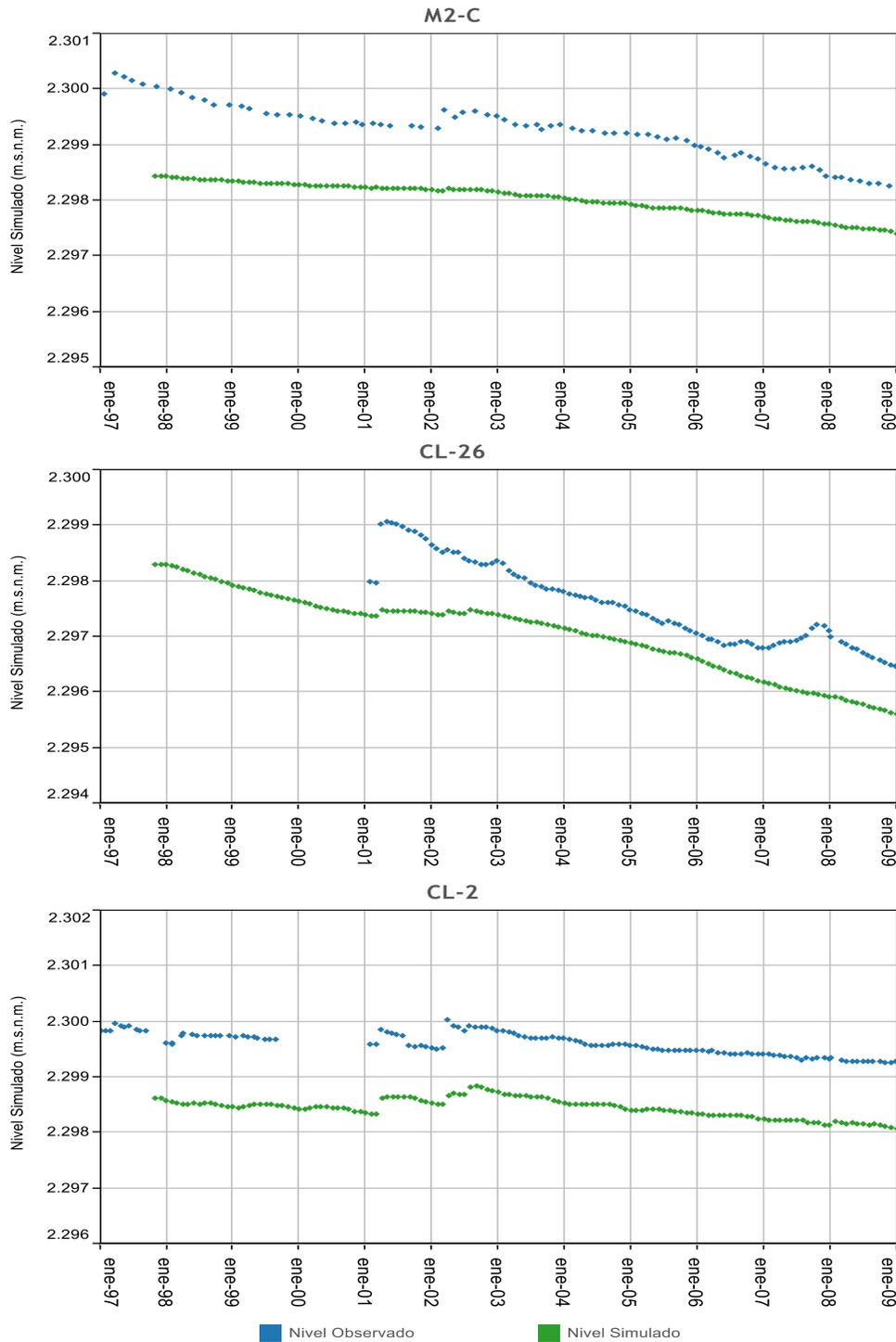
Fuente: Elaboración propia

**Figura 10-34 Calibración de niveles en el sector de salmuera (Cont.)**



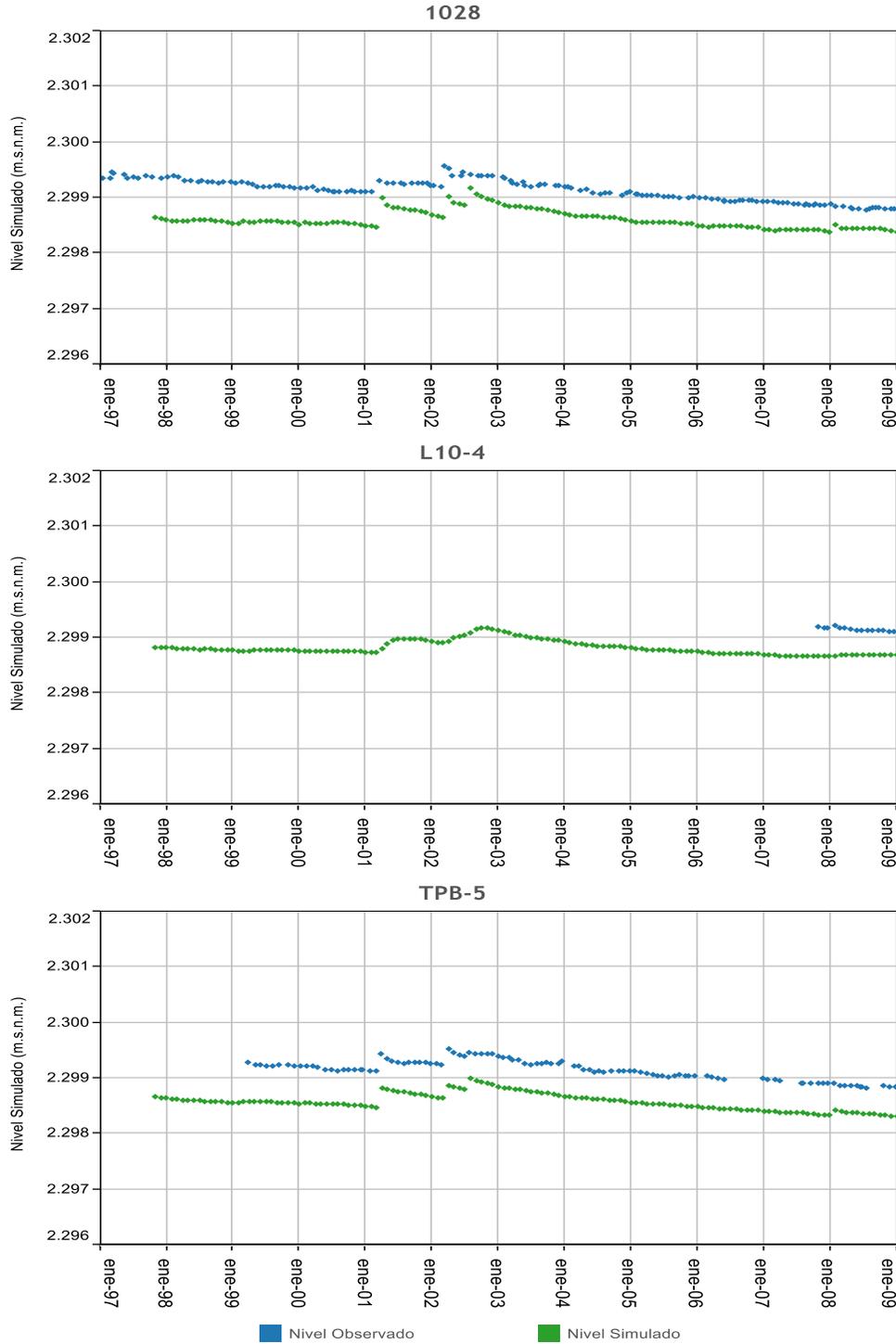
Fuente: Elaboración propia

**Figura 10-34 Calibración de niveles en el sector de salmuera (Cont.)**



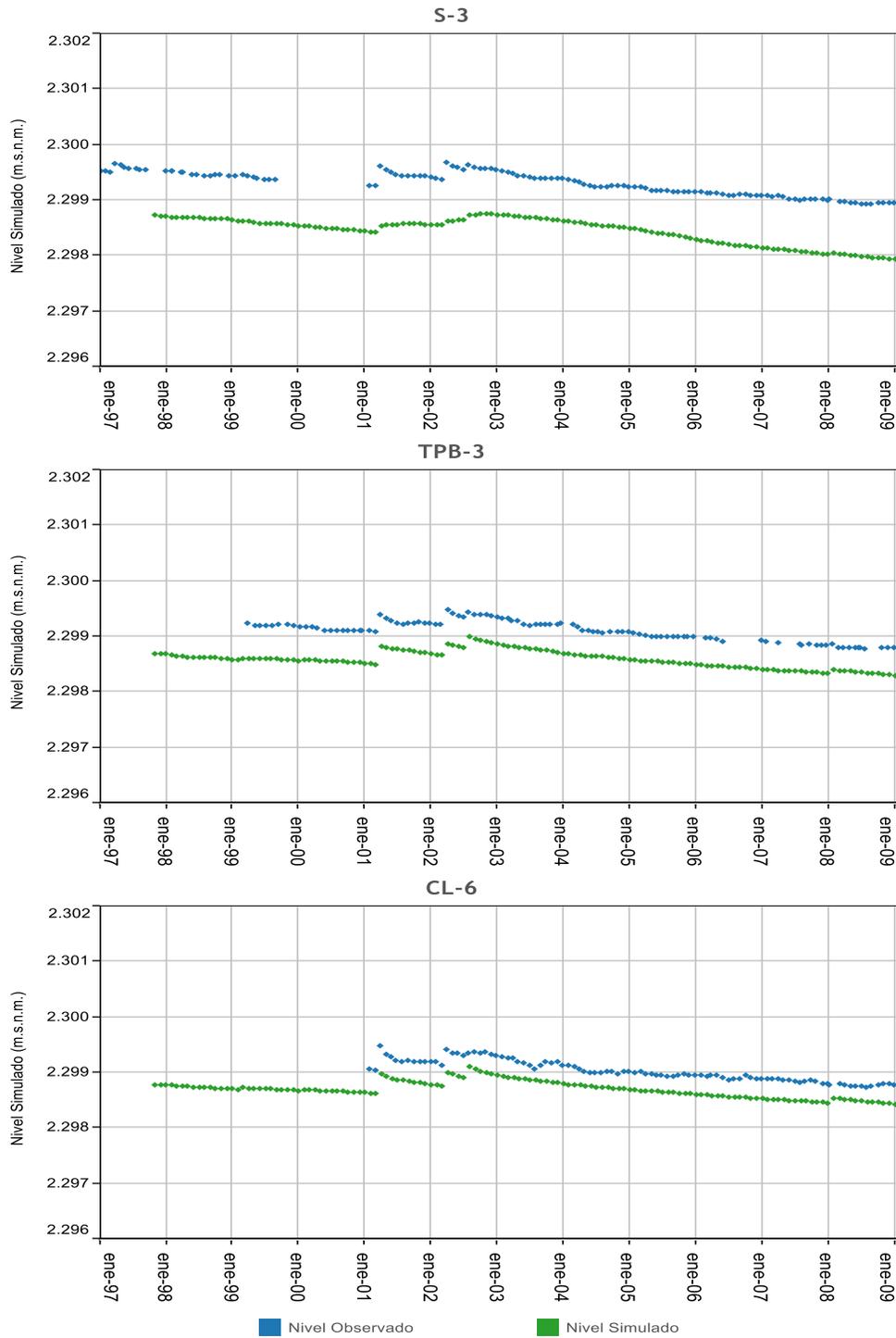
Fuente: Elaboración propia

**Figura 10-34 Calibración de niveles en el sector de salmuera (Cont.)**



Fuente: Elaboración propia

**Figura 10-34 Calibración de niveles en el sector de salmuera (Cont.)**



Fuente: Elaboración propia

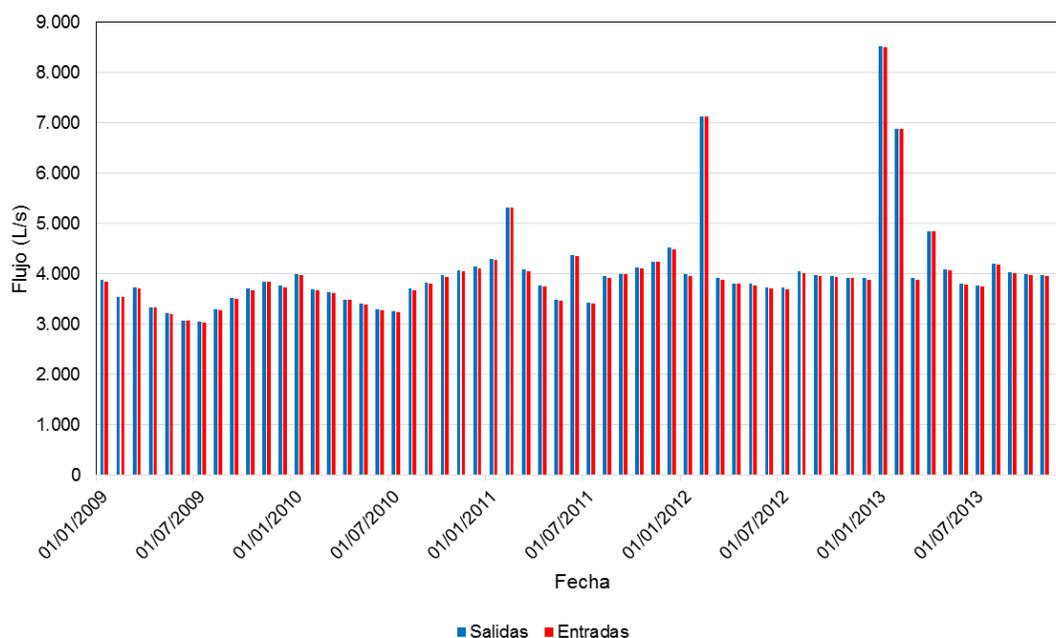
### 10.2.4 Validación del Modelo

La validación del modelo se realiza utilizando el modelo calibrado en régimen transiente, pero respecto un conjunto de observaciones independientes a las utilizadas para la calibración. Se opera el modelo con los parámetros hidráulicos calibrados y comparando los niveles simulados con los niveles observados en el periodo utilizado para validar el modelo. El periodo utilizado para la validación del modelo fue 2009-2013, es decir, a continuación del periodo de calibración.

La implementación de la recarga mensual y explotación mensual correspondiente al periodo de validación, se realiza de la forma y metodología de cálculo expuesta en punto anterior, Calibración régimen transiente. La recarga del periodo se observa en la Figura 10-24 y el bombeo mensual se incluyó en la Tabla 10-13. La ubicación determinada para los pozos de bombeo en este periodo 2009-2013 se muestra en la Figura 10-37.

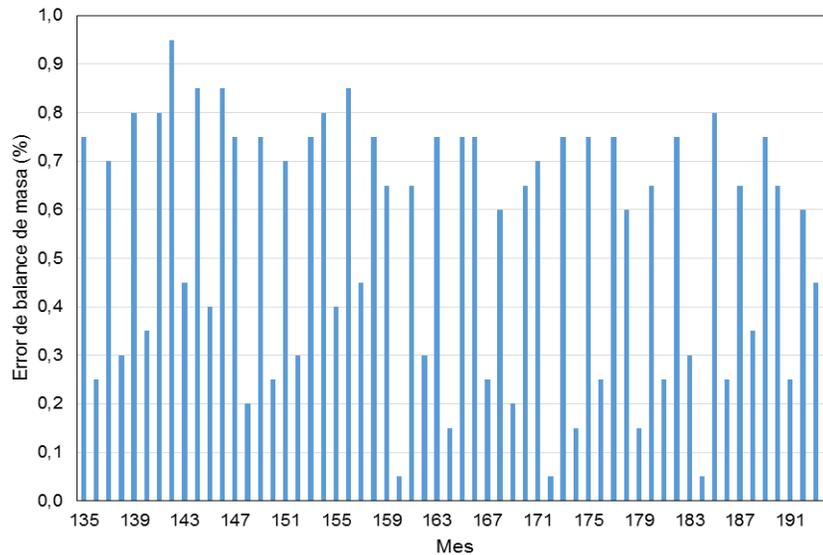
Para evaluar el funcionamiento del modelo numérico en el período de validación, se calculó la diferencia entre las entradas y las salidas observadas en la Figura 10-35, que varían aproximadamente entre 3.060 y 8.526 (L/s) para los 60 períodos que lo componen. Esta diferencia, expresada en porcentaje, corresponde al error de balance de masas. El promedio de los valores absolutos del error de balance para el período de validación es de 0,46%, con un máximo de 1%, dando también cumplimiento a las exigencias de la Guía de Uso de Modelos de Aguas Subterráneas (SEIA, 2012).

**Figura 10-35 Entradas y salidas período de validación**



Fuente: Elaboración propia

**Figura 10-36 Error de balance de masa período de validación**



Fuente: Elaboración propia

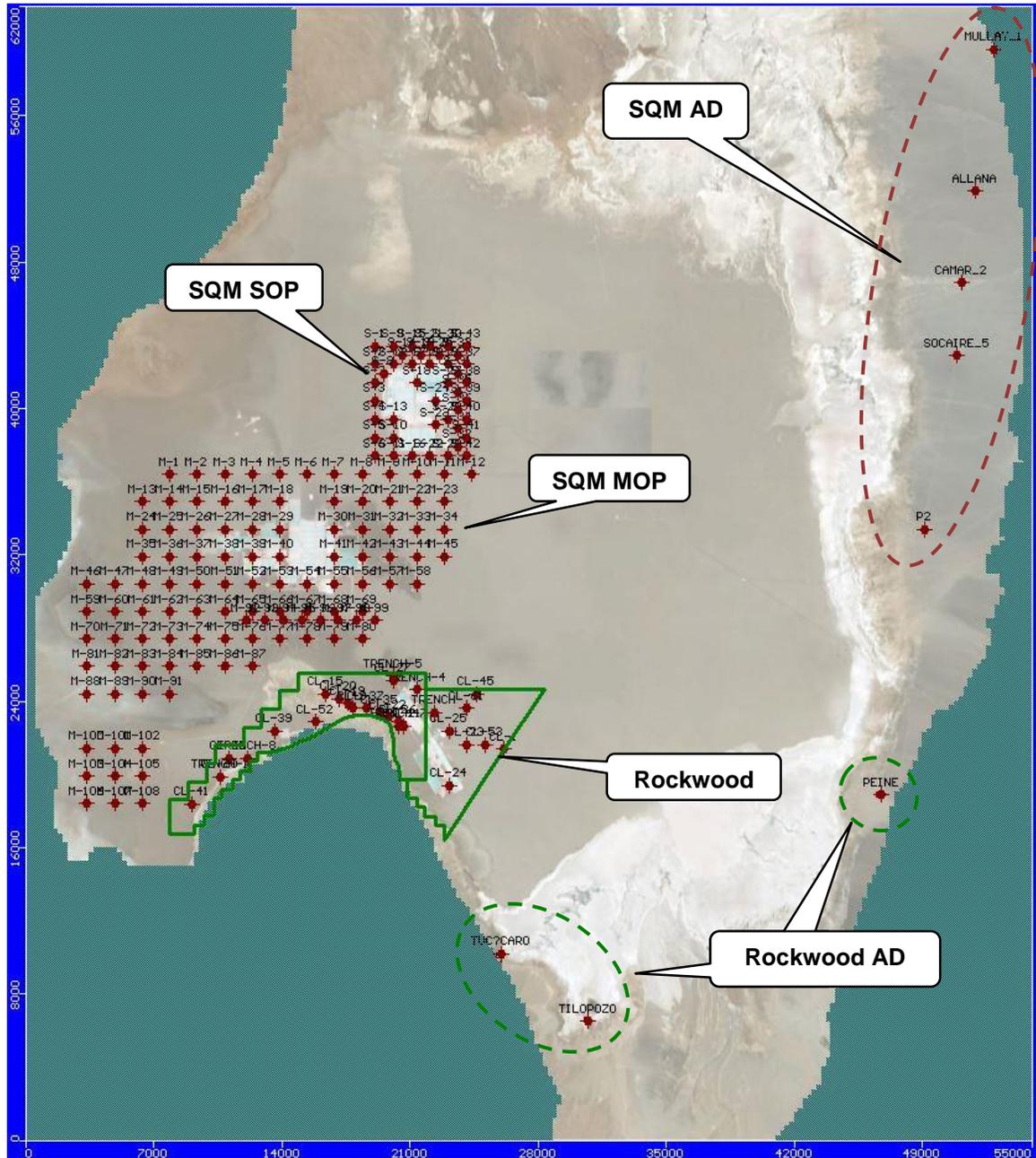
En la Tabla 10-15 se señalan los parámetros estadísticos que muestran la bondad del ajuste de la validación en relación con los pozos controlados, donde se observa un Error Medio Absoluto (Normal MAE) de 3,7% como promedio de los 60 periodos, con un máximo mensual de 3,9%. Este valor se encuentra dentro de lo requerido en la Guía de Uso de Modelos de Aguas Subterráneas en el SEIA, (SEA 2012)

**Tabla 10-15 Estadísticos validación**

Parámetro	Ene-2009 a Dic-2013
Nº Pozos de Observación	27
Número de residuales	2100
Promedio Residual (m)	-0,23
Error Medio Absoluto MAE (m)	0,98
RMS (m)	1,05
Normal MAE (%)	3,70
Normal RMS (%)	3,96

Fuente: Elaboración propia

**Figura 10-37 Distribución de pozos de bombeo periodo validación (2009-2014)**

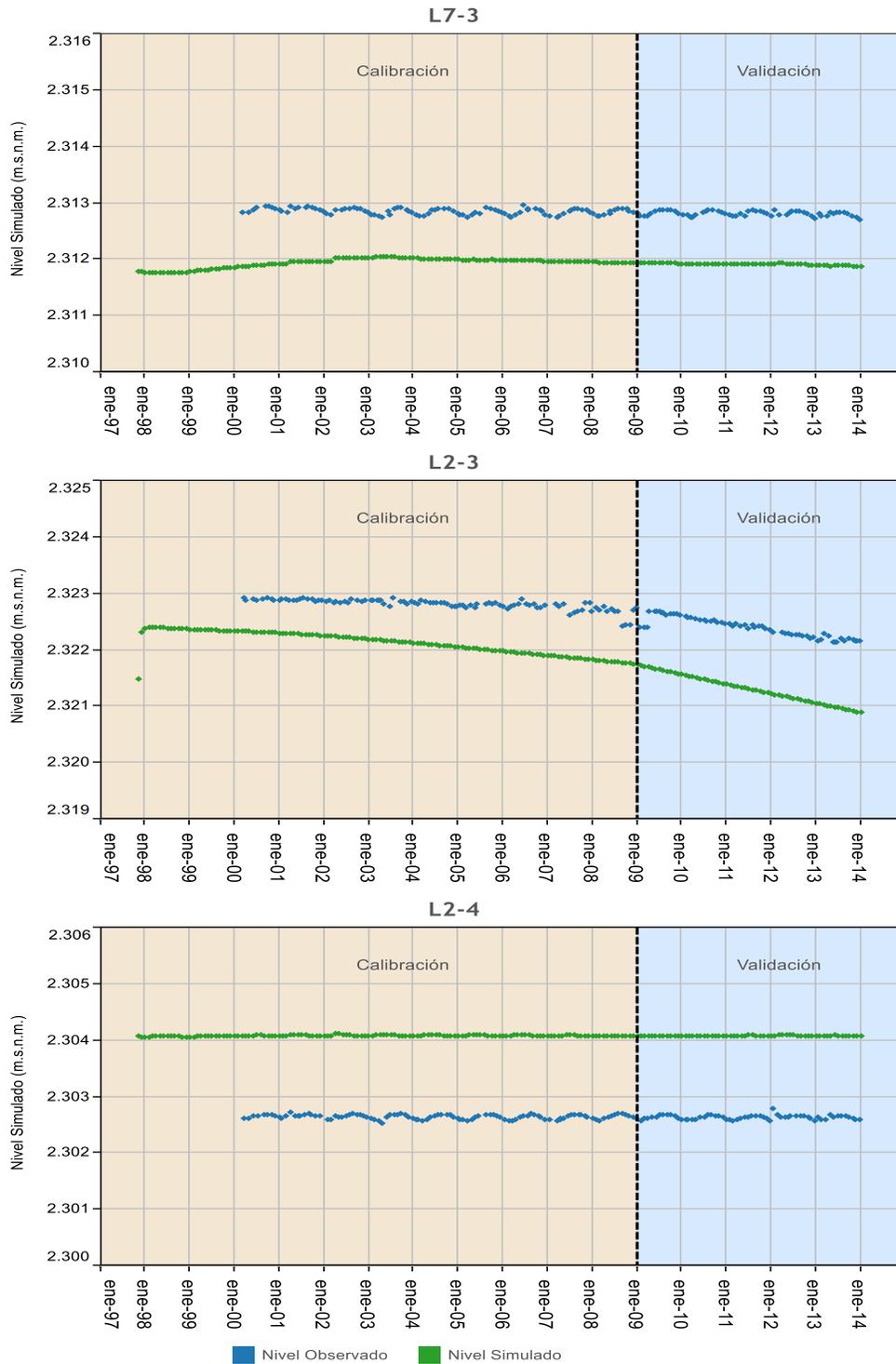


Fuente: Elaboración propia

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

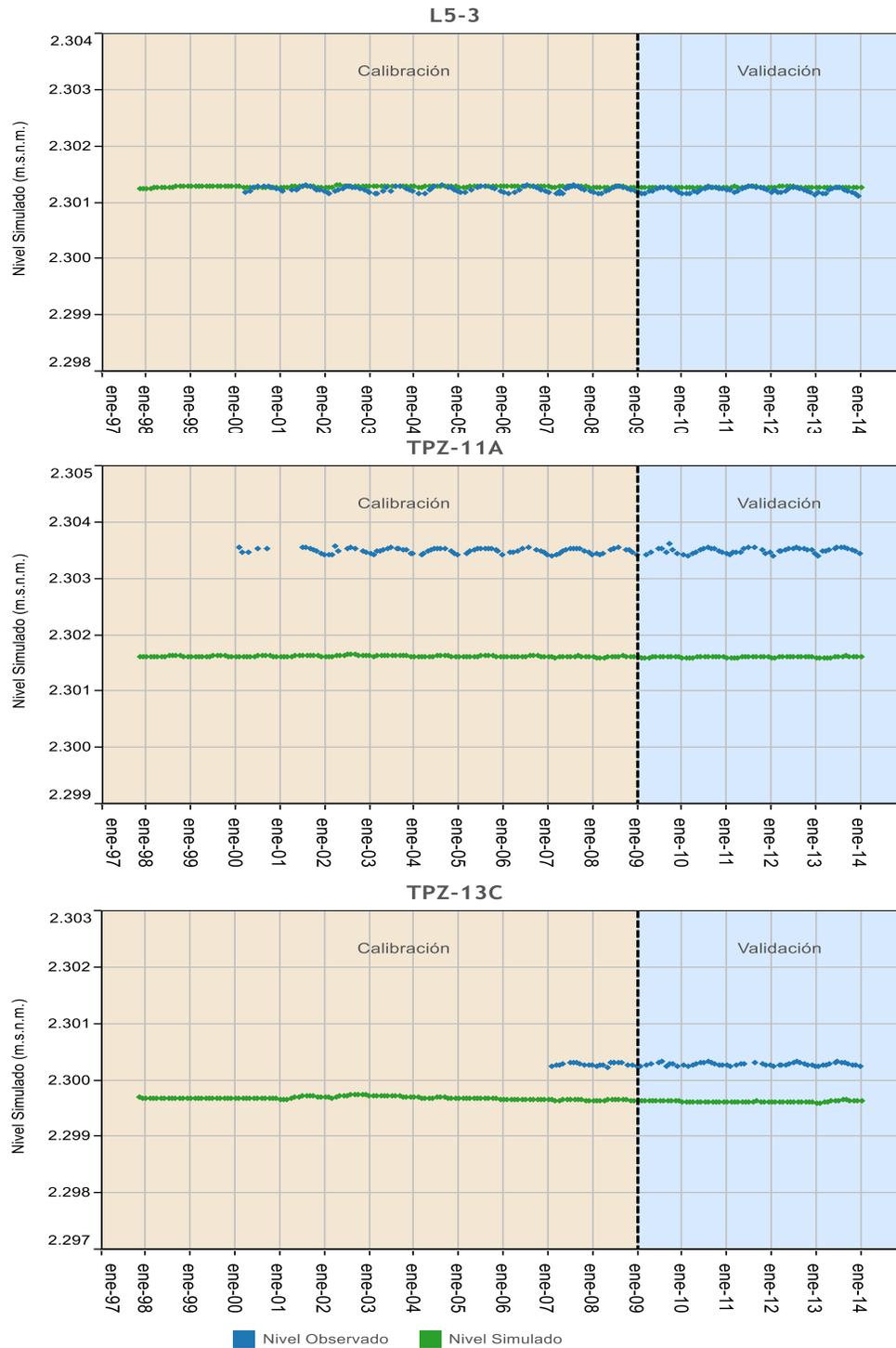
En la Figura 10-38 y Figura 10-39 se muestran los niveles medidos y simulados en el periodo de validación, utilizando los mismos pozos de observación considerados en la calibración en régimen transiente e incluyendo en los gráficos el periodo de calibración. En ellas se observa, al igual que para el periodo de calibración, una buena representación de los niveles observados para el periodo de validación (2009-2013), reproduciéndose aceptablemente la tendencia observada de los niveles piezométricos.

**Figura 10-38 Validación transiente sector agua salobre**



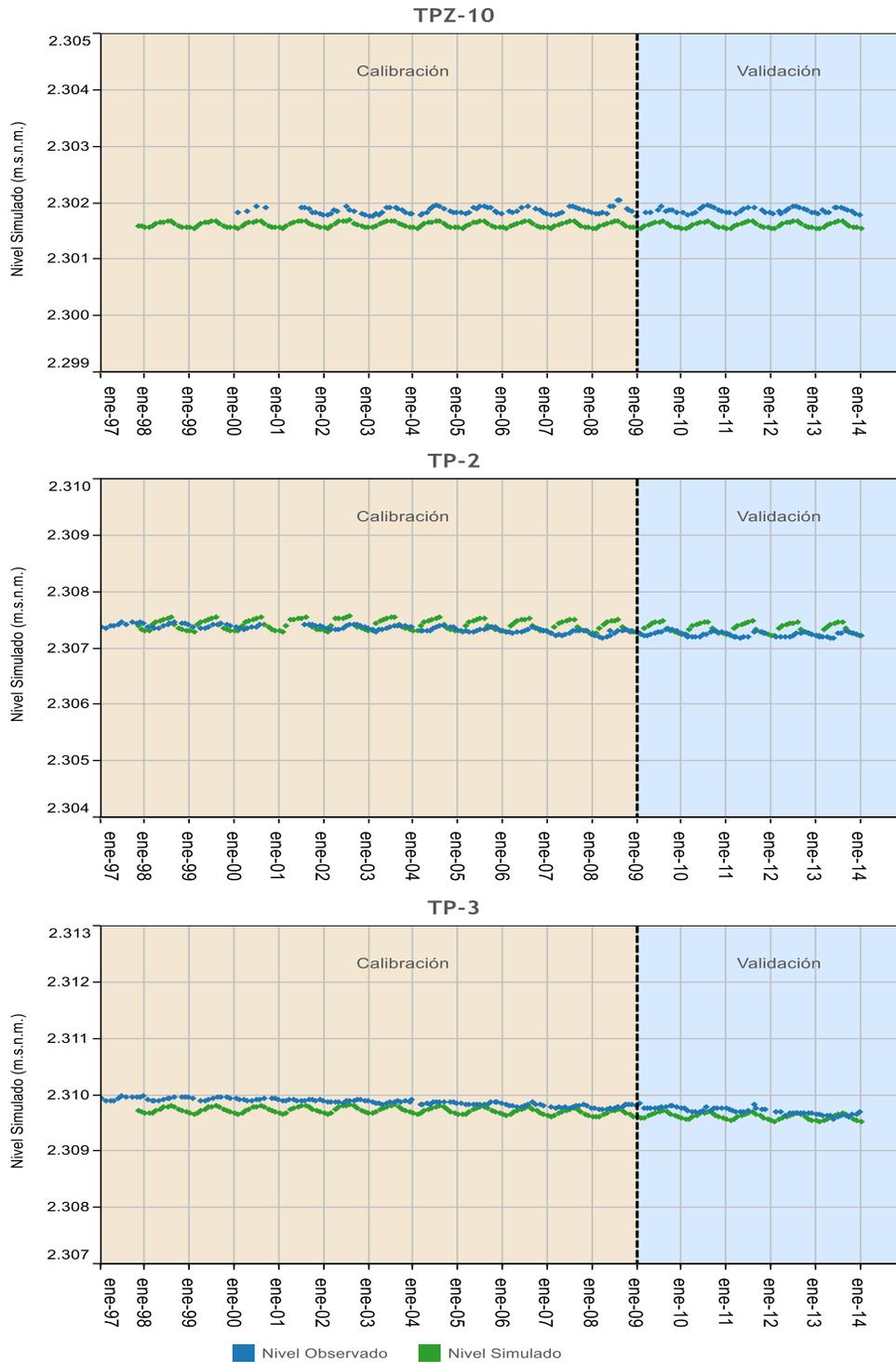
Fuente: Elaboración propia

**Figura 10-38 Validación transiente sector agua salobre (Cont.)**



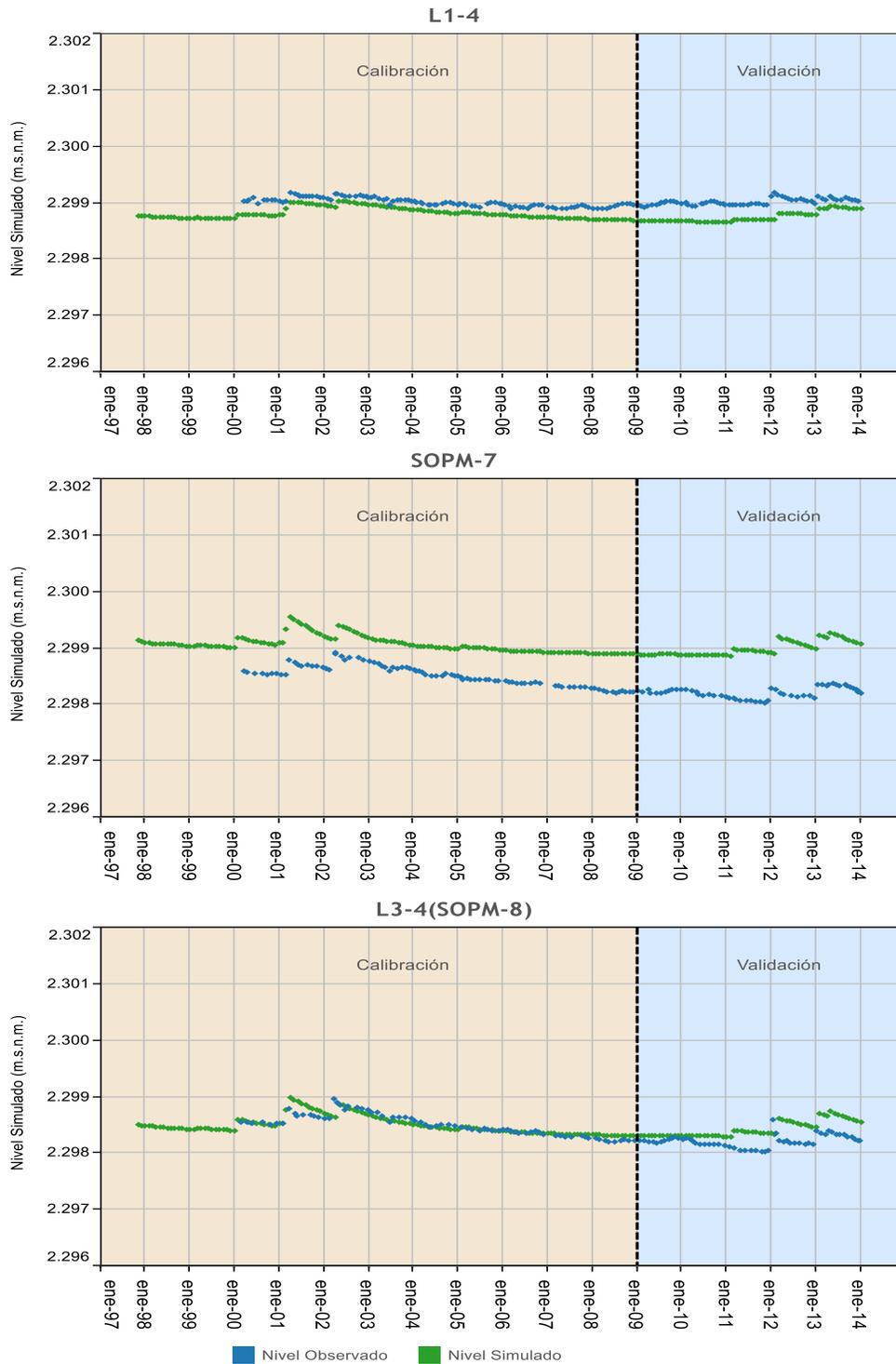
Fuente: Elaboración propia

**Figura 10-38 Validación transiente sector agua salobre (Cont.)**



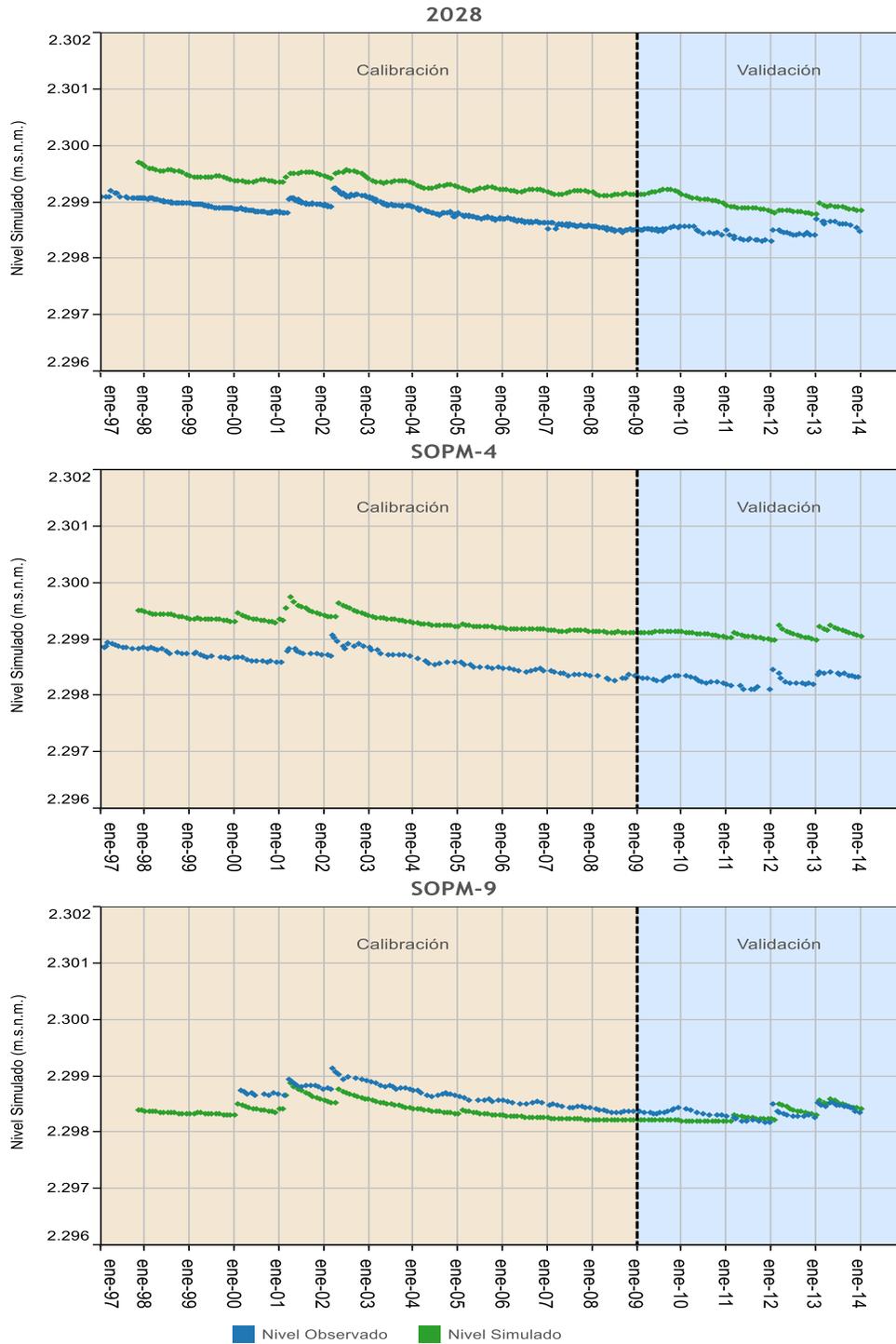
Fuente: Elaboración propia

**Figura 10-39 Validación transiente sector salmuera**



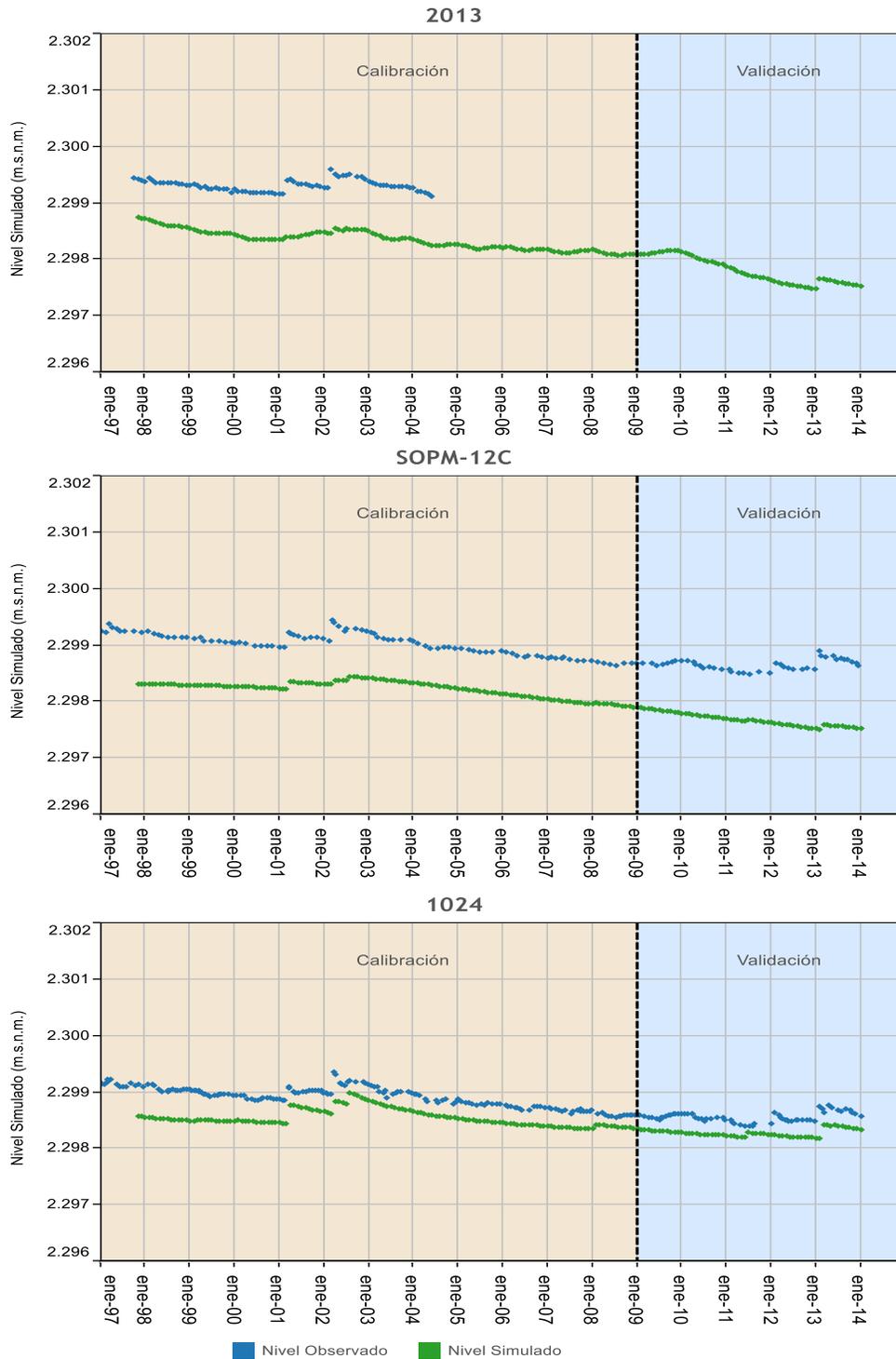
Fuente: Elaboración propia

**Figura 10-39 Validación transiente sector salmuera (Cont.)**



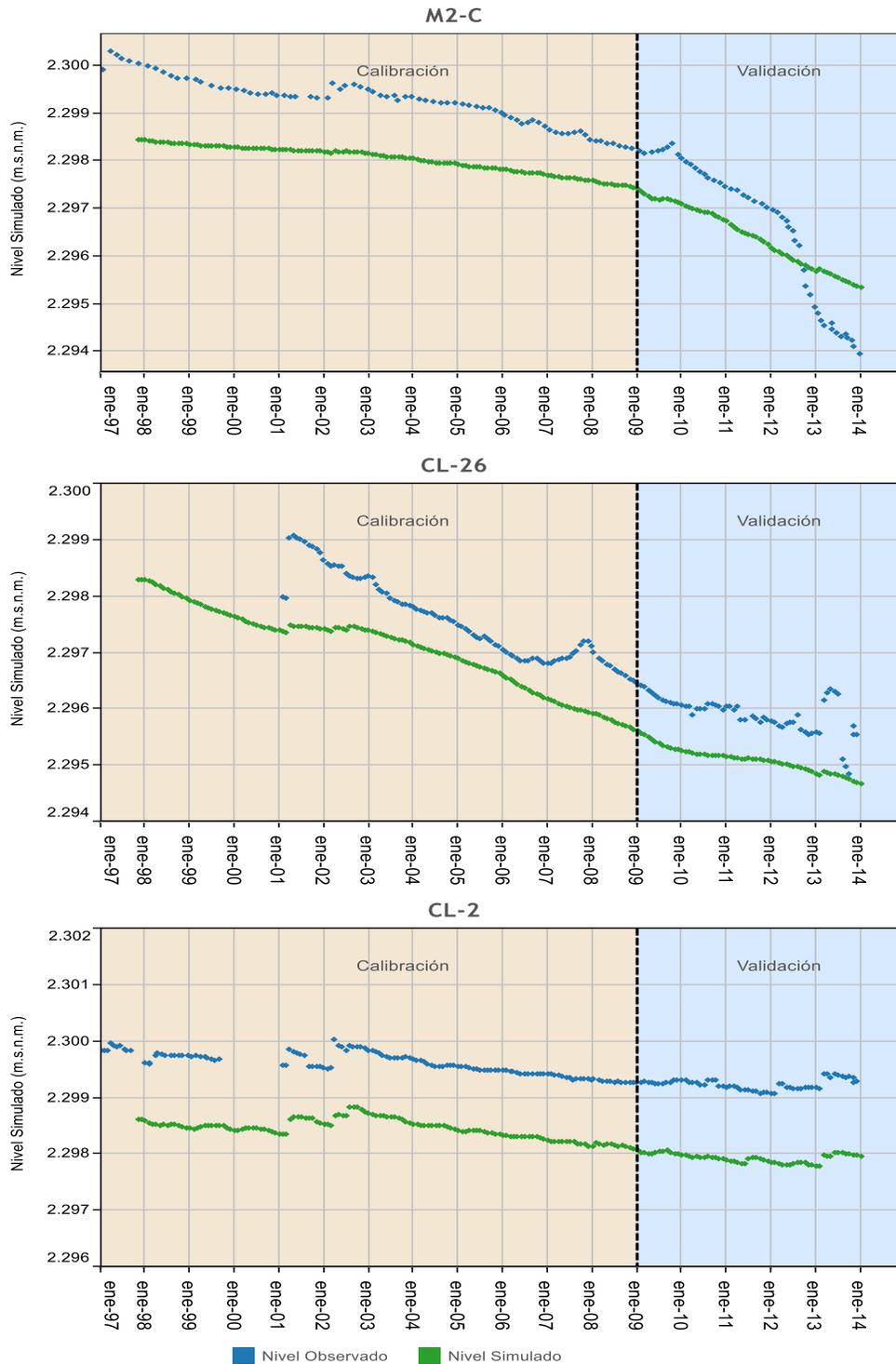
Fuente: Elaboración propia

**Figura 10-39 Validación transiente sector salmuera (Cont.)**



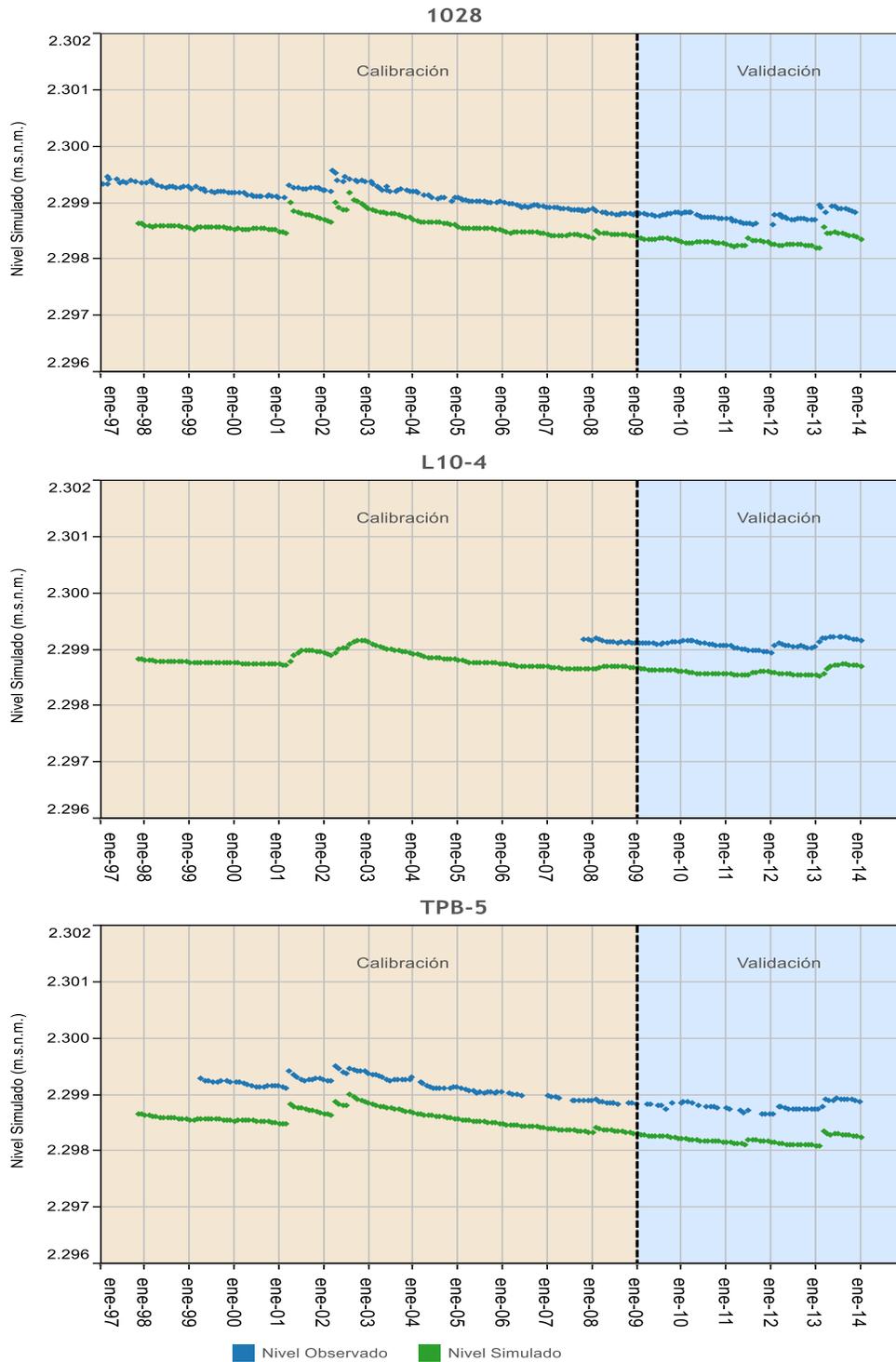
Fuente: Elaboración propia

**Figura 10-39 Validación transiente sector salmuera (Cont.)**



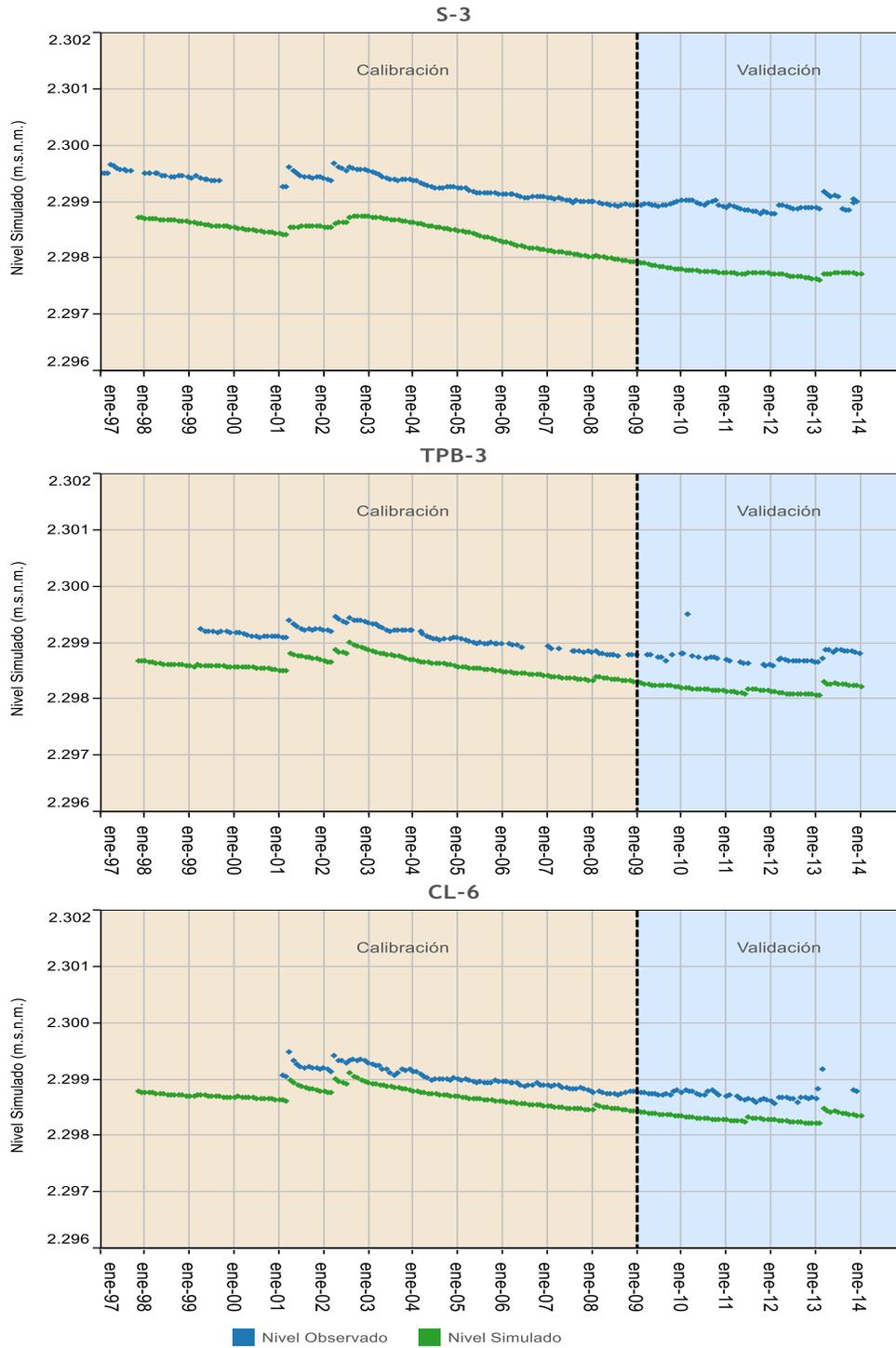
Fuente: Elaboración propia

**Figura 10-39 Validación transiente sector salmuera (Cont.)**



Fuente: Elaboración propia

**Figura 10-39 Validación transiente sector salmuera (Cont.)**



Fuente: Elaboración propia

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

### 10.2.5 Consistencia del balance hídrico en el modelo

La calibración del modelo en régimen permanente logró que éste represente adecuadamente el balance hídrico, como se verifica en la Tabla 10-8, donde se observa que la recarga impuesta al modelo es representada correctamente y que la descarga que genera el modelo presenta diferencias aceptables respecto de las determinadas en el balance hídrico, siendo inferior a 1% a nivel global de núcleo y acuífero salobre.

El modelo en régimen transiente, como se mostró en la Figura 10-32 para los periodos de calibración y validación, reproduce adecuadamente las descargas del sistema, además de introducir correctamente las recargas mensuales determinadas en el balance hídrico. En dicha Figura se representan las descargas generadas por el modelo en régimen transiente, contrastado con la descarga determinada en el balance hídrico para el año 1997, donde se observa que el modelo reproduce bien las variaciones en la descarga de invierno y verano y la disminución de la descarga a partir de aproximadamente el año 2002 en las subcuencas 6, 7 y 10, y en el Núcleo, lo que es consistente atendiendo que en estas zonas el aumento del bombeo ha producido descensos en los niveles piezométricos provocando que también disminuya la tasa de evaporación.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

### 10.2.6 Análisis de Sensibilidad del MODFLOW

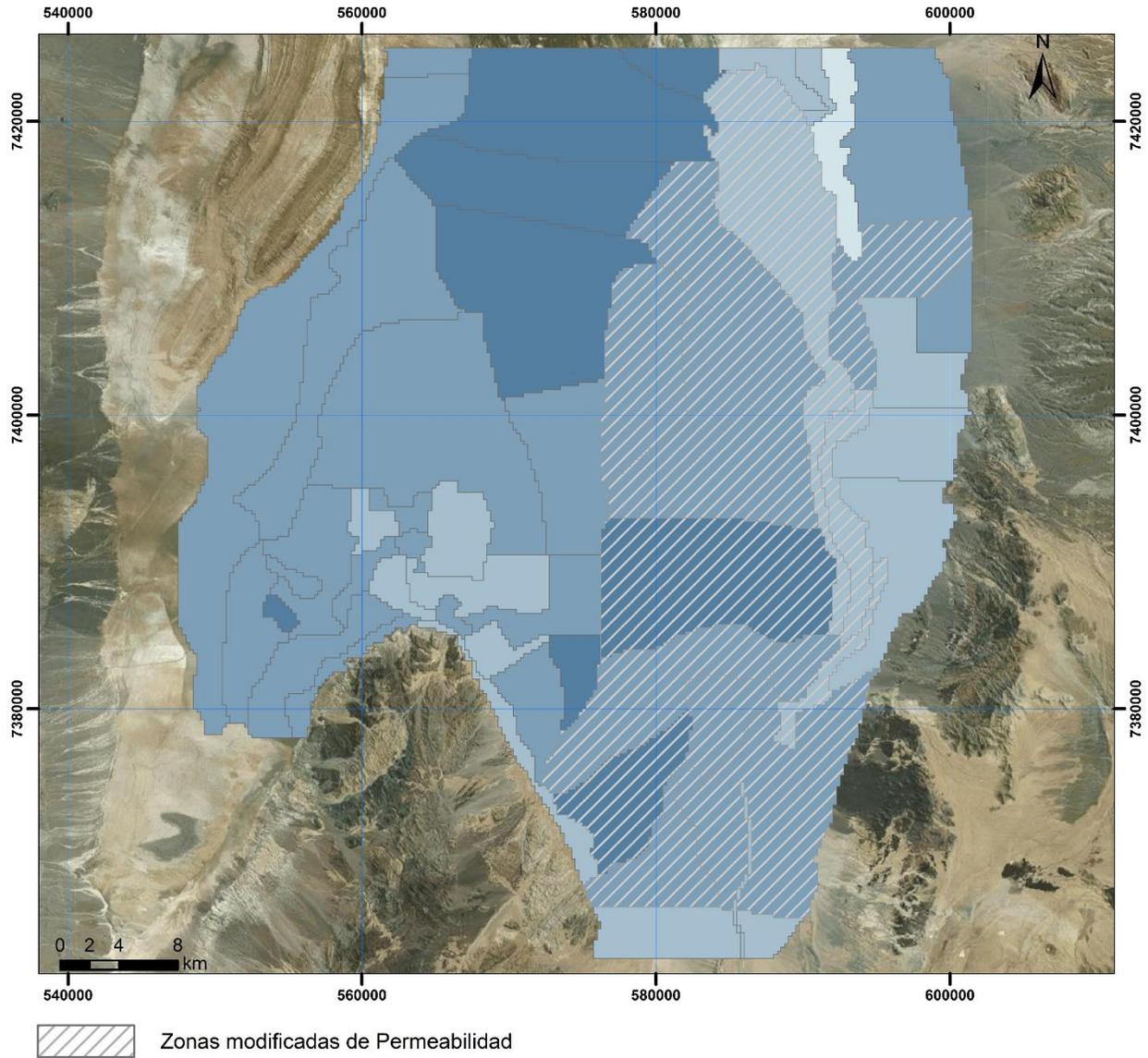
La calibración del modelo tanto en régimen permanente como en el régimen transiente, se realizó ajustando parámetros físicos estimados considerando la información disponible, como la conductividad hidráulica y el coeficiente de almacenamiento. Es interesante entonces analizar la sensibilidad del modelo calibrado a estos dos parámetros, en los cuales se reconoce cierta incertidumbre en su valor, especialmente en sectores sin información.

El análisis de sensibilidad se realizó de manera independiente para los dos parámetros, permeabilidad y almacenamiento, y considerando la gran extensión espacial del modelo se aplicó sólo a las zonas más de próximas al área de mayor interés ambiental y que además incluya los perfiles SEAWAT desarrollados. Los cambios se aplicaron a todas las capas involucradas en la unidad hidrogeológica asociada a la permeabilidad o coeficiente de almacenamiento que se modifica. Los rangos de variación de los valores calibrados para realizar el análisis fueron los siguientes:

- Conductividad Hidráulica

Los valores calibrados fueron aumentados y disminuidos por factores de 5 y 0,2. Para cada simulación del análisis de sensibilidad, la modificación fue realizada para cada zona de conductividad hidráulica que se muestra en la Figura 10-40, dejando las zonas restantes sin cambios desde el modelo base. Esto se realizó, en el núcleo, solamente para la capa 1 del modelo, donde se ubican las extracciones y se producen los descensos de niveles que se quieren evaluar, y que son posteriormente introducidos en los modelos SEAWAT. En la capa 2, los cambios de permeabilidad fueron aplicados a la capa 1 y 2 del modelo, que representan el acuífero salobre sobre la interfase salina. En este análisis, el modelo fue corrido en régimen permanente y luego en transiente (periodo de calibración y validación) con los valores de permeabilidad modificados, obteniéndose los resultados estadísticos, para modelo en régimen permanente, que se muestran en la Tabla 10-16.

**Figura 10-40 Zonas de permeabilidad para análisis de sensibilidad**



Fuente: Elaboración propia

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

**Tabla 10-16 Sensibilidad modelo permanente a conductividad hidráulica**

<b>Permeabilidad aumentada (K x 5)</b>	
<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Nº Pozos de Observación	59
Promedio Residual (m)	-1,02
Error Medio Absoluto MAE (m)	1,17
Error Estándar (m)	0,27
RMS (m)	2,29
Normal MAE	<b>4,6%</b>
Normal RMS	<b>9,1%</b>

<b>Permeabilidad reducida (K x 0.2)</b>	
<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Nº Pozos de Observación	59
Promedio Residual (m)	0,52
Error Medio Absoluto MAE (m)	1,44
Error Estándar (m)	0,38
RMS (m)	2,97
Normal MAE	<b>5,7%</b>
Normal RMS	<b>11,8%</b>

Fuente: Elaboración propia

Como se desprende de la tabla anterior, el modelo calibrado en régimen permanente no mantiene un buen ajuste entre niveles observados y simulados ante cambios significativos en el valor de permeabilidad, como se demuestra al variar los valores determinados en la calibración multiplicándolos y dividiéndolos por 5. El MAE normalizado, que en la calibración resultó de 2,3%, subió a 4,6 y 5,7% respectivamente. De esto se concluye que los valores determinados con la calibración permanente corresponden a un set adecuado y que representa el sistema con una mayor precisión.

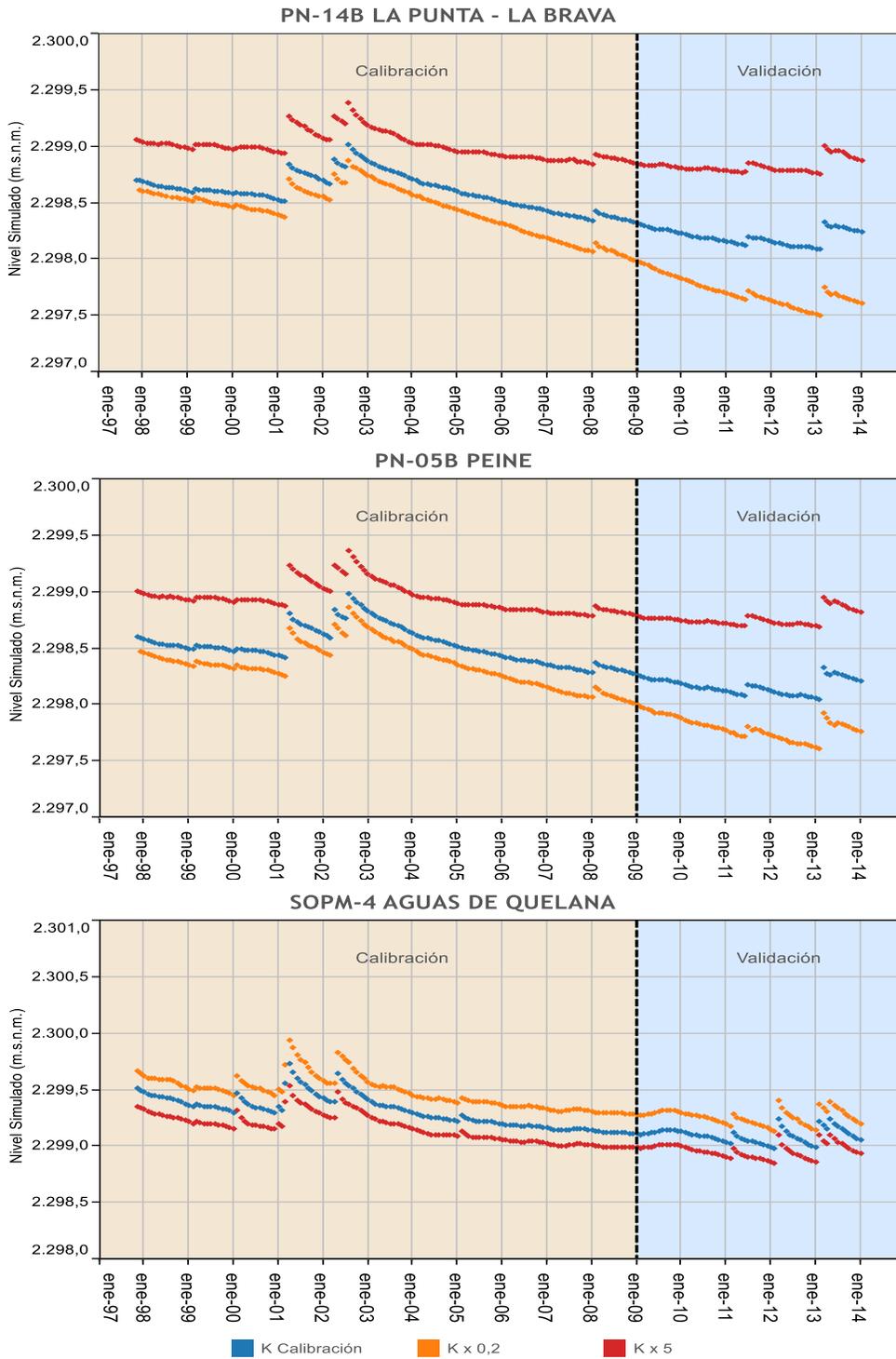
Aplicando los cambios de permeabilidad propuestos para el análisis de sensibilidad al modelo transiente, en su periodo de calibración y validación, se obtienen variaciones en los niveles simulados entre el modelo calibrado y modificados en la permeabilidad. En los gráficos que se presentan en la Figura 10-41, se presentan los niveles simulados en los puntos de mayor interés, que son que se utilizan como condición de borde de descenso para los tres perfiles SEAWAT.

En los gráficos se observa que la permeabilidad sí es sensible en los descensos en los puntos extremos en el Núcleo de los perfiles SEAWAT asociados a los sistemas de La Punta – La Brava y de Peine, donde el gradiente de descenso es menor para un aumento de permeabilidad y mayor para una disminución. Las diferencias, en ambos casos, son del orden de 0,5 m al cabo de un periodo de 17 años. Para el punto asociado al sistema de Quelana, las curvas de descenso para ambos casos, aumento y disminución de la permeabilidad, son paralelas a la de la calibración, es decir, en este sector el modelo no presenta cambios significativos variando la permeabilidad en los rangos señalados. Cabe señalar que, si bien el modelo se presenta sensible a este parámetro, en la zona de mayor interés teniendo presente el objetivo principal del estudio, que son los sectores donde ubican los sistemas lagunares de La Punta – La Brava y de Peine, se

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

tiene buena información de pruebas de bombeo para determinar la permeabilidad, algunas de ellas realizadas especialmente para el presente estudio.

**Figura 10-41 Sensibilidad de niveles simulados a conductividad hidráulica**

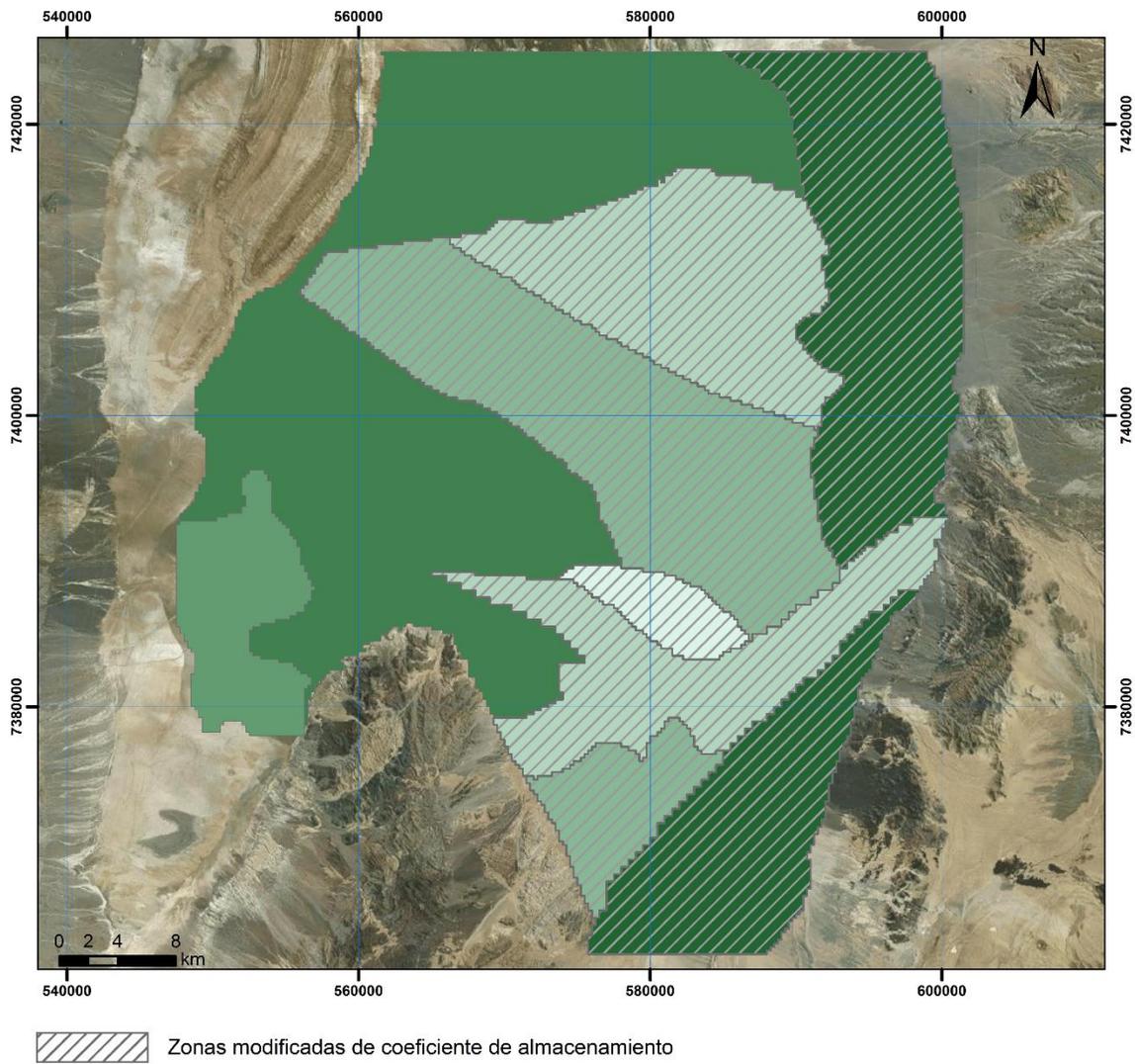


Fuente: Elaboración propia

- Coeficiente de almacenamiento

Los valores obtenidos en la calibración fueron aumentados y disminuidos por factores de 2 y 0,5. Para cada simulación de análisis de sensibilidad, el ajuste fue realizado para cada zona de coeficiente de almacenamiento específico que se muestra en la Figura 10-42, dejando las zonas restantes sin cambios desde el modelo base, siguiendo el criterio señalado para el caso de modificar la conductividad hidráulica.

**Figura 10-42 Zonas de coeficiente de almacenamiento para análisis de sensibilidad**



Fuente: Elaboración propia

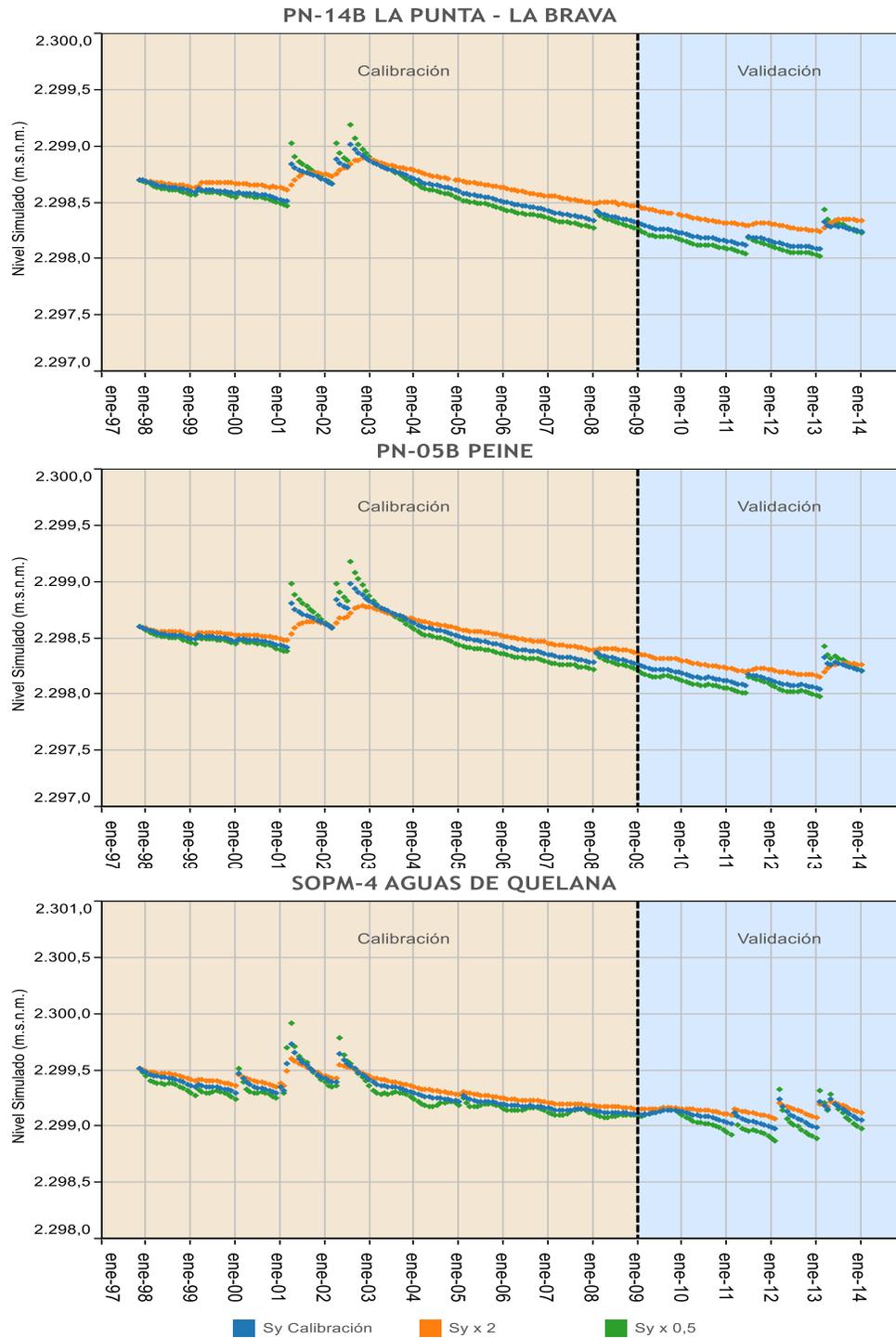
	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

Aplicando los cambios de coeficiente de almacenamiento propuestos al modelo transiente, en su periodo de calibración y validación, se obtienen variaciones en los niveles simulados entre el modelo calibrado y modificados en el coeficiente de almacenamiento ( $S_y$ ). En los gráficos que se presentan en la Figura 10-43, se presentan los niveles simulados en los puntos de mayor interés, que son que se utilizan como condición de borde de descenso para los tres perfiles SEAWAT.

En los gráficos se observa que los descensos en los tres puntos extremos en el Núcleo de los perfiles SEAWAT asociados a los sistemas lagunares, son poco sensibles al coeficiente de almacenamiento, donde el gradiente de descenso es un poco menor para un aumento del coeficiente y un poco mayor para una disminución de esta variable. Las diferencias, en los tres casos, son del orden de 10 cm al cabo de un periodo de 17 años, es decir, el modelo no presenta cambios significativos variando el coeficiente de almacenamiento en los rangos señalados.

Más adelante, en punto 10.3 Modelo SEAWAT, se evalúa el efecto del cambio en los descensos por modificar el coeficiente de almacenamiento en cada perfil SEAWAT, verificando si un cambio de este parámetro produce algún efecto en los niveles simulados por este modelo, es decir, en los caudales que alimentan los sistemas lagunares.

**Figura 10-43 Sensibilidad de niveles simulados a coeficiente de almacenamiento**



Fuente: Elaboración propia

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

## 10.3 Modelo SEAWAT

### 10.3.1 Generalidades

Para analizar el comportamiento del sistema en la Zona Marginal se desarrollaron tres modelos numéricos de agua subterránea en dos dimensiones (2D), dos para el área Sur (perfiles La Punta-La Brava y Peine) y uno para el área Este (perfil de Quelana) del Salar de Atacama (Figura 10-45).

Los modelos fueron desarrollados mediante el uso de un software de modelación de flujo de densidad variable conocido como SEAWAT (Langevin et al., 2008). La utilización del Modelo SEAWAT permite realizar la modelación de flujo de densidad variable, característica principal de las condiciones del medio y flujo subterráneo en el Salar de Atacama, analizado en detalle en el capítulo 9 del modelo conceptual. En este sentido, a diferencia de cómo se aplicó en MODFLOW, para representar la interfase salina no ha sido necesario definir dos capas de distinta permeabilidad hidráulica, sino que las propias capacidades que tiene SEAWAT son las que permiten representar este fenómeno.

Las entradas del modelo, definidas por sus condiciones de borde (parámetros hidráulicos, recargas y descargas), se describen más adelante en el punto 10.3.5. Las salidas del modelo SEAWAT son los niveles piezométricos y las concentraciones de un soluto, que en nuestro caso se utiliza como variable los sólidos disueltos totales (TDS), ya que este parámetro fue medido en terreno y está directamente relacionado a la densidad del fluido.

Los tres modelos SEAWAT desarrollados se encuentran dentro del área del modelo de flujo de agua subterránea tridimensional (3D) regional desarrollado MODFLOW y descrito en punto anterior. La base de la metodología y objetivos para el desarrollo conjunto y aplicación de los modelos MODFLOW y SEAWAT ha sido descrita al inicio del presente capítulo, en el punto 10.1.

El objetivo principal de los modelos SEAWAT desarrollados es evaluar los efectos del aumento del bombeo en los ambientes sensibles, particularmente las lagunas ubicadas en el Sur y Este del Salar de Atacama, representando de manera adecuada la condición de densidad variable del medio (salmuera – acuífero). El aumento de bombeo se traduce en un descenso en los niveles de salmuera, cuya proyección en el tiempo (serie niveles-tiempo) es el resultado de la simulación con MODFLOW, esta serie es una de las condiciones de entrada del modelo SEAWAT.

Los tres perfiles en los cuales se implementó modelación con SEAWAT se ubican aproximadamente perpendiculares a la línea superficial que separa la salmuera del agua dulce (interfase) en las áreas Sur y Este del Salar (ver Figura 10-45) y en sentido de las líneas de flujo. Los modelos SEAWAT se construyeron inicialmente utilizando los valores de parámetros determinados en el proceso de calibración y validación del modelo MODFLOW, incluyendo: conductividad hidráulica (K), coeficiente de almacenamiento (S), porosidad ( $S_y$ ) y recarga directa.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

La capacidad de SEAWAT para simular el flujo de densidad variable resulta esencial para identificar y evaluar la presencia de gradientes de concentración (densidad) observados en la zona de la interfase entre la salmuera y el agua salobre.

### 10.3.2 Selección y descripción de la Modelación SEAWAT

En las áreas en que la densidad del agua subterránea es constante, el flujo se basa sólo en las diferencias (o gradientes) de la presión de fluidos (o carga hidráulica). Sin embargo, cuando la densidad del agua subterránea de un área es variable, el flujo subterráneo se puede inducir aún más por medio del gradiente de densidad. En el caso del Salar de Atacama, el rango de densidad va desde un alto valor de 1,2 g/cm<sup>3</sup> en el Núcleo a 1 g/cm<sup>3</sup> fuera del Salar.

Existe una amplia oferta de códigos privados y públicos que pueden ser usados para simular flujos subterráneos de densidad variable. Por ejemplo, el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) ofrece el código de elementos finitos SUTRA (Voss, 1984) y los códigos de diferencias finitas HST3D (Kipp, 1997) y MOCDENSE (Sanford and Konikov, 1985). Estos códigos contienen opciones muy potentes para simular un amplio rango de problemas complejos.

Otro de los códigos disponibles en el mercado es el SEAWAT, que fue desarrollado por USGS (United States Geological) (Langevin et al., 2008; U.S.G.S., 2003; Guo y Langevin, 2002) utilizando la estructura del MODFLOW y es ampliamente aplicado. SEAWAT está diseñado para simular el flujo de agua subterránea de densidad variable y está basado en una versión del MODFLOW (Harbaugh et al., 2000) que está ensamblada con el código MT3DMS (Zheng and Wang, 1999; Zheng, 2006). Con este software, MODFLOW resuelve el componente del flujo de agua subterránea, y MT3DMS resuelve el transporte de solutos.

SEAWAT tiene una estructura modular, y por lo tanto, permite añadir nuevos parámetros a partir de pequeñas modificaciones en el programa principal. SEAWAT lee y escribe sobre los conjuntos de datos estándar de MODFLOW y MT3DMS, aunque alguna entrada adicional puede ser requerida para algunas simulaciones SEAWAT. Esto significa que muchos de los pre y post-procesadores existentes se pueden utilizar para crear conjuntos de datos de entrada y para analizar los resultados de simulación.

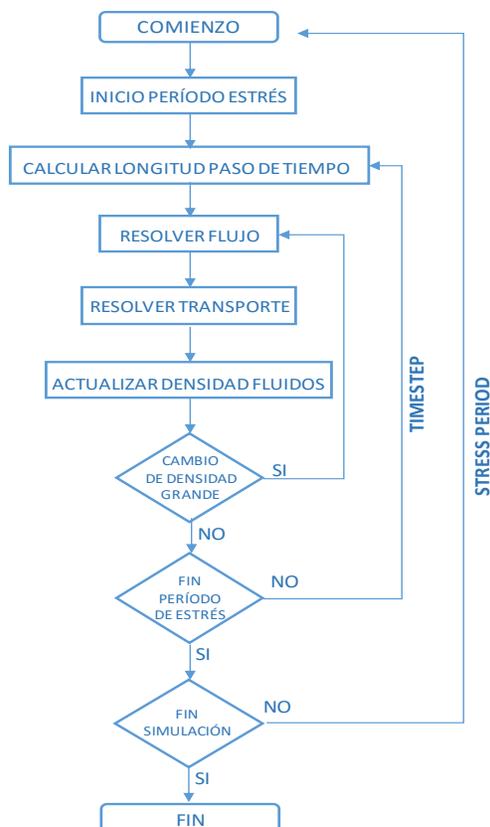
El código SEAWAT se puso a prueba mediante la simulación de cinco problemas que implican flujos subterráneos de densidad variable. Estos cinco test incluyen dos problemas de laboratorio, el problema Henry, el problema de Elder, y el problema HYDROCOIN (Guo y Langevin, 2002). Además ha sido utilizado ampliamente en diversos estudios de acuíferos costeros donde se presentaba el problema de la interfase salina, así como en el Salar de Atacama tanto en los estudios anteriores llevados a cabo por el titular en el marco de este EIA (Adenda 4), como por otras compañías que operan en el Salar (Estudio de Impacto Ambiental Proyecto cambios y mejoras de la operación minera en el Salar de Atacama. Adenda 1. SQM, Sociedad Química y Minera de Chile).

En cuanto a la metodología de modelación, SEAWAT difiere de los modelos de flujo de agua subterránea típicos, ya que requiere soluciones simultáneas de dos ecuaciones gobernantes: (1) flujo de agua subterránea y, (2) transporte de solutos. En SEAWAT, se consideran los efectos de estos dos procesos en el flujo de agua subterránea. El modelo utiliza el gradiente hidráulico (que depende de las cargas hidráulicas) y el gradiente de densidad (que depende de la concentración de solutos) para simular el movimiento del agua subterránea.

SEAWAT utiliza una ecuación de “altura de agua dulce equivalente”, donde el efecto en la densidad del agua se añade al valor del altura hidráulica convencional, en cada celda del modelo. De este modo, los efectos de la densidad, presión y elevación son utilizados para determinar la dirección del flujo. La formulación del modelo es descrito de manera detallada por Langevin et al., (2008), U.S.G.S. (2003), y Guo and Langevin (2002).

El proceso de la aplicación del modelo SEAWAT se muestra en el diagrama de flujo de la Figura 10-44 (de Guo y Langevin, 2002).

**Figura 10-44 Proceso modelo SEAWAT**



Fuente: Manual usuario SEAWAT, Guo y Langevin, 2002

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

### 10.3.3 Consideraciones conceptuales en los perfiles

En los perfiles SEAWAT se han considerado los aspectos que explican el funcionamiento del sistema hidrogeológico, que se desarrollan en el punto 9.1 Modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico.

El modelo conceptual considera que el agua dulce/salobre, procedente de las partes altas de la cuenca, ingresa subterráneamente al Salar de Atacama a través del borde exterior de la Zona Marginal. Este flujo, de baja densidad relativa, se encuentra con la salmuera existente en el núcleo del Salar, que tiene una densidad de  $1,2 \text{ g/cm}^3$  aproximadamente, por lo que se ve forzado a ascender aproximándose a la superficie del terreno, donde bien es evaporada directamente, o bien aflora en pequeños canales o charcas, llegando a formar sistemas lagunares en algunas zonas.

Estos sistemas lagunares desarrollan ecosistemas sensibles que son objeto de protección en el marco de este EIA, por lo que el modelo SEAWAT, capaz de simular y predecir condiciones de flujo de densidad variable, se ha desarrollado en los tres sistemas situados más próximos al campo de extracción de salmuera de Rockwood, que son La Punta – La Brava, Peine y Aguas de Quelana. El perfil de Quelana fue escogido para evaluar los efectos en la zona situada al Norte del área de extracción del proyecto, tal como fue solicitado por la autoridad.

En la Zona Marginal, los perfiles SEAWAT se han ubicado en posición paralela al flujo subterráneo y sobre los sistemas lagunares, mientras que en la parte de la salmuera se han posicionado en dirección a la planta de extracción de Rockwood. Se busca así simular, lo más precisamente posible, la influencia del aumento de bombeo en las proximidades de las lagunas. El grado de afección se ha definido de acuerdo a los descensos adicionales simulados en los puntos críticos de observación, que son aquellos donde se produce el afloramiento o surgencia de las aguas subterráneas del acuífero que alimentan las lagunas.

También se analiza, y sirve como validación del análisis, la posición de la interfase salina simulada por el modelo SEAWAT, comparándose con las medidas de la misma que se toman en terreno mediante perfiles de conductividad eléctrica en pozos, así como en las pruebas de geofísica realizadas.

El acople entre el modelo SEAWAT con MODFLOW se logra de la siguiente manera:

- Los perfiles adoptan la misma configuración geométrica definida en MODFLOW en la sección correspondiente de cada perfil.
- La recarga mensual impuesta, directa desde la superficie y lateral desde aguas arriba, son iguales a las impuestas en MODFLOW, determinadas en el balance hídrico.
- Los parámetros hidráulicos impuestos inicialmente a los modelos (previa calibración), son los obtenidos en la calibración del modelo MODFLOW.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

- En el límite oeste de cada perfil, en el Núcleo, se coloca como condición de borde los niveles simulados por MODFLOW en régimen transiente, tanto para el periodo de calibración como de los escenarios simulados.

### 10.3.4 Construcción de los perfiles SEAWAT

#### 10.3.4.1 Dominio del modelo SEAWAT

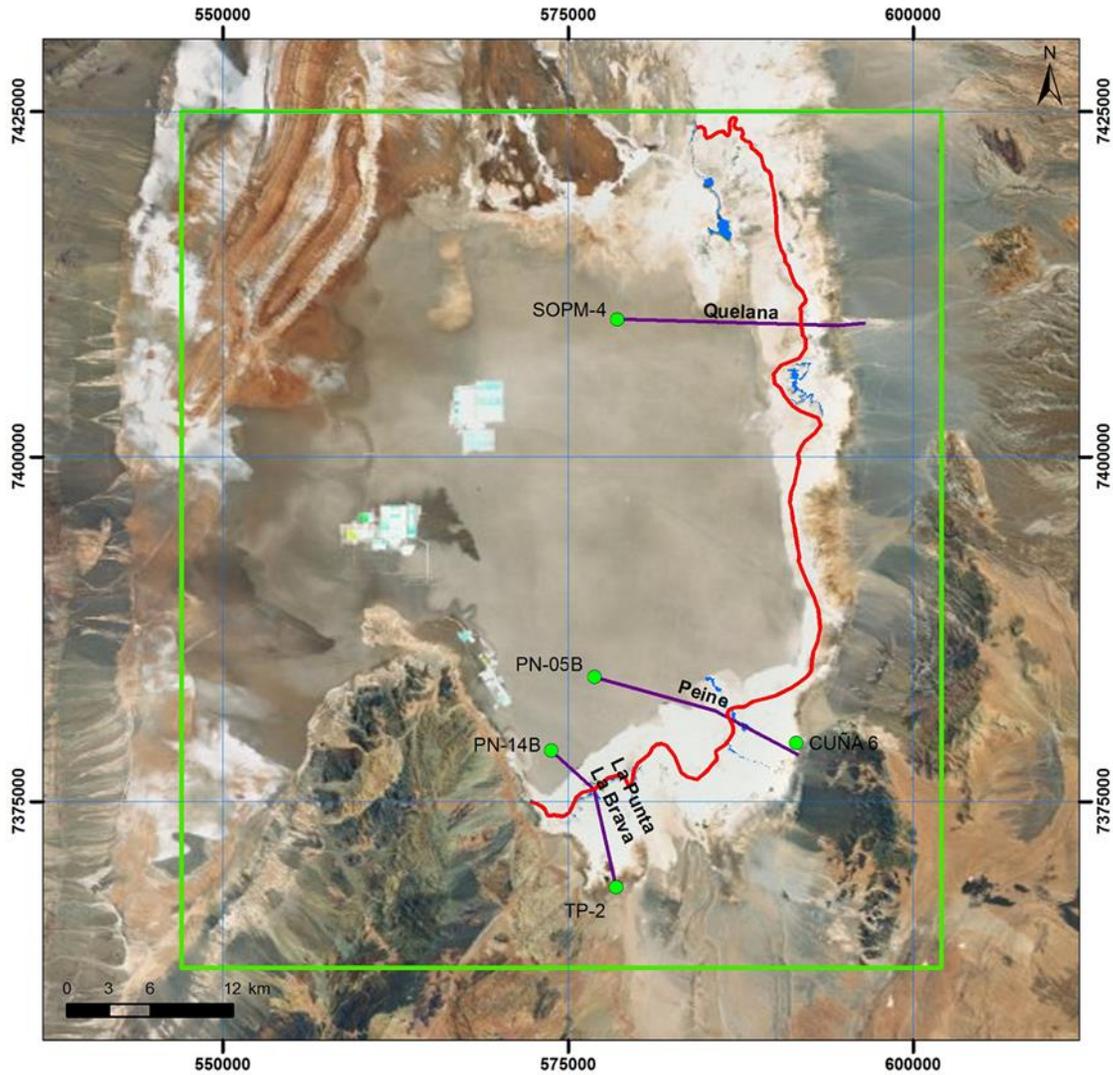
Se construyeron tres modelos (perfiles en dos dimensiones) SEAWAT, correspondientes a secciones transversales dentro del área del dominio del modelo MODFLOW 3D desarrollado en el Salar, en los lugares indicados en la Figura 10-45. Los tres perfiles (La Punta / La Brava, Peine y Quelana) fueron situados teniendo presente las siguientes especificaciones:

- Los tres perfiles se encuentran a lo largo, o cerca, de líneas geofísicas, para aprovechar las representaciones geofísicas de la interfase existente entre la salmuera y el agua salobre.
- Cada perfil incluye el Núcleo y el acuífero de agua dulce-salobre, incluyendo las zonas donde se disponen las lagunas.
- Cada perfil está orientado aproximadamente en paralelo a la dirección del flujo del agua subterránea.

A continuación se indica la extensión de estos tres Perfiles SEAWAT:

- El perfil La Punta / La Brava tiene 11,5 km de longitud y varía en elevación de 2.300 msnm hasta 2.310,70 msnm.
- El perfil de Peine tiene 15,4 km de longitud y varía en elevación desde 2.300 msnm hasta 2.304,89 msnm;
- El perfil Quelana tiene 18 km de longitud y varía en elevación desde 2.300 msnm hasta 2.343,94 msnm.

**Figura 10-45 Ubicación de los perfiles SEAWAT**



**Leyenda**

- Perfil Seawat
- Dominio Modelo MODFLOW
- Interfase
- Lagunas

Fuente: Elaboración propia

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

En la Figura 10-46 se muestran las cuadrícula SEAWAT para los Perfiles La Punta / La Brava, Peine, y Quelana. Los tres perfiles SEAWAT están configurados como secciones transversales, con un tamaño de celda de cuadrícula constante de 50 m en la dirección transversal. Los tamaños de las celdas verticales fueron refinados (en la dirección vertical y longitudinal) para todos los perfiles con el fin de lograr una solución más precisa en la representación del gradiente de concentración inclinado en la cercanía de la interfase entre la salmuera, agua salobre y agua dulce. Esto dio como resultado tamaños de celdas verticales que varían desde 4 a 7 m. Esta discretización vertical es consistente con las directrices sugeridas por los desarrolladores de SEAWAT (Guo and Langevin, 2002), de contar con 10 capas por acuífero.

Los tres perfiles SEAWAT tienen un espesor cercano a los 400 m, todos ellos con su parte inferior delimitada por la cota 1.900 msnm, (igual que en MODFLOW) y con el límite superior en el Núcleo en la cota 2.300 msnm. La topografía en el límite superior ha sido incorporada a partir del Modelo Digital de Elevaciones desarrollado en la Zona Marginal del Salar, y que se detalla en el capítulo 4 de este Anexo.

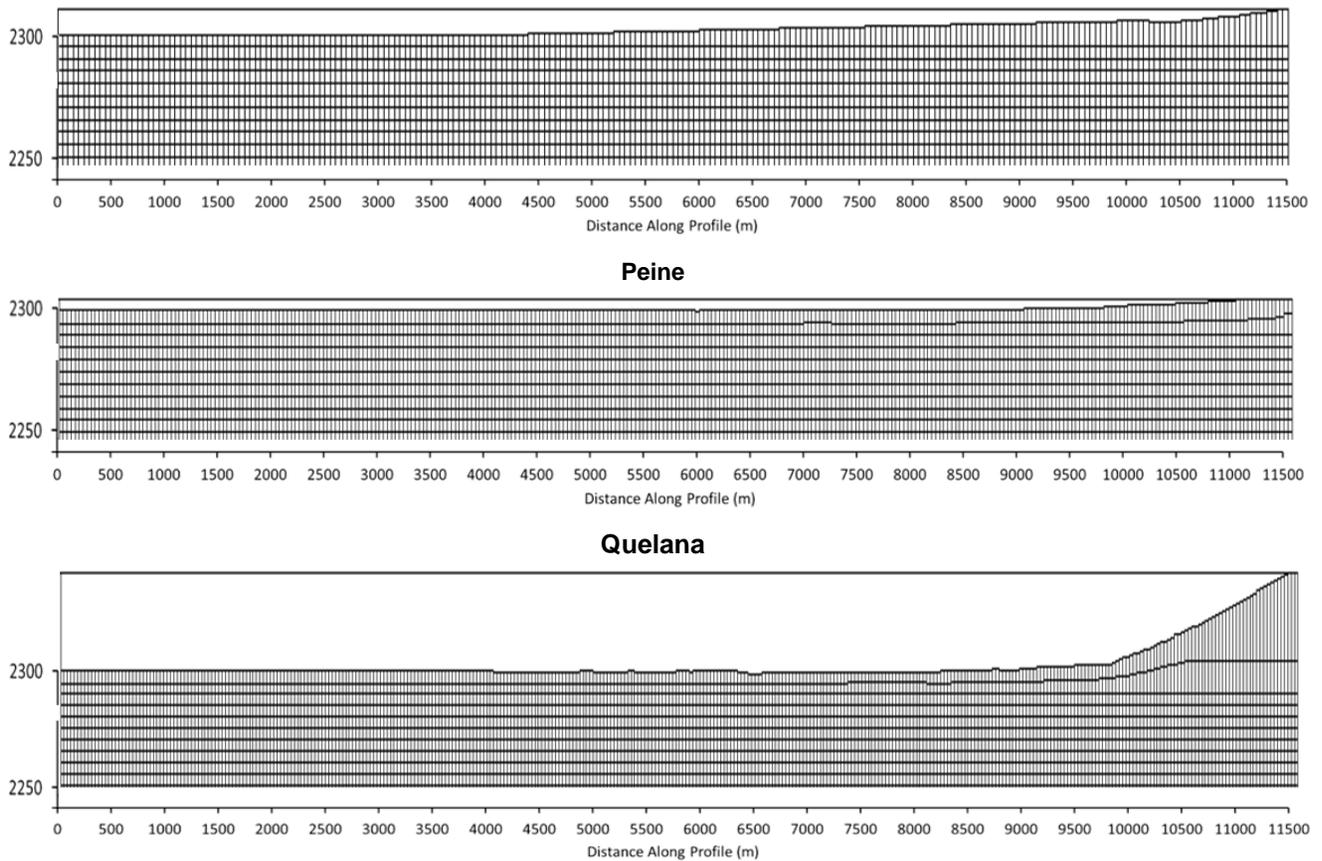
De acuerdo a la descripción de unidades hidrogeológicas descritas en el capítulo 8, en el Núcleo se ha diferenciado una zona superior que presenta mayor conductividad hidráulica, el espesor de esta zona es de 50 m aproximadamente, por lo que en SEAWAT se ha considerado como un acuífero con unas propiedades hidrogeológicas diferentes a los restantes 350 m situados en la parte inferior. De manera análoga, en la Zona Marginal, se ha realizado la misma diferenciación.

En total los perfiles de La Punta – La Brava y Peine tienen de 80 capas, mientras que el de Quelana tiene 64 capas.

En la Figura 10-46 se presenta la definición de la malla del modelo para los 50 m más superficiales, situados entre las cotas 2.250 y 2.300 msnm.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

**Figura 10-46 Malla de los perfiles SEAWAT**  
**La Punta – La Brava**



Fuente: Elaboración propia

#### 10.3.4.2 Configuración periodos y discretización temporal de SEAWAT

Los resultados finales (outputs) para cada uno de estos tres modelos SEAWAT es en realidad el producto de tres pasos de la modelación, los cuales se ejecutan secuencialmente, los resultados del paso uno son utilizados como datos de entrada (inputs) para el siguiente. Los tres pasos de modelación secuencial están resumidos en la Tabla 10-17.

- **Periodo de Pre-calibración (“Run-up period”)** – El propósito de este paso es proporcionar distribuciones iniciales, razonablemente parejas, para los niveles de fluidos y Sólidos Disueltos Totales (TDS, expresados en mg/L). Posteriormente estas distribuciones se utilizan como entrada para el Periodo de Calibración. La duración del periodo de Pre-calibración fue de 219 años, siendo suficiente para lograr la estabilidad inicial del modelo. Se termina en 1997, que es el comienzo del periodo de Calibración. La distribución de TDS inicial para el periodo de Pre-calibración, se basa en una aproximación de las mediciones realizadas durante el monitoreo llevado a cabo por Rockwood, de acuerdo a lo detallado en

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

el punto 10.3.6 de este documento. Para el periodo de Pre-calibración, se utilizan valores promedio para la mayoría de las condiciones de borde definidas más adelante, incluyendo la recarga vertical, evapotranspiración, y niveles en los extremos de salmuera y de agua dulce de cada perfil. Estos valores promedio le permiten al periodo de Pre-calibración ejecutarse en un plazo de tiempo razonable, de manera que se puedan realizar las numerosas corridas requeridas para la calibración del modelo.

- **Periodo de Calibración** – El objetivo de esta segunda etapa es lograr la calibración del modelo, y se basa en el periodo para el cual se disponen datos medidos, el cual, en este caso, es idéntico al periodo de calibración transiente utilizado en modelo MODFLOW. En consecuencia, este periodo se extiende desde 1997 hasta 2013. Los valores de TDS y las distribuciones del nivel del agua obtenidas al final del Periodo de Pre-calibración se utilizan como condiciones iniciales para el periodo de Calibración. De esta manera, el periodo de Calibración recibe las condiciones iniciales que son razonablemente neutrales, parejas y estables, en lugar de las aproximaciones simples que se especificaron al inicio del Periodo de Pre-calibración. Los valores de la recarga vertical (por precipitación) para el periodo de Calibración son los determinados en el cálculo del balance hídrico (capítulo 9) y son también utilizados en la calibración transiente del modelo MODFLOW. Los valores de evapotranspiración (EVT) se especifican para la temporada de verano e invierno, variando la evaporación máxima de superficie (ETmax) tal como se describe en el punto 4.5.4 del Apéndice J. El proceso de calibración de los modelos conlleva la realización de reiteradas ejecuciones del periodo de Pre-calibración y del periodo de Calibración, ajustando la conductividad hidráulica, calibrada inicialmente en MODFLOW, a las condiciones locales de cada perfil. Los otros parámetros permanecen similares o idénticos a los valores transferidos desde MODFLOW.
- **Período de Predicción** – El objetivo de este tercer periodo es generar predicciones de los descensos del nivel de agua y cambios en la distribución de TDS para los escenarios con y sin proyecto descritos en el Capítulo 11 Escenarios de simulación. Para este periodo se utilizan como distribuciones iniciales de TDS y del nivel de agua las determinadas al final del periodo de Calibración. Los valores para la recarga vertical y EVT para el periodo de Predicción, están basados en una extrapolación de las condiciones determinadas durante el periodo de Calibración, y están descritas más adelante.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

**Tabla 10-17 Resumen del método usado en periodos de modelación**

<b>Periodo de Modelación y Objetivo</b>	<b>Características de Modelación</b>
<b>Periodo de Pre-calibración</b> Proveer una distribución 2D completa y relativamente estable de los TDS y niveles previos al bombeo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Duración – 219 años, hasta el 1997</li> <li>• Recarga vertical – Se utiliza un solo valor de largo plazo, basado en los valores determinados por el balance hídrico promedio en cada sección, utilizados también en la calibración permanente de MODFLOW.</li> <li>• EVT – Se utiliza un único valor de largo plazo para cada zona de EVT, basado en los valores determinados por el balance hídrico promedio en cada sección, utilizados también en la calibración permanente de MODFLOW.</li> <li>• Condición de borde del nivel del agua dulce/salobre – Se utiliza un solo valor basado en el nivel extrapolado a partir de las series de medida existentes, al inicio del Período de Calibración (1997)</li> <li>• Condición de borde del nivel en el Núcleo – Se utiliza un solo valor basado en el nivel estimado para el inicio del Período de Calibración (1997)</li> <li>• Distribución de TDS – Se utiliza una distribución inicial aproximada basada en medidas conocidas de salmuera y agua dulce, y el modelo realiza una distribución de estos valores de TDS de acuerdo con las condiciones de flujo</li> </ul>
<b>Periodo de Calibración</b> Permite la calibración del modelo basándose en el periodo histórico en que se tiene disponibilidad de información local	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Duración – 1997 a 2013</li> <li>• Recarga vertical – Se utilizan valores mensuales, basados en el balance hídrico mensualizado (utilizado en calibración transiente de MODFLOW)</li> <li>• EVT – Se utilizan parámetros de verano y de invierno, similar a lo aplicado en calibración transiente de MODFLOW</li> <li>• Condición de borde del nivel del agua dulce/salobre – Se utilizan diferentes niveles basados en medidas locales.</li> <li>• Condición de borde del nivel en el Núcleo – Se utilizan diferentes niveles basados en medidas locales.</li> <li>• Distribución de TDS – Se obtiene una distribución inicial que proviene del final del Período de Pre-Calibración; el modelo permite entonces redistribuir los TDS de acuerdo con las condiciones de flujo del periodo</li> </ul>
<b>Periodo de Predicción</b> Genera predicciones de futuros descensos de nivel y distribuciones de TDS Para los escenarios de Sin y Con Proyecto	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Duración – 2013 a 2065</li> <li>• Recarga vertical – Se utilizan valores mensuales basados en la extrapolación de los datos utilizados en el Período de Calibración (similar a MODFLOW)</li> <li>• EVT – Se utilizan parámetros de verano y de invierno, similar a lo aplicado en calibración transiente de MODFLOW</li> <li>• Condición de borde del nivel del agua dulce/salobre – Los niveles utilizados se basan en la continuación de la tendencia obtenida durante el Período de Calibración, y posteriormente se asume una tendencia plana conservativa como proyección del final de los bombeos de agua dulce/salobre.</li> <li>• Condición de borde del nivel en el Núcleo – La tendencia que se utiliza es la que se obtiene como salida del modelo MODFLOW.</li> <li>• Distribución de TDS – La distribución inicial se obtiene del final del Período de Calibración; el modelo permite entonces la redistribución de los valores de TDS de acuerdo con las nuevas condiciones de flujo del periodo predictivo.</li> </ul>

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

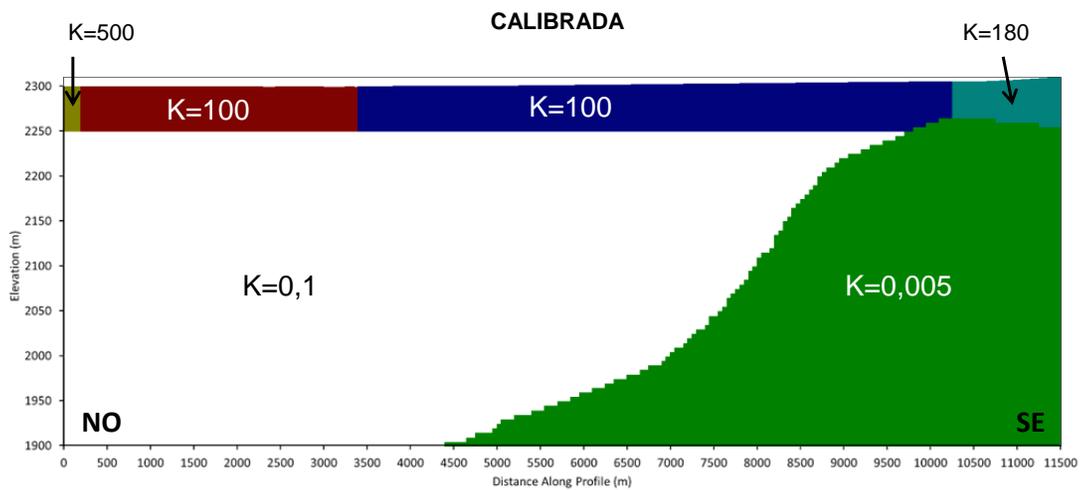
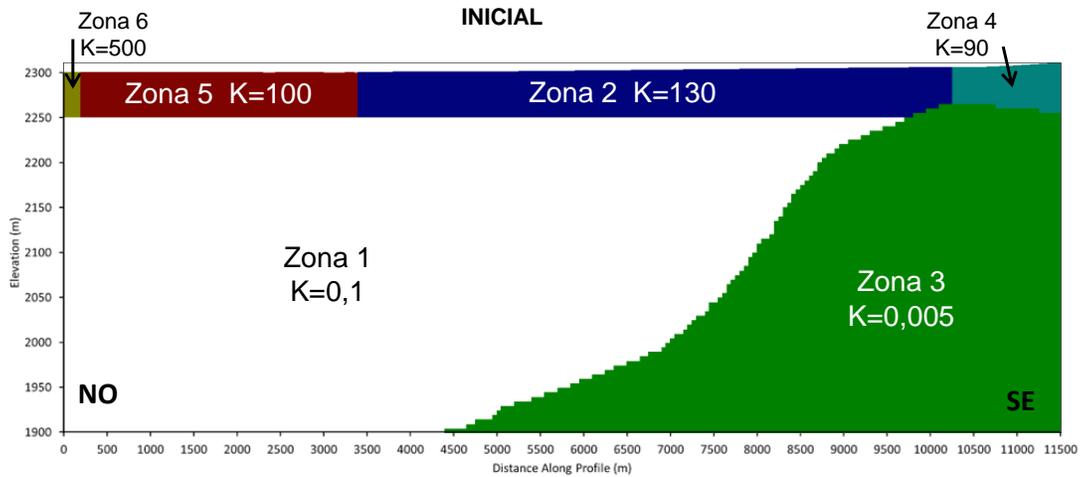
SEAWAT utiliza la metodología de MODFLOW y MT3DMS para la discretización de pasos de tiempo. Cada simulación está dividida en periodos de estrés, y cada periodo de estrés se divide en pasos de tiempo para la solución del flujo de agua subterránea. Debido a que la solución del transporte de solutos por lo general requiere etapas de tiempo más pequeñas que la solución de flujo, SEAWAT tiene la opción de subdividir aún más las etapas de tiempo de flujo en etapas de tiempo de transporte más pequeñas, las que son calculadas por el modelo, de acuerdo a criterios de estabilidad (USGS, 2003)

#### 10.3.4.3 Parámetros hidráulicos

La distribución inicial y final (calibrada) de conductividad hidráulica en los tres perfiles SEAWAT se indica en la Figura 10-47, Figura 10-48 y Figura 10-49. Las distribuciones de propiedades hidráulicas fueron inicialmente establecidas para ser idénticas al modelo MODFLOW y, al igual que en éste, se adoptó una permeabilidad vertical igual al 10% de la horizontal. La parte superior e inferior de cada distribución MODFLOW fue utilizada directamente en los perfiles SEAWAT desde las ubicaciones correspondientes en MODFLOW (ver Figura 10-3 con la configuración geométrica). Esto se realizó con una excepción: la capa de baja permeabilidad que se configuró en MODFLOW para simular el efecto de la interfase entre la salmuera y el acuífero de agua dulce-salobre. En este caso no es necesario representarla en SEAWAT, esto considerando que el modelo simula densidad variable y por lo tanto cuenta con la capacidad de simular la interfase, es decir, sin la necesidad de definir una capa de baja permeabilidad.

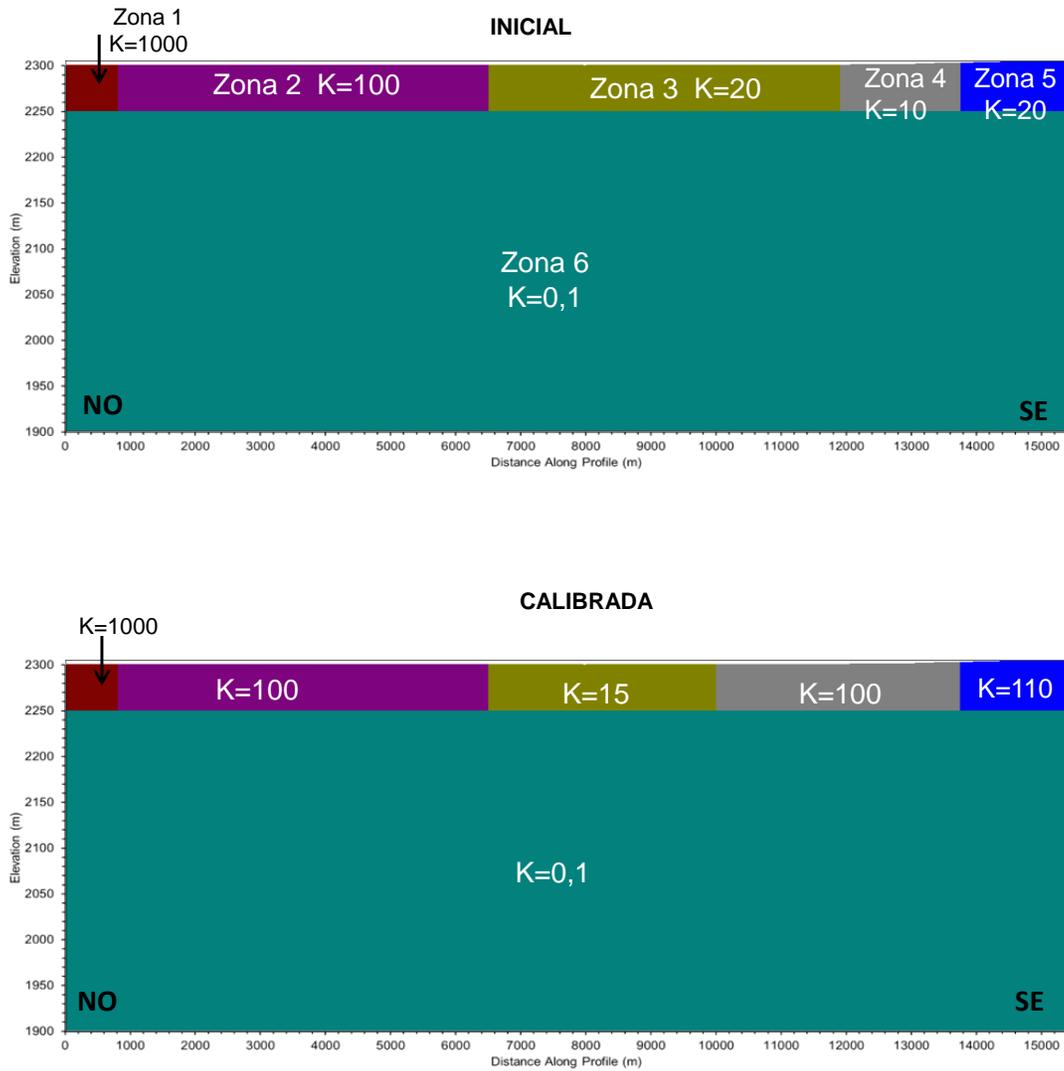
En el proceso de calibración de los modelos SEAWAT, los valores de conductividad hidráulica calibrados permanecieron igual o dentro del rango de los valores calibrados en MODFLOW. Las modificaciones requeridas a este parámetro se justifican considerando que los modelos SEAWAT son capaces de simular el flujo de densidad variable existente en el acuífero y en las proximidades de la interfase, por lo que para reproducir el flujo con mayor precisión pueden requerir de valores de permeabilidad diferentes.

**Figura 10-47 Conductividad hidráulica inicial y calibrada. Perfil La Punta – La Brava.**



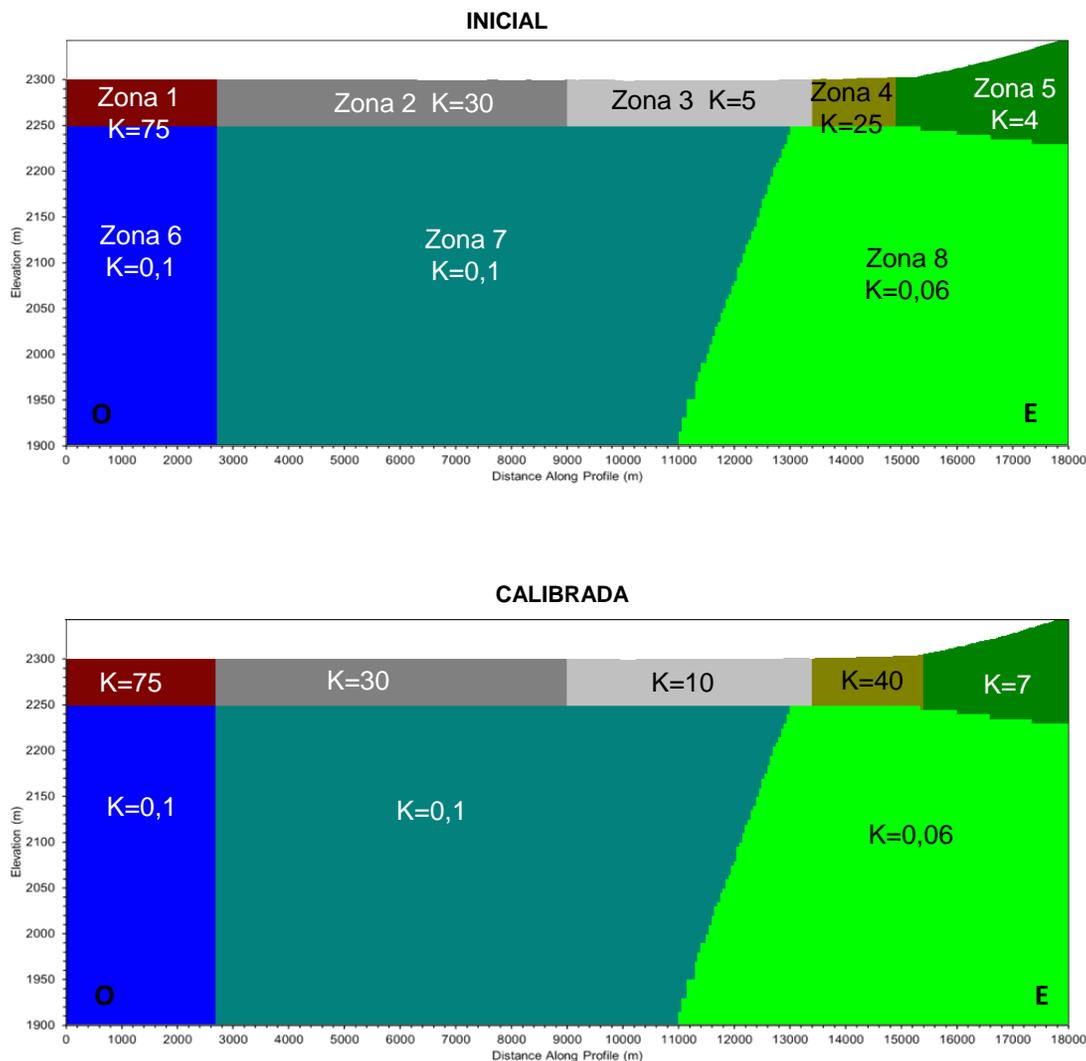
Fuente: Elaboración propia

**Figura 10-48 Conductividad hidráulica inicial y calibrada. Perfil Peine.**



Fuente: elaboración propia

**Figura 10-49 Conductividad hidráulica inicial y calibrada. Perfil Quelana.**



Fuente: Elaboración propia

Cabe señalar que, mientras las distribuciones de propiedades hidráulicas iniciales en los modelos SEAWAT se obtuvieron directamente del modelo MODFLOW, se consideró una estratificación más fina en los modelos SEAWAT, con el fin de apoyar la modelación de TDS y de los procesos de flujo de densidad variable. Por ejemplo, la Capa 1 del modelo MODFLOW es una capa simple, con un espesor de 50 m. En SEAWAT, esta unidad está representada con el mismo espesor, pero está dividida en 10 capas con un espesor promedio de cinco metros, tal como se mostró en la Figura 10-46.

La distribución del coeficiente de almacenamiento ( $S_y$ ) fue importada directamente a los perfiles SEAWAT desde el modelo MODFLOW. Estos valores fueron mantenidos en este proceso de calibración a lo establecido en el modelo MODFLOW 3D, no requiriéndose un ajuste de sus valores. El valor del coeficiente

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

de almacenamiento no es un parámetro sensible debido a las características temporales de largo plazo de estos modelos. Además la baja sensibilidad de este parámetro se demuestra más adelante, en el punto 10.3.8.

### 10.3.5 Condiciones de Borde

La elección de las condiciones de borde es de gran importancia en la construcción de los modelos hidrogeológicos, ya que permite definir los límites físicos de dominio de modelación y, además, fija aspectos claves que inciden en su desempeño.

Las condiciones de borde de flujo de cada sección transversal SEAWAT están basadas en el modelo MODFLOW 3D como se detalla a continuación. Por otro lado, las condiciones de borde de transporte requieren, al igual que un modelo de flujo, ser fijadas para establecer las condiciones del transporte. La descripción de estas condiciones son las siguientes:

#### 10.3.5.1 Límite Inferior

En cada perfil SEAWAT, la parte inferior del modelo se encuentra a la misma profundidad que la parte inferior del modelo MODFLOW (cota 1.900 msnm). De igual forma, los límites inferiores de SEAWAT son representados como límites impermeables, es decir no existe traspaso de flujo a través de este límite.

#### 10.3.5.2 Límite Superior – Evapotranspiración (EVT)

La representación de EVT en SEAWAT es similar a la utilizada en MODFLOW, la cual se describió en el punto 10.2.2.4. Las zonas EVT (basadas en las definidas por Mardones) fueron transferidas directamente a SEAWAT desde MODFLOW. La diferencia en la aplicación en SEAWAT respecto de MODFLOW, fue que en el primero la curva de evaporación (basada en la propuesta por Philip) fue representada en el modelo mediante un segmento, definido en el tramo de las curvas donde se han observado los niveles de agua. En cambio, en MODFLOW se representó la curva de evaporación mediante dos segmentos, lo que no fue aplicable en SEAWAT por requerimientos de convergencia del modelo. En el Apéndice J del presente Anexo se muestra en detalle la recta ajustada para cada zona en los tres perfiles SEAWAT.

Los valores de EVT varían, dependiendo de los periodos de modelación descritos anteriormente. Los siguientes procedimientos generales fueron utilizados para los tres periodos de modelación, con detalles adicionales proporcionados más adelante para el período de Calibración:

- Período de Pre-calibración – Se utilizó el promedio de largo plazo de los valores de parámetros de EVT del periodo de Calibración. En otras palabras, se utilizó un solo set de valores de parámetros de EVT por cada zona de EVT en el periodo de Pre-calibración, sin variación estacional. Se utilizó este enfoque para garantizar que el tiempo de ejecución de este largo periodo de modelación (219 años) fuera

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

práctico para las numerosas ejecuciones requeridas en el modelo de calibración. El enfoque es adecuado porque el propósito principal del de Pre-calibración es proporcionar distribuciones en equilibrio para los niveles de fluidos y Sólidos Disueltos Totales (TDS) para el Periodo de Calibración.

- Periodo de Calibración – Los valores de parámetros de EVT para el periodo de Calibración se basan en la obtención de una correspondencia razonable con las curvas de EVT definidas en cada zona, las cuales varían anualmente entre los valores de verano e invierno.
- Periodo de Predicción – Los valores para el periodo de Calibración se mantuvieron en el periodo de Predicción, de manera similar a lo que se realizó en MODFLOW.

En MODFLOW y SEAWAT, la estimación de la tasa de EVT real para un instante de tiempo dado se realiza automáticamente por el modelo en base a la profundidad del nivel freático simulado y los valores especificados para los siguientes parámetros:

$ET_{MAX}$  = Tasa máxima de EVT, es la tasa de EVT que existiría si el nivel freático se encontrara en la superficie; y

$Prof_E$  = Profundidad de extinción, la profundidad del agua en la que la EVT deja de ocurrir.

Sin embargo, mientras que el modelo desarrollado en MODFLOW tiene la capacidad de simular la relación entre EVT y la profundidad del nivel freático con una línea de 2 segmentos, los tres modelos SEAWAT se implementaron con un solo segmento para lograr una adecuada estabilidad numérica del modelo en SEAWAT. En consecuencia con lo anterior, los valores de los parámetros de EVT de SEAWAT fueron seleccionados sobre la base del rango de profundidad observado del nivel freático dentro de la zona de EVT, con el objetivo de obtener tasas de EVT efectivas que fueran consistentes a los de las curvas de Philip. La distribución de la profundidad del nivel freático se describe en el punto 3.7 del Apéndice J, mientras que los valores de los parámetros de EVT de SEAWAT, y su relación a las curvas de Philip, se presentan en el punto 4.5.4 del Apéndice J.

En los lugares donde los perfiles SEAWAT cruzan las lagunas, la tasa de EVT fue fijada en cero, similar al enfoque utilizado en MODFLOW. Esto ocurre en los perfiles de La Punta - La Brava y Peine.

### 10.3.5.3 Límite Superior – Recarga (R)

La recarga al límite superior del modelo SEAWAT representa la componente de precipitación que se infiltra en el suelo. Las zonas de recarga y sus valores aplicados fueron obtenidos directamente de MODFLOW, según se describió en el punto 10.2.2.4.

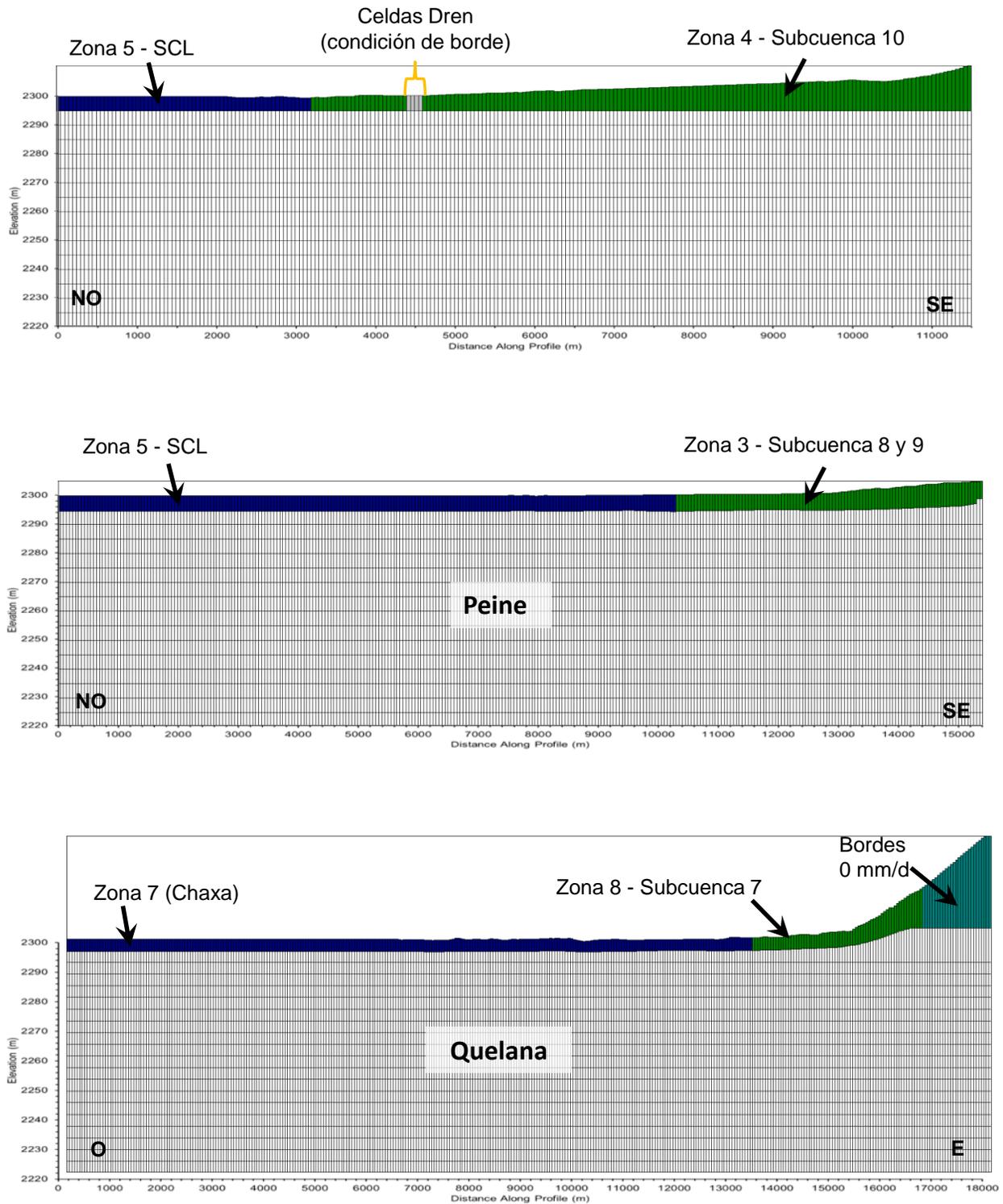
	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

De la misma forma que en MODFLOW, en SEWAT la recarga vertical varía según las zonas. La delimitación de las zonas de recarga en SEAWAT se basa directamente en MODFLOW y es indicada en la Figura 10-50 para los tres perfiles de SEAWAT. Los valores de recarga mensual especificados dentro de estas zonas varían en función de los periodos de modelación descritos anteriormente. Para los tres periodos de modelación se utilizaron los siguientes procedimientos:

- **Periodo de Pre-calibración** – Se utilizó el valor de Recarga promedio de largo plazo para cada zona del periodo de Calibración. Este enfoque se utilizó para garantizar que el tiempo de ejecución de este largo periodo (219 años) fuera práctico en términos de la realización de las numerosas ejecuciones requeridas para la calibración del modelo. Este enfoque resulta apropiado, ya que el objetivo principal del periodo de Pre-calibración es proporcionar distribuciones iniciales razonables para los niveles y para los Sólidos Disueltos Totales (TDS) en el periodo de Calibración.
- **Periodo de Calibración** – Los valores de Recarga para el periodo de Calibración se basaron en los valores mensuales utilizados en MODFLOW, determinados sobre la base de datos históricos de precipitaciones de la zona.
- **Período de Predicción** – Los valores medidos para el período de Calibración se mantuvieron durante el período de Predicción, como un ciclo de 26 años. Este enfoque es idéntico al utilizado en las predicciones realizadas en MODFLOW.

De manera similar a la EVT, la recarga fue establecida en cero en las ubicaciones donde los Perfiles SEAWAT cruzan las lagunas. Esto ocurre en los Perfiles de La Punta / La Brava y Peine, tal como se indica en la Figura 10-50.

**Figura 10-50 Configuración Zonas de Recarga Vertical en Perfiles SEAWAT**



Fuente: Elaboración propia

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

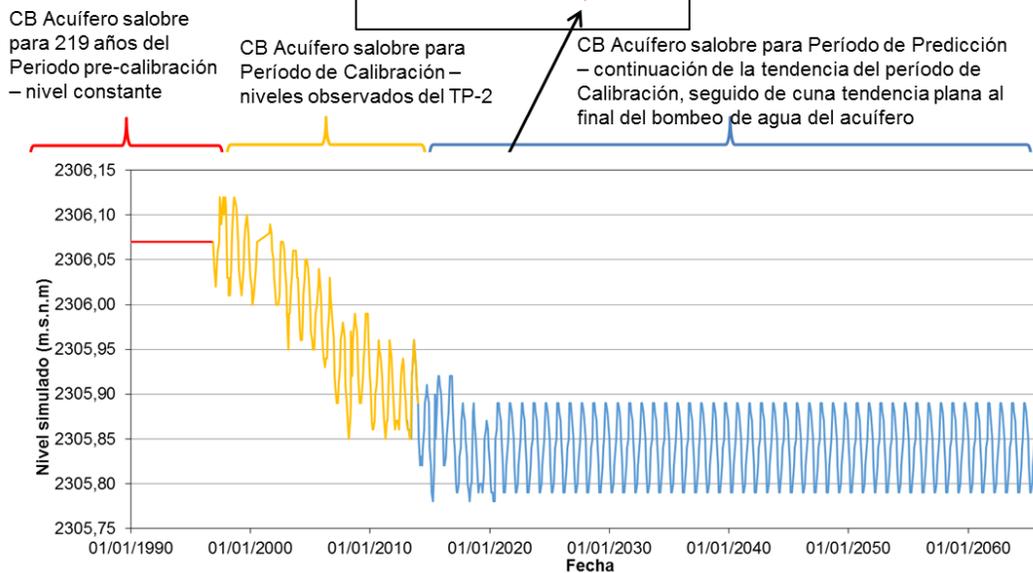
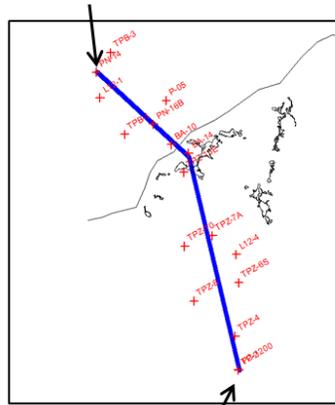
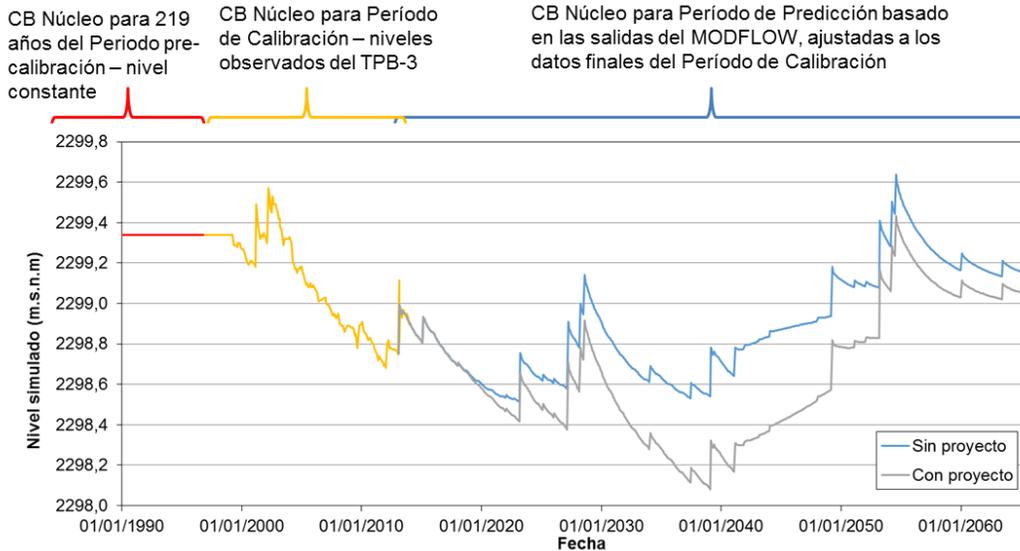
#### 10.3.5.4 Límite del Núcleo (altura constante)

La condición de borde de *Altura Constante* corresponde a alturas especificadas que fueron utilizadas en los límites extremos del núcleo (salmuera) en los tres perfiles SEAWAT (puntos señalados en Figura 10-45). Los valores de estas alturas se indican en el gráfico superior de la Figura 10-51, Figura 10-52 y Figura 10-53, de donde se puede apreciar que varían, dependiendo de los periodos de modelación y de los escenarios (con y sin proyecto) que se seleccionen como condición de borde.

Para definir el límite de altura constante en el extremo del Núcleo se utilizaron los siguientes criterios para cada periodo de modelación:

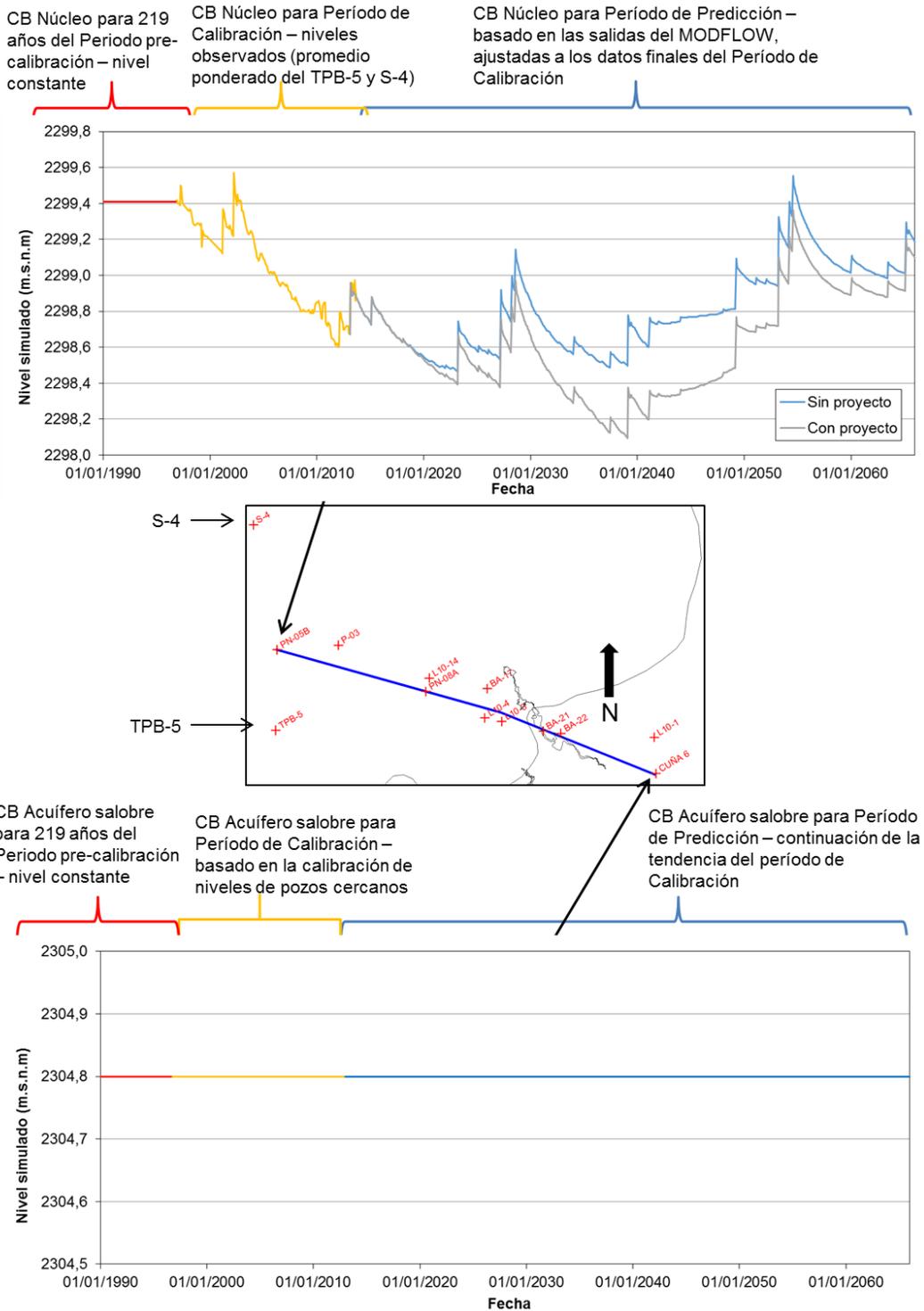
- Periodo de Pre-calibración – El valor al inicio del periodo de Calibración fue aplicado al periodo de Pre-calibración completo. En otras palabras, se especificó un solo valor de altura para el periodo de Pre-calibración, por cada perfil. Este enfoque fue utilizado para garantizar que el tiempo de funcionamiento de este periodo de modelación largo (219 años) fuera práctico en términos de la realización de numerosas ejecuciones requeridas para la calibración del modelo.
- Periodo de Calibración – Las mediciones de nivel de los pozos de monitoreo ubicados en los extremos del núcleo del perfil SEAWAT, fueron utilizados como los valores de altura especificados para este Periodo. Para el perfil de Quelana, los valores de altura se basan en las mediciones del pozo SOPM-4. Sin embargo, en los perfiles de Peine y de La Punta-La Brava, aunque existen pozos de monitoreo ubicado en el extremo del núcleo de ambos perfiles (PN-05B y PN-14B respectivamente), los registros de datos disponibles son relativamente cortos. En consecuencia, en el caso de Peine se utilizaron como datos de nivel el promedio ponderado con la distancia de dos pozos cercanos con mayor registro de datos (pozos S-4 y TPB-5). Y en el caso de La Punta-La Brava se utilizaron directamente los registros de nivel del pozo TPB-3, dada su cercanía al extremo del núcleo del perfil.
- Periodo de Predicción – Los valores de altura especificados para este periodo se basan en los resultados de la simulación de escenarios predictivos en MODFLOW, en los pozos PN-05B, PN-14B y SOPM-4. La predicción de niveles en MODFLOW fue traducida en descensos simulados para proporcionar una progresión pareja de las alturas especificadas del periodo de Calibración al periodo de Predicción. En la Figura 10-51, Figura 10-52 y Figura 10-53 se presentan las condiciones de borde de altura constante (generadas por MODFLOW) para el periodo de predicción para los escenarios sin y con proyecto.

**Figura 10-51 Altura constante en límites del perfil La Punta – La Brava**



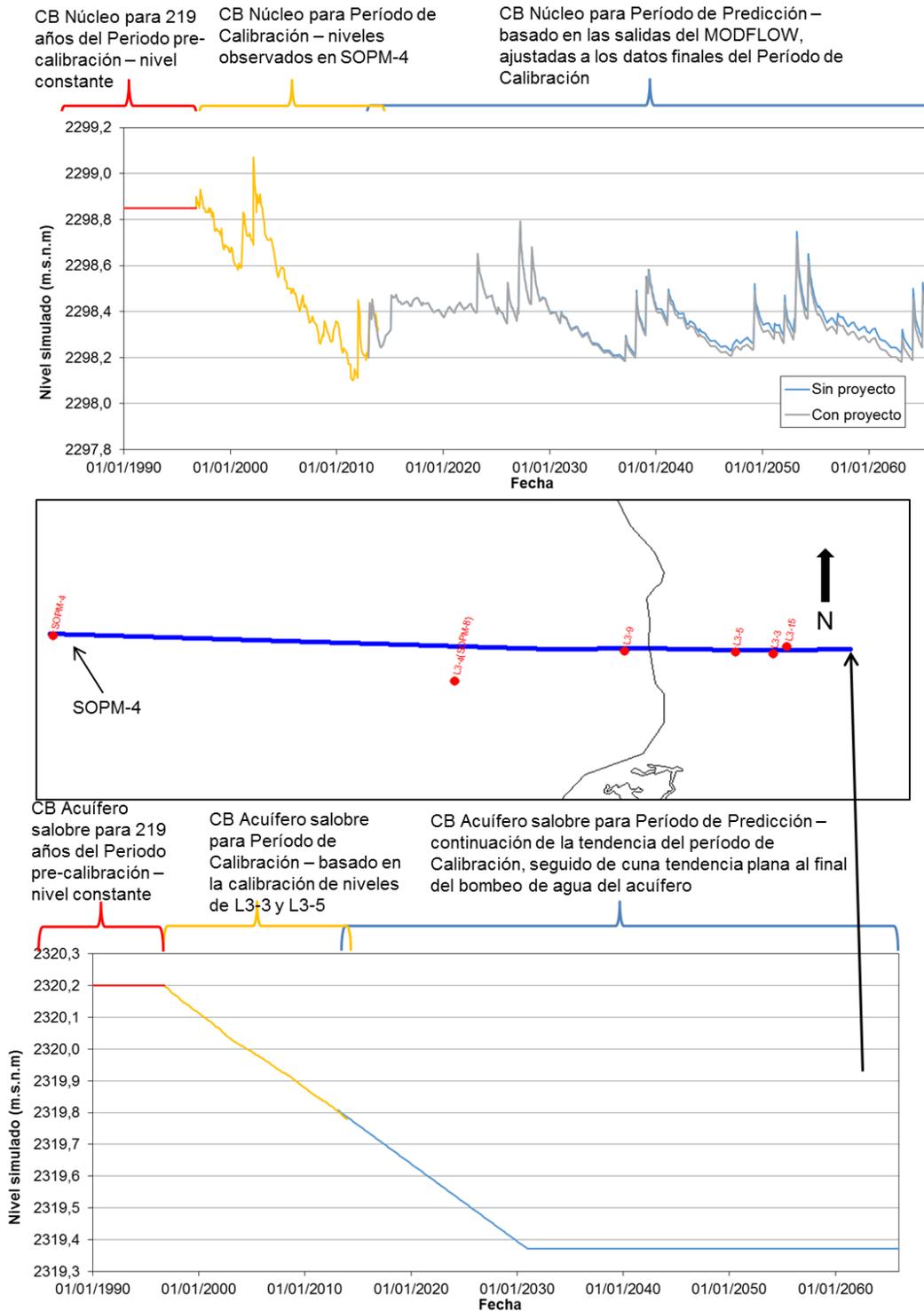
Fuente: Elaboración propia

**Figura 10-52 Altura constante en límites del perfil Peine**



Fuente: Elaboración propia

**Figura 10-53 Altura constante en límites del perfil Quelana**



Fuente: Elaboración propia

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

### 10.3.5.5 Límite de Agua Salobre (altura constante)

Las alturas en límites de extremos de agua dulce-salobre de cada uno de los tres perfiles SEAWAT también fueron especificadas como condición de borde de *Altura Constante*. Los valores de altura especificados se representan en los gráficos de la Figura 10-51, Figura 10-52 y Figura 10-53. Tal como se indica en estas figuras, los valores de altura especificada varían dependiendo de los periodos de modelación descritos anteriormente. Los siguientes procedimientos fueron utilizados para los definir este límite en los tres periodos de modelación:

- Periodo de Pre-calibración – El valor al inicio del periodo de Calibración fue aplicado al periodo de Pre-calibración completo. En otras palabras, se especificó un solo valor de altura para el periodo de Pre-calibración. Este enfoque fue utilizado para garantizar que el tiempo de ejecución del periodo de modelación largo (219 años) sea práctico en términos de realización de numerosas ejecuciones requeridas para el proceso de calibración.
- Periodo de Calibración – Se utilizaron mediciones de nivel desde pozos de monitoreo situados en los extremos (o cerca) de agua dulce-salobre de los modelos SEAWAT como valores de altura especificados para este periodo. Estos pozos de monitoreo se muestran en las Figuras anteriores y los detalles se indican a continuación:
- Para los perfiles de La Punta / La Brava, los valores de altura se basaron directamente en las mediciones del TP-2, en el cual se prolongó la tendencia observada durante los períodos en que no existían datos.
- Para el perfil de Peine se consideró un nivel constante en todo el periodo, basado en que el pozo CUÑA-6 de SQM ubicado en el extremo del perfil presenta esta condición, sin embargo, no se utilizó el valor de cota de nivel que presenta este pozo porque no se tiene confianza en el valor de su elevación topográfica. En consecuencia, se utilizó como valor constante aquel que calibra una coincidencia aceptable con los primeros dos pozos ubicados a continuación en el Perfil (BA-21 y BA-22 en Figura 10-52). El valor constante calibrado fue de 2304,8 msnm.
- Para el perfil Quelana, los valores de altura en el extremo de agua dulce fueron ajustados para lograr una coincidencia aceptable con los primeros dos pozos en el Perfil (L3-3 y L3-5 en Figura 10-53). Durante el periodo de Calibración, una tendencia de niveles a la baja es evidente en el pozo L3-3, debido al bombeo de agua dulce desde los pozos de SQM situados al Este. En consecuencia, una tendencia a la baja también fue asignada a la elevación especificada en el límite.
- Periodo de Predicción – Los valores de altura especificados para este periodo se basaron en lo siguiente:

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

- Para los perfiles de La Punta / La Brava, los valores de altura se basaron en una continuación de la tendencia del periodo de Calibración para TP-2. Esta tendencia fue continuada hasta agosto de 2020, fecha en que la que se estima el fin de los bombeos de agua dulce por parte de MEL y Zaldívar, que extraen agua al sur de este perfil. Después de agosto de 2020, se asumió de manera conservadora que la tendencia sería plana. De hecho, se espera que se produzca alguna recuperación del nivel de agua después que se suspenda el bombeo de agua dulce.
- Para el perfil de Peine, se continuó el valor constante de 2.304,8 msnm obtenido del periodo de Calibración.
- Para el perfil de Quelana, los valores de altura se basaron en una continuación de la tendencia del periodo de Calibración. Esta tendencia se continuó hasta diciembre 2030, fecha en que se prevé la suspensión del bombeo de agua dulce por parte de SQM en los pozos situados hacia el Este del perfil. Después de diciembre de 2030, se asumió de manera conservadora que los niveles se mantienen deprimidos sin recuperar. De hecho, se espera que se produzca alguna recuperación del nivel de agua después de que se suspenda el bombeo de agua dulce por parte de SQM.

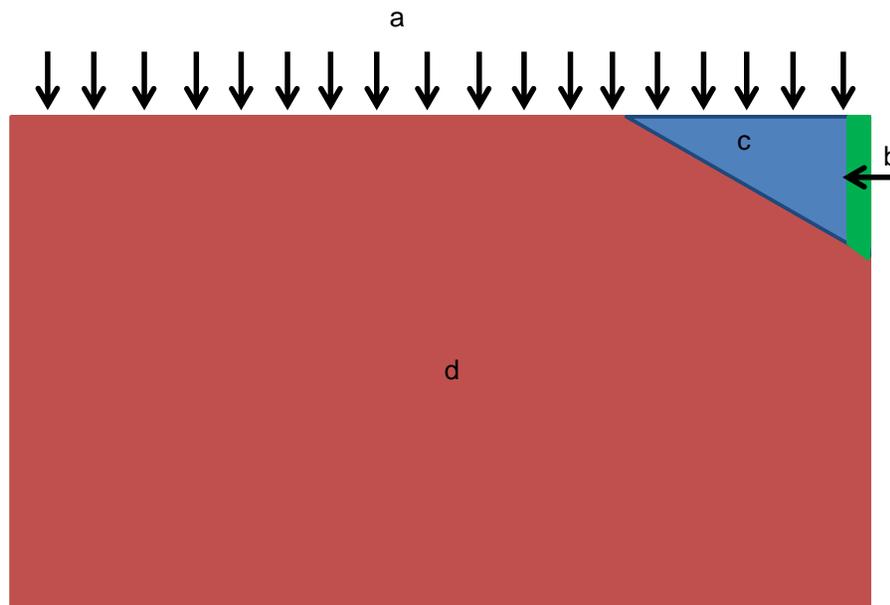
### 10.3.6 Propiedades del transporte de solutos

#### 10.3.6.1 Condiciones Iniciales y de Límite de Sólidos Disueltos Totales

En la Figura 10-54 se proporciona una ilustración conceptual de las condiciones iniciales y de borde de Sólidos Disueltos Totales (TDS) para los perfiles SEAWAT. Esta Figura es aplicable a los tres perfiles, ya que el enfoque utilizado para especificar las condiciones iniciales y de borde de TDS es conceptualmente el mismo para las tres.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

**Figura 10-54 Configuración conceptual de TDS iniciales y condiciones de borde en perfiles SEAWAT**



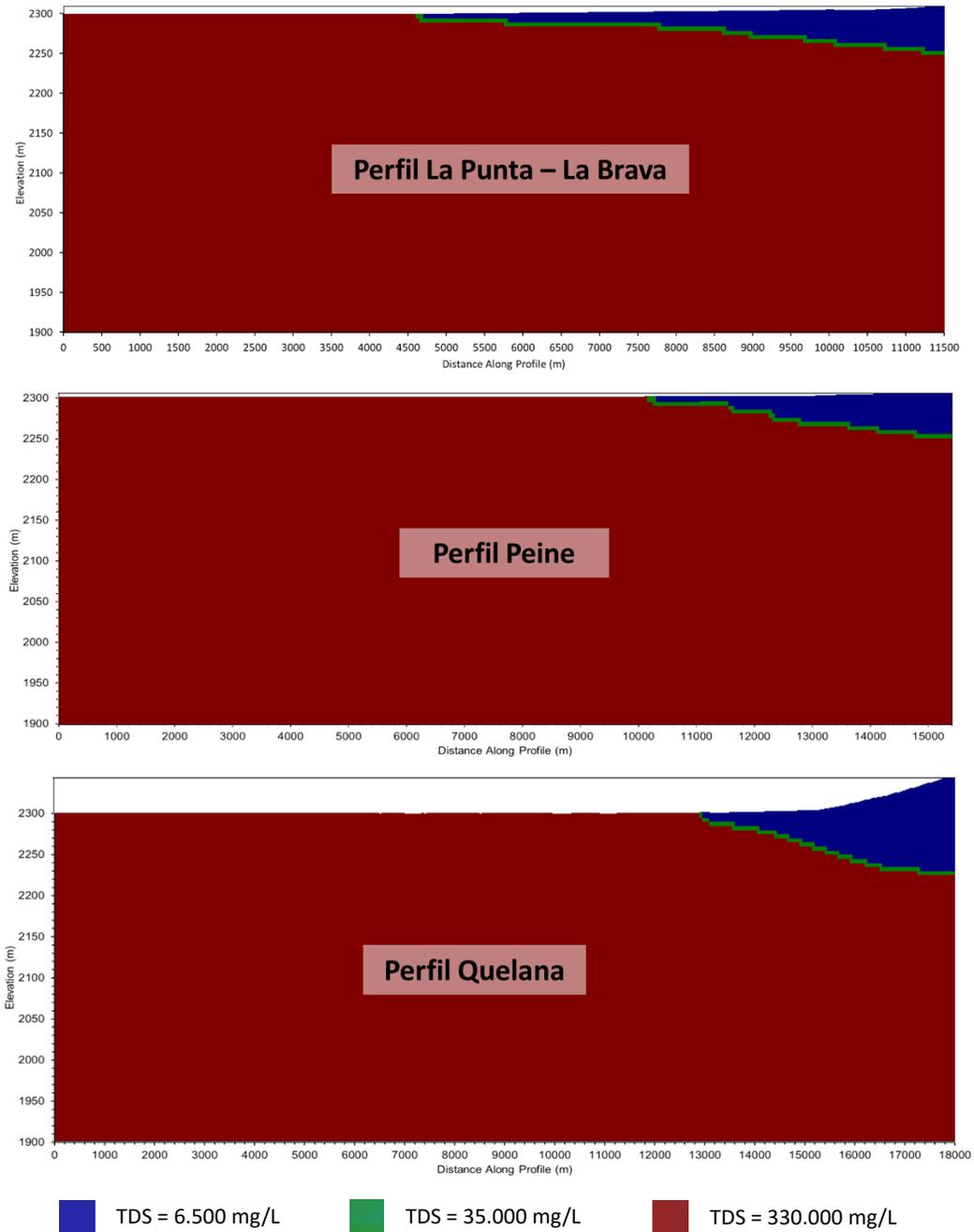
- a. Condición de Borde: Entrada directa por precipitación (TDS=0 mg/L)
- b. Condición de Borde : Flujo subterráneo de entrada al acuífero (TDS=0 mg/L)
- c. Condición Inicial: agua dulce-salobre (TDS = 6.500 mg/L)
- d. Condición Inicial : salmuera (TDS = 330.000 mg/L)

Fuente: Elaboración propia

#### 10.3.6.1.1 Distribuciones de TDS Iniciales

Las distribuciones de TDS iniciales fueron especificadas para el inicio del periodo de Pre-calibración en cada modelo SEAWAT. Las concentraciones iniciales se basaron en los resultados del muestreo, perfiles de conductividad y geofísica. Sin embargo, las distribuciones iniciales, indicadas en la Figura 10-55, fueron sólo requeridas como aproximación, ya que la configuración de TDS estable y definitiva es determinada por SEAWAT durante el periodo de Pre-calibración. Tal como se muestra en dicha figura, las distribuciones de TDS iniciales fueron simplificadas a tres zonas: una representa el agua dulce (6.500 mg/L TDS), otra representa salmuera (color azul representa 330.000 mg/L TDS) y la zona de transición entre salmuera y agua dulce (apenas perceptible entre las otras 2 zonas, de valor 35.000 mg/L TDS).

**Figura 10-55 Configuración inicial TDS perfiles SEAWAT**



Fuente: Elaboración propia

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

### 10.3.6.1.2 Condiciones de TDS en los límites

Las condiciones de borde de TDS en los límites de cada perfil fueron requeridas para especificar la química de cualquier fluido nuevo que entra a los perfiles SEAWAT, en este caso la recarga vertical directa y la recarga lateral (subterránea). Estas condiciones fueron especificadas de la siguiente manera:

- Límite superior – El contenido de TDS de cualquier recarga vertical de agua dulce a la parte superior del modelo fue especificada como 0 mg/L, ya que la recarga a lo largo de este límite se debe principalmente a la precipitación, con un TDS bajo.
- Límite inferior – No se requirió contenido TDS para este límite, ya que fue especificado como “sin flujo”.
- Límite en los extremos de agua dulce-salobre de los perfiles – El contenido de TDS de recarga que entra a través de este límite se fijó en 6.500 mg/L, basado en las observaciones de bajas concentraciones de TDS en las zonas altas (ver capítulo 7 Hidroquímica).

Al utilizar las concentraciones de TDS iniciales y en los límites descritas anteriormente, se ejecutaron los modelos SEAWAT durante el periodo de Pre-calibración. Se confirmó que las distribuciones de TDS fueron estables después de este periodo, y por lo tanto fueron utilizadas como la condición inicial para el periodo de Calibración. A su vez, la distribución del periodo de Calibración fue utilizada como la condición inicial para el periodo de Predicción.

### 10.3.6.2 Propiedades del Modelo de Transporte

El componente disuelto modelado en SEAWAT fue Sólidos Disueltos Totales (TDS), y las propiedades requeridas para modelar el transporte de solutos (MT3DMS) son las siguientes:

- Dispersividad ( $\alpha_L / \alpha_T$ ): representa la extensión de la mezcla o dilución del soluto al moverse en el medio poroso. Para la modelación SEAWAT se consideró un valor de  $\alpha_L = 25$  m, que es la mitad del tamaño de la celda de SEAWAT, con el fin de garantizar una solución estable. La Dispersividad vertical se consideró una 0,0001 veces la Dispersividad horizontal, por lo que tiene un valor de  $\alpha_T = 0,0025$  m. Con esta relación se consiguió tener en cuenta la estratificación horizontal, que debido a efectos de escala, no ha podido ser representada en las zonas de permeabilidad (esto se hizo de manera similar a lo modelado en el caso de otros Salares).
- Coeficiente de Difusión ( $D_m$ ), se utilizó un valor de  $8,64e-6$  m<sup>2</sup>/día; éste es un valor representativo de los tipos constituyentes disueltos representados por TDS. Sin embargo, éste parámetro tiene una sensibilidad despreciable a la escala de modelación realizada
- Porosidad efectiva de 0,15 y porosidad total de 0,30.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

### 10.3.7 Calibración del modelo

#### 10.3.7.1 Metodología

Para el proceso de calibración del modelo SEAWAT se tuvo en consideración los siguientes “objetivos de calibración”:

1. Reproducir los niveles freáticos observados en pozos de monitoreo ubicados en o cerca de los perfiles SEAWAT.
2. Reproducir la forma y posición de la interfase simulada con aquella estimada y la medida en terreno, a lo largo de los perfiles SEAWAT.
3. Obtener valores de conductividad hidráulica dentro del rango de aquellos utilizados en MODFLOW.

Considerando los objetivos de calibración indicados, los modelos finales que se desarrollan, presentan conjuntos relativamente únicos de valores de los parámetros que definen los modelos desarrollados.

Tal como se ha descrito anteriormente, la mayoría de los parámetros iniciales utilizados en los modelos SEAWAT son similares o idénticos a los utilizados en el modelo MODFLOW. Este enfoque fue utilizado porque el modelo MODFLOW tiene el beneficio de una calibración 3D detallada, lo que hace recomendable utilizar los resultados de este proceso en los perfiles SEAWAT, en la medida de lo posible. Sin embargo, debido a la capacidad de modelación de densidad variable de SEAWAT, es necesario realizar algunos cambios para calibrar los modelos SEAWAT, siendo la conductividad hidráulica el parámetro ajustado.

El proceso de calibración ha dado lugar a modelos de perfiles SEAWAT estables y robustos desde un punto de vista técnico. Por lo tanto, se considera que estos modelos proporcionan una herramienta válida para la evaluación de la evolución de descensos de niveles en los escenarios con y sin proyecto.

#### 10.3.7.2 Análisis de niveles medidos y simulados

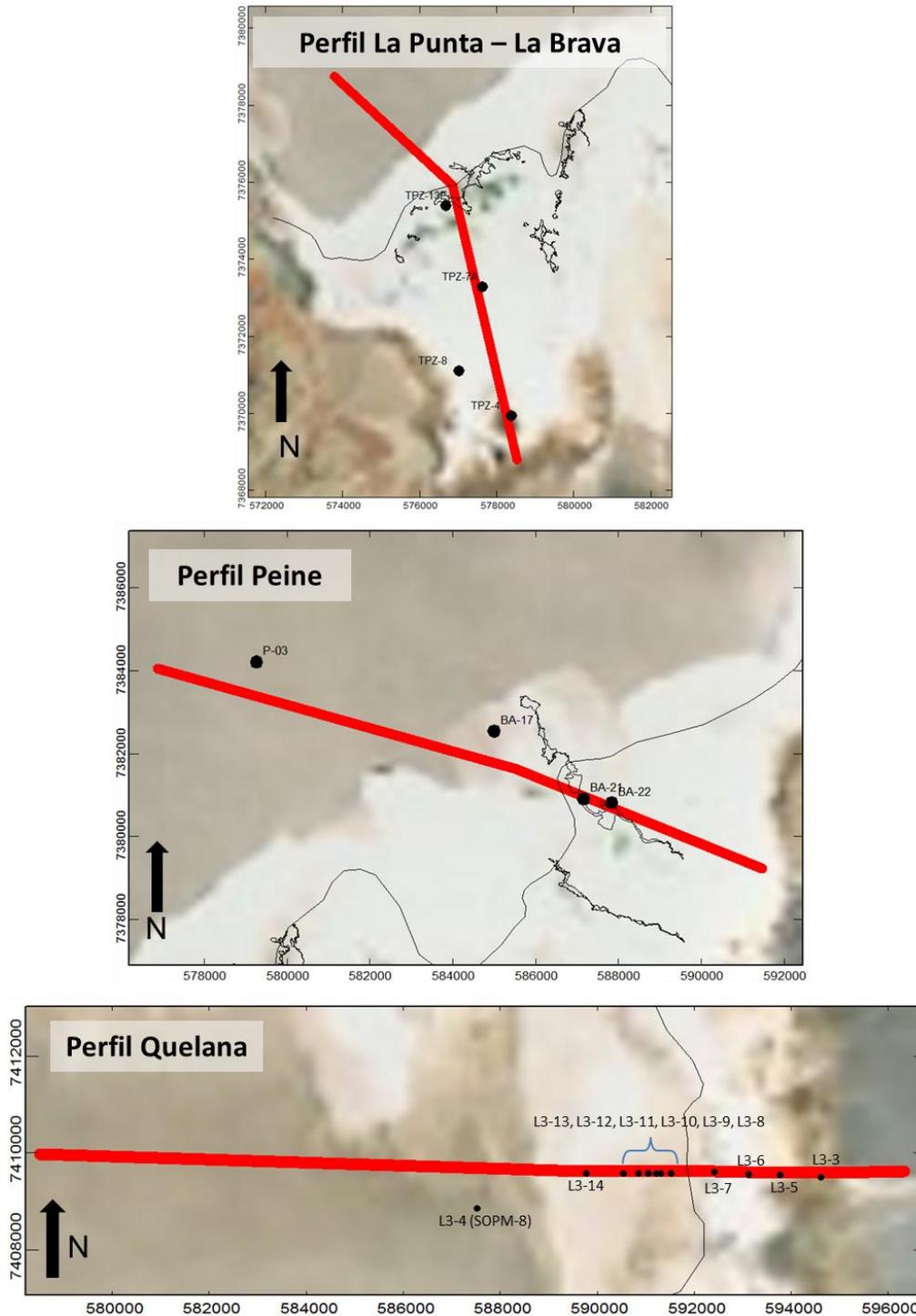
La evaluación del éxito de la calibración se realiza de forma cuantitativa y cualitativa. Ambas evaluaciones son necesarias, puesto que independientemente de la magnitud del error, es importante que el modelo refleje las tendencias observadas.

Para realizar esta evaluación se han comparado los niveles simulados por los modelos SEAWAT con los niveles medidos de los pozos disponibles cerca de los perfiles (dentro de 500 m, con las excepciones de L3-4 en el Perfil de Quelana que está a unos 800 m). Las ubicaciones de los pozos, en cada perfil, se indican en la Figura 10-56.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

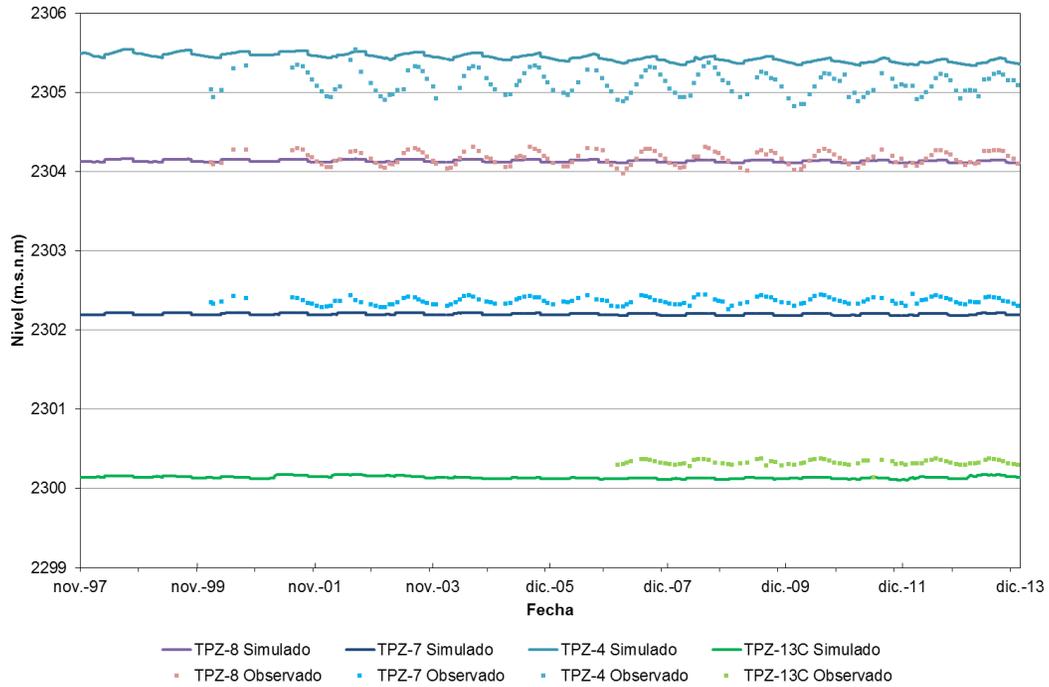
La evaluación cualitativa consiste en evaluar las tendencias de evolución de niveles simuladas por el modelo SEAWAT frente a las medidas tomadas en terreno. Los resultados de esta comparación se muestran en la Figura 10-57, Figura 10-58 y Figura 10-59.

**Figura 10-56 Localización Pozos utilizados para la calibración de perfiles SEAWAT**

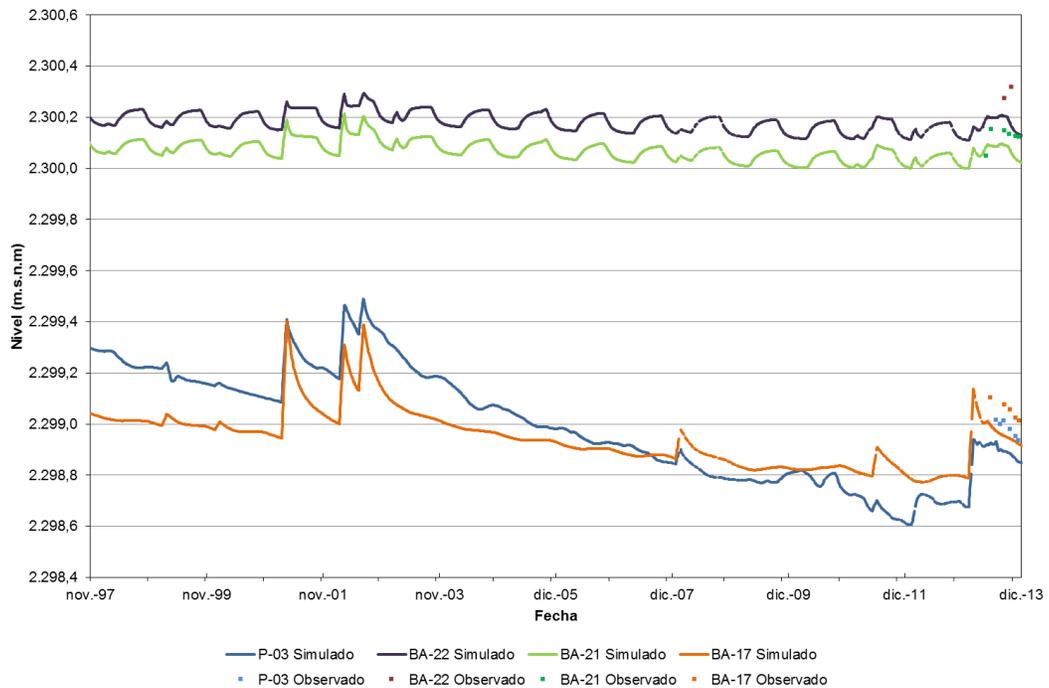


Fuente: Elaboración propia

**Figura 10-57 Comparación niveles medidos y simulados perfil La Punta / La Brava**

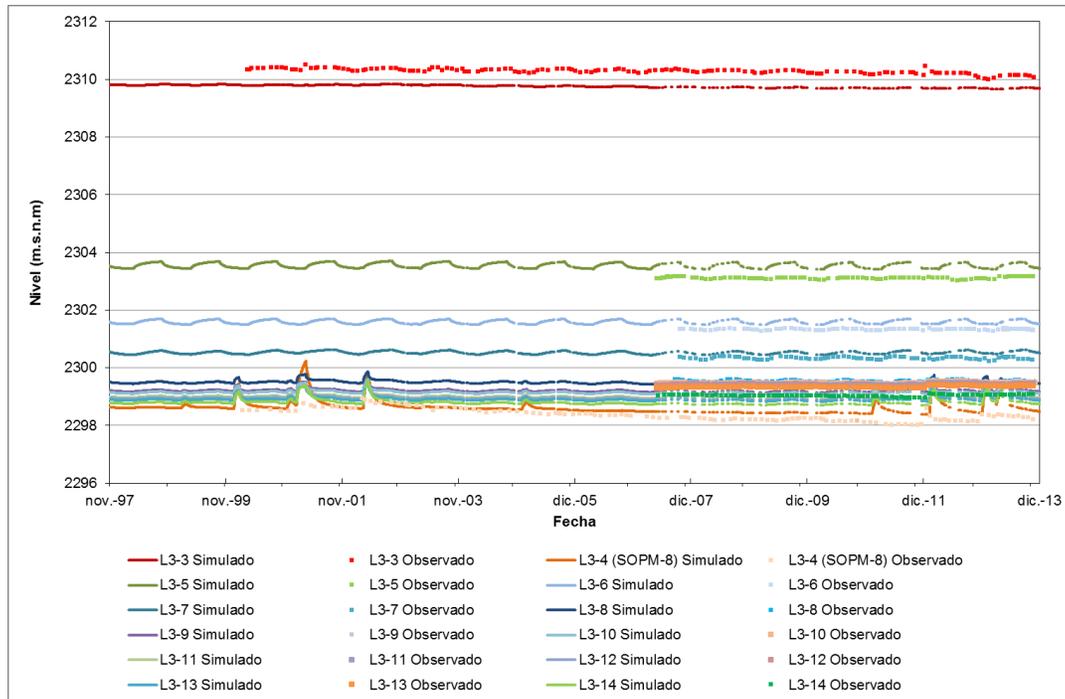


**Figura 10-58 Comparación niveles medidos y simulados perfil Peine**



Fuente: Elaboración propia

**Figura 10-59 Comparación niveles medidos y simulados perfil Quelana**



Fuente: Elaboración propia

En el caso del perfil de La Punta-La Brava (Figura 10-57) se observa una correcta verificación de las tendencias, que se mantienen prácticamente planas en los cuatro puntos de calibración. Incluso ha sido posible simular la variación estacional de niveles que es producto de la diferente tasa de evaporación existente entre verano e invierno. Este comportamiento es coherente con la evolución de niveles explicada en los modelos conceptuales de funcionamiento de las lagunas, que se describen con detalle en el Apéndice I, y de manera resumida en el punto 9.1.2 del capítulo 9: Modelo conceptual y balance hídrico.

En el perfil de Peine (Figura 10-58), se han seleccionado cuatro puntos de calibración que poseen una serie de datos relativamente corta. Se ha decidido no incluir los datos de los pozos de SQM, debido a que poseen un grado mayor de incertidumbre respecto a la cota reportada respecto de aquellos que son propiedad de Rockwood, por lo que se ha privilegiado la utilización de estos últimos. En general se observa, que la representación de tendencias simuladas es razonable, y es coherente con el comportamiento general de los niveles, que indica que los niveles aguas arriba de la interfase (puntos BA21 y BA-22) mantienen una tendencia estable en el tiempo, mientras que aquellos situados en la zona de salmuera (P-03 y BA-17), aguas abajo de la interfase, se ven afectados por la tendencia descendente que se observa en estos pozos, y que también es coherente con el comportamiento general de los niveles en el Núcleo.

En el perfil de Quelana (Figura 10-59), se muestra una representación adecuada de los niveles simulados, en los que se observa una tendencia plana en el tiempo en aquellos pozos situados en la Zona Marginal,

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

sin descensos ni aumentos de nivel, lo cual es coherente con el modelo conceptual establecido para este sistema. También se ha incluido la información del pozo L3-4, situado en el Núcleo, y cuyos datos de nivel abarcan un período de más de 13 años. En este caso la tendencia de niveles simulados por el modelo es coherente con la observada, y está de acuerdo con la evolución general de niveles que se observa en el Núcleo del Salar.

En general, la evaluación cualitativa de la calibración por medio de la comparación visual de las tendencias y/o comportamiento entre los niveles de agua observados y las simulaciones de SEAWAT indica una representación razonable de éstas.

La evaluación cuantitativa se realiza mediante la evaluación de ciertos estadísticos, como son el promedio residual, el promedio residual absoluto (MAE), la raíz del error cuadrático medio (RMS: Root Mean Square Error) y la raíz del error cuadrático medio normalizada (NMRS: Normalized Root Mean Square Error).

En la Tabla 10-18 se presentan los estadísticos de calibración obtenidos en los tres perfiles SEAWAT realizados. Tal como se indica, los resultados obtenidos para el Normal-MAE son inferiores al 5% para cada uno de los perfiles, lo que se encuentra dentro de lo requerido en la Guía de Uso de Modelos de Aguas Subterráneas (SEA 2012).

**Tabla 10-18 Estadística de Calibración Modelo SEAWAT**

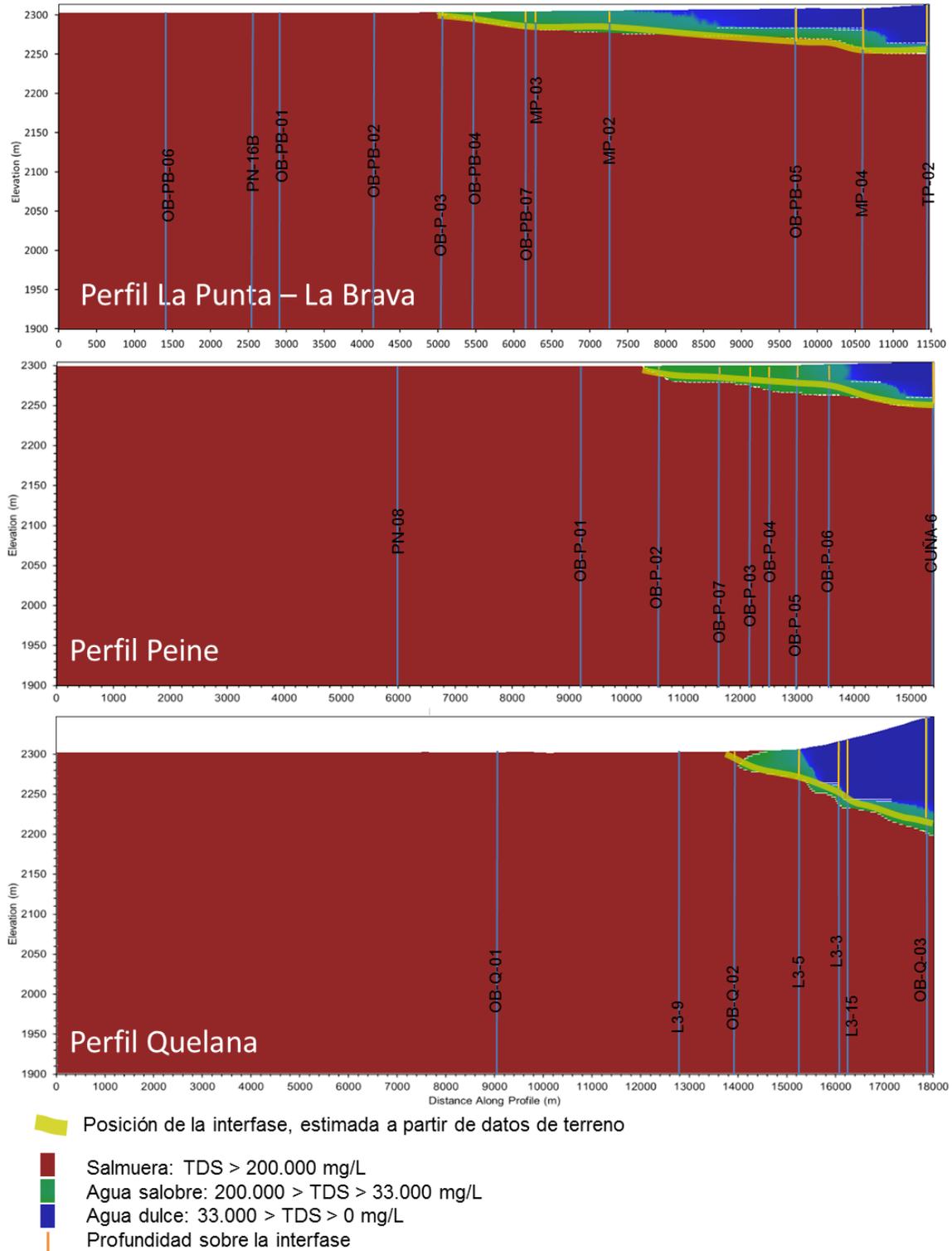
Perfil	Promedio Residual (m)	MAE (m)	RMS (m)	Normal MAE (%)
La Punta / La Brava	0,00	0,18	0,22	3,40
Peine	-0,06	0,08	0,09	4,36
Quelana	-0,14	0,35	0,38	2,79

Fuente: Elaboración propia

### 10.3.7.3 Análisis de la representación de la interfase salina

La comparación de la interfase simulada y estimada (a partir de los datos de terreno) se representa en la Figura 10-60, donde la interfase, estimada en terreno durante los monitoreos de Rockwood de 2013 y 2014 y antecedentes previos de otros titulares, se muestra como una línea sombreada de color amarillo, mientras que la interfase simulada se indica como la zona que limita las aguas con TDS correspondientes a agua salobre (color verde) con las salmuera (color granate). Esta comparación cualitativa muestra que los modelos SEAWAT proporcionan una aceptable representación de la interfase.

**Figura 10-60 Distribución de la Interfase medida y simulada**



Fuente: Elaboración propia

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

Los modelos de SEAWAT representan el proceso de movimiento de agua dulce desde las subcuencas aportantes hacia el Núcleo debido a la fuerza impulsora (que genera la diferencia de carga hidráulica) de la recarga desde las áreas altas. La evapotranspiración elimina el agua dulce en la superficie del suelo y el fluido restante se vuelve cada vez más concentrado en TDS, convirtiéndose en agua salobre y finalmente en salmuera.

En la zona donde la interfase alcanza la superficie del terreno casi todas las entradas de agua salobre se han evaporado y el agua restante se ha concentrado convertirse en salmuera. Estos procesos han dado lugar a las representaciones de la interfase que se mostraron en las figuras anteriores.

Por estas razones, los modelos desarrollados en SEAWAT calibrados se considera que representan adecuadamente el sistema de flujo general, de acuerdo a lo descrito en el modelo conceptual del punto 9.1.1.

#### 10.3.7.4 Análisis de las Conductividades Hidráulicas

Las distribuciones de conductividad hidráulica iniciales utilizadas en los modelos desarrollados en SEAWAT se obtuvieron directamente desde el modelo regional desarrollado en MODFLOW. Esto se ha realizado así en atención a que el modelo MODFLOW presenta la ventaja de tener una configuración y calibración 3D regional completa. Sin embargo, no debe esperarse que todos los valores de permeabilidad importados directamente desde MODFLOW den lugar a modelos SEAWAT calibrados, debido a las diferentes capacidades (simulación de flujos de densidad variable) y configuraciones geométricas (distinto tamaño de grilla) existentes entre ambos modelos.

Dentro del proceso de calibración se procuró mantener los valores de conductividad hidráulica lo más similares a los definidos en la calibración de MODFLOW, lo cual fue particularmente aplicable en el Núcleo, donde el efecto de la interfase salina es despreciable y atendiendo también la mayor disponibilidad de pruebas de bombeo realizadas por el titular en el Núcleo (ver punto 8.2.3 y Apéndice H), que entregan valores más confiables de este parámetro. En la Zona Marginal, considerando que las diferentes capacidades entre MODFLOW y SEAWAT son más significativas debido a la proximidad de la interfase, se han aceptado diferencias mayores entre la permeabilidad calibrada en MODFLOW y SEAWAT. Las distribuciones de conductividad hidráulica calibradas en SEAWAT se mostraron en la Figura 10-47, Figura 10-48 y Figura 10-49. Tal como se indica, las distribuciones iniciales y calibradas son generalmente similares (dentro de un orden de magnitud), especialmente en la zona del Núcleo.

#### 10.3.8 Análisis de sensibilidad del SEAWAT

Los resultados de los análisis de sensibilidad del modelo SEAWAT se realizaron para mostrar la sensibilidad de la calibración a los cambios en algunos de los parámetros de entrada. Las salidas analíticas se presentan en términos de estadísticas de calibración realizadas con las diferencias entre niveles

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

medidos y simulados. En consecuencia, el análisis se relaciona principalmente con los objetivos de calibración de los niveles de agua en los pozos utilizados en la calibración de los perfiles SEAWAT. La sensibilidad de los siguientes parámetros fue evaluada en este análisis:

- Conductividad Hidráulica – Los valores fueron aumentados y disminuidos por factores de 5 y 0,2, respectivamente. Para cada simulación del análisis de sensibilidad, el ajuste fue realizado para cada zona de conductividad hidráulica de manera individual, dejando las zonas restantes sin cambios desde el modelo base.
- Coeficiente de almacenamiento – Los valores fueron aumentados y disminuidos por factores de 5 y 0,2, respectivamente. Para cada simulación de análisis de sensibilidad, el ajuste fue realizado para cada zona de coeficiente de almacenamiento de manera individual, dejando las zonas restantes sin cambios desde el modelo base.

Los resultados del análisis de sensibilidad de cada modelo se resumen de la siguiente manera para los tres perfiles SEAWAT, en relación con las zonas de permeabilidad de cada perfil mostradas en la Figura 10-47, Figura 10-48 y Figura 10-49:

- Perfil de La Punta / La Brava (Tabla 10-19)
  - Conductividad Hidráulica – La calibración es relativamente insensible a los cambios de conductividad hidráulica en las Zonas 5 y 6, en el extremo del núcleo del perfil. Del mismo modo, es relativamente insensible a los cambios en las zonas más profundas (1 y 3). Por otra parte, la calibración es sensible a los cambios en las áreas de los límites centrales y de agua dulce del perfil (Zonas 2 y 4). En el área central (Zona 2), la calibración es sensible a los aumentos y disminuciones de la conductividad hidráulica. En el área límite de agua dulce (Zona 4), la sensibilidad se observa para incrementos y disminuciones.
  - Coeficiente de almacenamiento – La calibración es relativamente insensible a los cambios en este parámetro.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

**Tabla 10-19 Análisis de sensibilidad en el perfil La Punta – La Brava**

Parámetro modificado		Valor aplicado $K_h$ (m/d)	Promedio Residual (m)	MAE (m)	RMS (m)
<b>Valores del modelo calibrado</b>			<b>0,00</b>	<b>0,18</b>	<b>0,22</b>
Conductividad hidráulica [m/día]	Zona 1 x 5	0,5	0,00	0,18	0,22
	Zona 1 x 0,2	0,02	0,00	0,18	0,22
	Zona 2 x 5	500	-0,25	0,25	0,30
	Zona 2 x 0,2	20	0,03	0,29	0,34
	Zona 3 x 5	0,025	0,00	0,19	0,22
	Zona 3 x 0,2	0,001	0,00	0,19	0,22
	Zona 4 x 5	900	0,11	0,29	0,39
	Zona 4 x 0,2	36	-0,31	0,31	0,34
	Zona 5 x 5	500	-0,01	0,19	0,22
	Zona 5 x 0,2	20	0,00	0,18	0,22
	Zona 6 x 5	2500	0,00	0,18	0,22
Zona 6 x 0,2	100	0,00	0,18	0,22	
Coeficiente de Almacenamiento [adimensional]	Zona 1 x 2	0,02	0,00	0,18	0,22
	Zona 1 x 0,5	0,005	0,00	0,18	0,22
	Zona 2 x 2	0,06	0,00	0,18	0,22
	Zona 2 x 0,5	0,015	0,00	0,18	0,22
	Zona 3 x 2	0,02	0,00	0,18	0,22
	Zona 3 x 0,5	0,005	0,00	0,18	0,22
	Zona 4 x 2	0,3	0,00	0,18	0,22
	Zona 4 x 0,5	0,075	0,00	0,18	0,22
	Zona 5 x 2	0,5	0,00	0,18	0,22
	Zona 5 x 0,5	0,125	0,00	0,18	0,22

Fuente: Elaboración propia

- Perfil de Peine (Tabla 10-20)
  - Conductividad Hidráulica – La calibración es relativamente insensible a los cambios de conductividad hidráulica en la Zona 1, en el extremo del núcleo del perfil. Del mismo modo, es relativamente insensible a los cambios en extremos de límites de agua dulce (Zona 5) y en profundidad (Zona 6). Por otra parte, la calibración es relativamente sensible a incrementos en la conductividad hidráulica en un área larga y central (Zona 2, 3 y 4).
  - Coeficiente de almacenamiento – La calibración es relativamente insensible a los cambios en este parámetro.

**Tabla 10-20 Análisis de sensibilidad en el perfil Peine**

Parámetro modificado		Valor aplicado $K_h$ (m/d)	Promedio Residual (m)	MAE (m)	RMS (m)
<b>Valores del modelo calibrado</b>			<b>-0,06</b>	<b>0,08</b>	<b>0,09</b>
Conductividad hidráulica [m/día]	Zona 1 x 5	5000	-0,06	0,08	0,09
	Zona 1 x 0,2	200	-0,06	0,08	0,09
	Zona 2 x 5	500	-0,11	0,12	0,13
	Zona 2 x 0,2	20	-0,02	0,07	0,09
	Zona 3 x 5	75	-0,08	0,13	0,15
	Zona 3 x 0,2	3	-0,03	0,06	0,07
	Zona 4 x 5	500	0,05	0,11	0,13
	Zona 4 x 0,2	20	-0,06	0,07	0,08
	Zona 5 x 5	550	-0,03	0,07	0,09
	Zona 5 x 0,2	22	-0,07	0,09	0,10
	Zona 6 x 5	0,5	-0,07	0,08	0,09
	Zona 6 x 0,2	0,02	-0,06	0,08	0,09
Coeficiente de Almacenamiento [adimensional]	Zona 1 x 2	0,06	-0,06	0,08	0,09
	Zona 1 x 0,5	0,015	-0,07	0,08	0,09
	Zona 2 x 2	0,5	-0,06	0,08	0,09
	Zona 2 x 0,5	0,125	-0,06	0,08	0,09
	Zona 3 x 2	0,02	-0,06	0,08	0,09
	Zona 3 x 0,5	0,005	-0,06	0,08	0,09

Fuente: Elaboración propia

- Perfil de Quelana (Tabla 10-21)
  - Conductividad hidráulica – La calibración es relativamente insensible a los cambios de conductividad hidráulica de todo el modelo, con la excepción de las zonas más cercanas a los límites de agua dulce (Zonas 4 y 5). En ambos casos, la sensibilidad está relacionada a los aumentos en la conductividad hidráulica.
  - Coeficiente de almacenamiento – La calibración es relativamente insensible a los cambios en este parámetro.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

**Tabla 10-21 Análisis de sensibilidad en el perfil de Quelana**

Parámetro modificado		Valor aplicado K <sub>h</sub> (m/d)	Promedio Residual (m)	MAE (m)	RMS (m)
<b>Valores del modelo calibrado</b>		N/A	<b>-0,14</b>	<b>0,35</b>	<b>0,38</b>
Conductividad hidráulica [m/día]	Zona 1 x 5	375	-0,14	0,35	0,38
	Zona 1 x 0,2	15	-0,14	0,35	0,38
	Zona 2 x 5	150	-0,16	0,35	0,38
	Zona 2 x 0,2	6	-0,13	0,35	0,38
	Zona 3 x 5	50	-0,07	0,30	0,36
	Zona 3 x 0,2	2	-0,01	0,29	0,33
	Zona 4 x 5	200	-0,08	0,43	0,52
	Zona 4 x 0,2	8	-0,11	0,33	0,41
	Zona 5 x 5	35	4,60	4,60	5,23
	Zona 5 x 0,2	1,4	-0,32	0,41	0,49
	Zona 6 x 5	0,5	-0,14	0,35	0,38
	Zona 6 x 0,2	0,02	-0,14	0,35	0,38
	Zona 7 x 5	0,5	-0,15	0,36	0,39
	Zona 7 x 0,2	0,02	-0,14	0,35	0,38
	Zona 8 x 5	0,3	-0,13	0,34	0,37
	Zona 8 x 0,2	0,012	-0,15	0,36	0,39
Coeficiente de Almacenamiento [adimensional]	Zona 1 x 2	0,1	-0,14	0,35	0,38
	Zona 1 x 0,5	0,025	-0,14	0,35	0,38
	Zona 2 x 2	0,5	-0,14	0,35	0,38
	Zona 2 x 0,5	0,125	-0,14	0,35	0,38
	Zona 3 x 2	0,12	-0,14	0,35	0,38
	Zona 3 x 0,5	0,03	-0,14	0,35	0,38
	Zona 4 x 2	0,01	-0,14	0,35	0,38
	Zona 4 x 0,5	0,0025	-0,14	0,35	0,38

Fuente: Elaboración propia

#### 10.4 Conclusiones sobre desarrollo de los modelos numéricos

Los trabajos que se han realizado en el marco del estudio, han permitido profundizar en el conocimiento de la dinámica de los sistemas hídricos e hidrogeológicos que están ubicados en el Sur y Este del Salar de Atacama, lo que se ha traducido en una modelación numérica actualizada, que permite evaluar que el efecto del aumento de explotación tanto de salmuera como de agua salobre, no generan ningún un cambio en las tendencias de los niveles, ni un descenso en los sectores de interés.

En la modelación realizada se ha considerado que la interfase salina subterránea, que en la práctica significa una desconexión hidráulica entre el agua salobre y la salmuera del Núcleo del Salar, ha sido representada, en la componente MODFLOW 3D, mediante un límite de capas con distinta conductividad hidráulica, permitiendo representar el efecto de la interfase salina en este modelo de manera aceptable. Lo anterior ha permitido simular el ascenso de los flujos de agua procedentes de los acuíferos de agua dulce, permitiendo la descarga por evaporación que tiene lugar en la Zona Marginal Acuífero (aguas arriba de la

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

interfase) de manera coherente con los cálculos realizados en el balance hídrico (punto 9.3) y el traspaso de aguas entre Zona Marginal y Núcleo por encima de la interfase.

Por lo tanto, el modelo MODFLOW 3D se ha construido con una doble finalidad; por un lado conseguir una representación lo más precisa posible de los flujos estimados en el cálculo del balance hídrico, que a su vez son coherentes con el modelo conceptual, y por el otro, y debido a lo anterior, para estimar los descensos de los niveles de salmuera en el Núcleo producidos por las extracciones de SQM y Rockwood, bajo distintos escenarios.

Se ha realizado una modelación con SEAWAT en 2D, en tres perfiles paralelos a la dirección de flujo hacia las zonas de extracción, y situados sobre los sistemas lagunares de La Punta-La Brava, Peine y Aguas de Quelana (Quelana en este capítulo). El modelo SEAWAT permite una correcta representación de flujos en un mismo sistema con diferente densidad, por lo que estos perfiles se han utilizado para, considerada la posición y libertad de movimiento de la interfase salina, evaluar la potencial afección que las extracciones de salmuera en el Núcleo pudieran tener sobre los niveles freáticos en las áreas donde se producen las surgencias de agua subterránea que alimentan los sistemas lagunares.

El modelo numérico MODFLOW 3D desarrollado en el Salar ha logrado representar las características hidrogeológicas del sistema, en particular el comportamiento observado de niveles en la salmuera y en el acuífero durante el período de calibración (1997-2013), donde se ha conseguido un NRMS del 2,7%. Además se ha conseguido representar los flujos de entrada y salida establecidos en el balance hídrico del modelo conceptual con un error inferior al 1% de manera global. De esta manera, el modelo entrega las condiciones de borde para la modelación SEAWAT, con una adecuada representatividad de los niveles de las zonas de acople.

Por otra parte, los 3 perfiles del modelo SEAWAT 2D que atraviesan los sistemas lagunares (ver Figura 10-45), fueron calibrados logrando un buen ajuste de los niveles observados respecto de los simulados, alcanzando valores máximos de NMAE inferiores al 5%.

Ambos modelos han sido sometidos a un análisis de sensibilidad de los parámetros de conductividad hidráulica y del coeficiente de almacenamiento. Como resultado se ha obtenido que la conductividad hidráulica es el parámetro más sensible, sobre todo en los modelos de La Punta – La Brava y de Peine.

Dada la buena calibración conseguida en la modelación en su conjunto, tanto en los niveles como en los flujos del balance hídrico, los modelos desarrollados sirven como herramienta de predicción para simular la evolución de descensos en los dos escenarios, con y sin proyecto. Es decir, manteniendo la explotación aprobada de salmuera en el Salar de SQM y de Rockwood (142 L/s), y considerando el aumento de extracción de 300 L/s solicitado por el titular, respectivamente.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

## 11 ESCENARIOS PREDICTIVOS

### 11.1 Objetivos

El objetivo de la simulación de escenarios con la utilización de los modelos, es evaluar el comportamiento futuro del sistema, niveles en la salmuera (Núcleo) y niveles en el acuífero dulce-salobre del Salar, y así poder evaluar el comportamiento hidrogeológico del sistema en las proximidades de la explotación de Rockwood. En este sentido, se comprueba que un aumento en 300 L/s en la explotación actual de salmuera de Rockwood y un aumento de 6 L/s de agua salobre, no produce descenso de niveles en el sector de las lagunas, que pudiera significar una disminución en los afloramientos de agua dulce-salobre que alimentan las lagunas existentes, y por lo tanto no afectando su ecosistema.

### 11.2 Aspectos Metodológicos

En relación con la metodología utilizada para la evaluación, ésta consiste en operar los modelos numéricos primero para el escenario sin proyecto denominado en adelante “Caso Base”, conformado por la explotación actual de Rockwood (142 L/s) y de SQM (1.700 L/s); y un escenario futuro o también denominado “Con Proyecto”, conformado por un aumento de la explotación de salmuera por parte de Rockwood en 300 L/s y de 6 L/s adicionales de agua salobre, es decir una explotación total de salmuera de 442 L/s por parte de Rockwood.

Las simulaciones se hacen para un período total de tiempo de 52 años a partir de 2014, considerando que el proyecto de explotación de Rockwood comienza en enero del 2016, tiene una vida útil de 25 años y los siguientes 25 años de simulación son para evaluar la recuperación del sistema.

Además de las simulaciones mencionadas anteriormente, que conforman el “Escenario de Evaluación del Proyecto”, también han sido simulados otros escenarios cuya finalidad es aportar más antecedentes del comportamiento del sistema frente a situaciones hipotéticas, a saber:

- Escenario de Recarga Reducida
- Escenario de Aumento de la Demanda de Agua Dulce-salobre
- Escenario de Movilidad al Este de Pozos Rockwood
- Escenario de Disminución de Extracción de Salmuera por Rockwood

Dentro de estos escenarios, destaca el escenario denominado “Escenario de Recarga Reducida”, que corresponde a simular la situación Sin Proyecto y Con Proyecto considerando periodos eventuales de sequía extrema. Este escenario es el que se utiliza para establecer alertas preventivas, de manera de que los sistemas lagunares se vean protegidos aun cuando existan años de baja precipitación. Los resultados de este escenario y de esta evaluación son los que se utilizan en el Plan de Alerta Temprana (PAT)

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

propuesto en esta Adenda 5, el que se encuentra descrito en detalle en el capítulo 4 del Anexo 3 de esta adenda.

Los escenarios adicionales que se presentan, se utilizan para evaluar el comportamiento o sensibilidad del sistema, considerando condiciones ambientalmente desfavorables y que confirman la no afección a los sistemas lagunares.

Para cada uno de los escenarios a evaluar, se simulan a su vez 2 casos: Sin proyecto o Caso Base (denominado en adelante “CB”) y Con Proyecto (denominado en adelante “CP”), determinando el efecto del proyecto mediante la comparación de ambos casos.

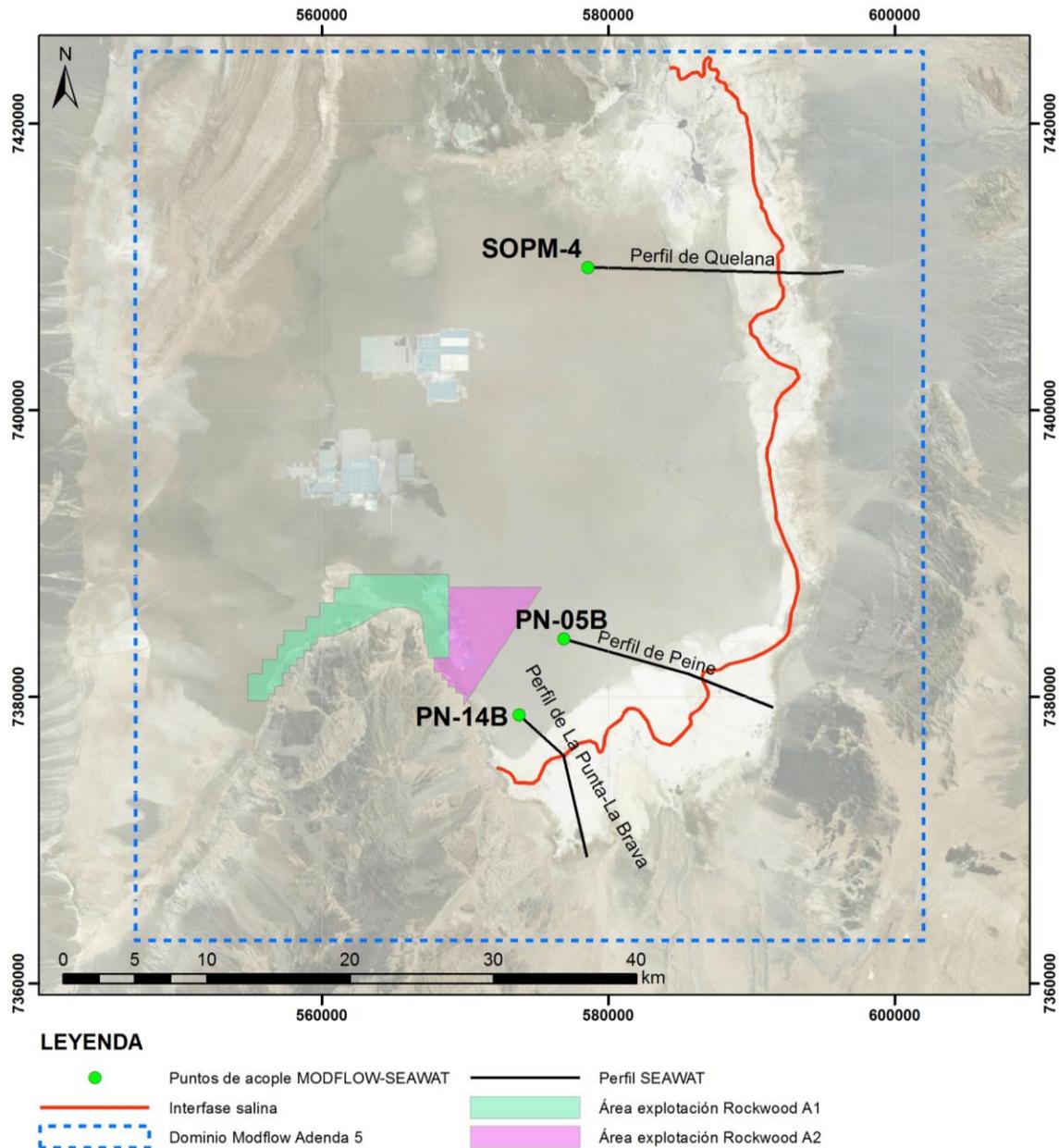
Asimismo, en algunos escenarios también se compara el caso Con Proyecto de dicho escenario con el caso Con Proyecto del Escenario de Evaluación del Proyecto. Lo cual permite conocer los cambios asociados a las distintas variables analizadas en dichos escenarios.

Como se mencionó anteriormente, para la simulación y obtención de resultados de todos los escenarios, se utilizaron en conjunto los modelos MODFLOW y SEAWAT (ver capítulo 10 de este Anexo), Para la simulación MODFLOW existen tres puntos de especial interés, que constituyen los límites en el Núcleo de los tres perfiles SEAWAT, y que son los utilizados como puntos de acople entre ambos modelos. Para analizar los efectos del bombeo, se utilizan puntos de observación de nivel tanto en MODFLOW, como en SEAWAT.

### 11.3 Identificación de pozos para análisis

Los resultados de las simulaciones realizadas con el modelo MODFLOW tienen como objetivo evaluar el comportamiento del escenario considerado en los niveles de salmuera, en especial en los tres puntos que constituyen los límites en el Núcleo de los tres perfiles SEAWAT, y que son utilizados como puntos de acople entre ambos modelos (PN-14B, PN-05B y SOPM-4). Los descensos simulados en estos tres puntos, son la condición de borde para los modelos SEAWAT, que serán los que finalmente se utilizan para evaluar los descensos en torno a la interfase salina y en el acuífero dulce-salobre, específicamente en la zona de alimentación de las lagunas. La ubicación de estos puntos ya ha sido indicada en este Anexo, sin embargo para efectos de un adecuado entendimiento de los resultados, se replica en la Figura 11-1.

**Figura 11-1 Puntos de acople entre los modelos MODFLOW y SEAWAT**



Fuente: Elaboración propia

En la Zona Marginal y en la dirección de los sistemas lagunares, los puntos en los cuales se evalúa el descenso de niveles en cada uno de los escenarios que se modelan corresponden a:

- **La Punta-La Brava:** PN-14B; OB-PB-06; PN-16B; OB-PB-01; OB-PB-02; OB-PB-03; OB-PB-04; OB-PB-07; OB-PB-05; y TP-2. De estos puntos, sólo PN-14, PN-16B y TP-2 son pozos reales y construidos.

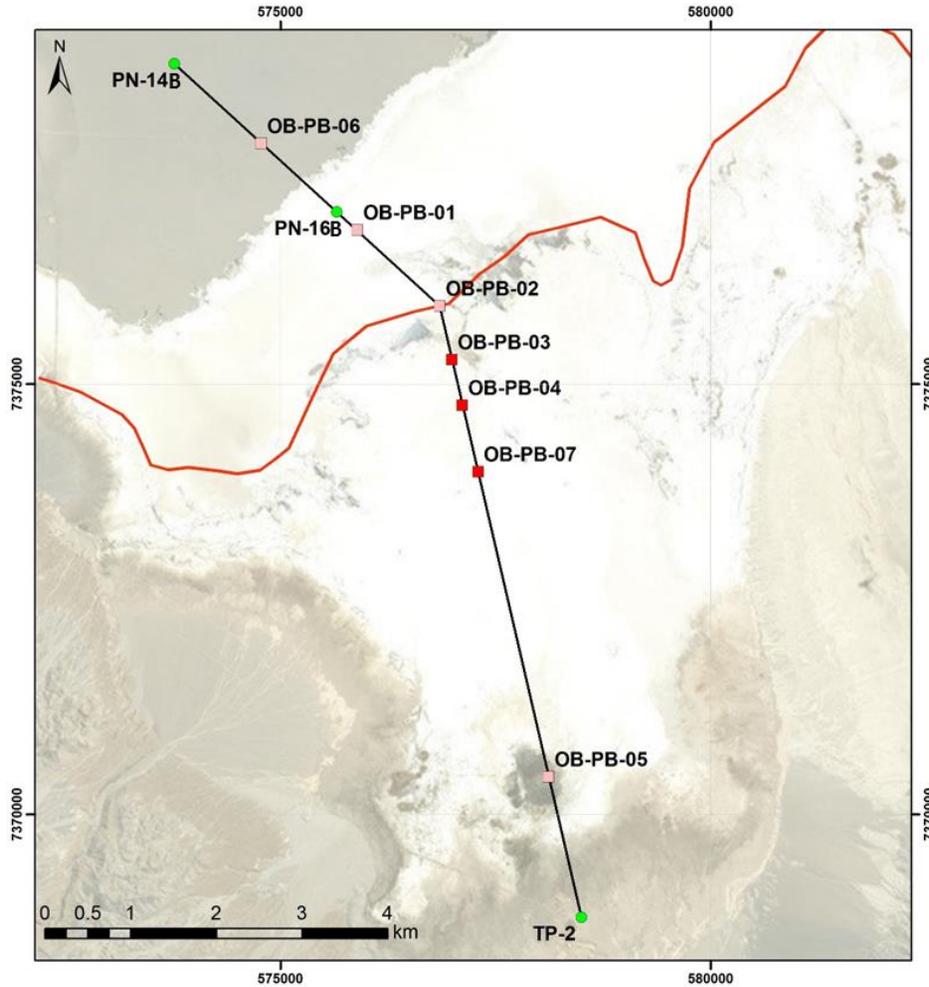
	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

El resto de los puntos corresponden solo a pozos de observación ficticios que se utilizan para evaluar el comportamiento del sistema.

- **Peine:** PN-05B; PN-08A; OB-P-01; OB-P-02; OB-P-07; OB-P-03; OB-P-04; OB-P-05; OB-P-06; Y CUÑA 6. De la misma manera que en el perfil de La Punta-La Brava, solo los pozos PN-05B; PN-08A y CUÑA 6 corresponden a pozos reales, el resto solo se generan para efectos de evaluación y son considerados pozos de observación ficticios.
- **Quelana:** SOPM-4; OBQ-01; L-3-9; OBQ-02; L3-5; L3-3; L3-15; OB-Q-03. De éstos, los pozos L3-9, L3-3, L3-5 y L3-15 son existentes y forman parte del Plan de Contingencia de SQM, mientras que los puntos con código “OB” corresponden a pozos de observación ficticios.

La ubicación de los puntos y/o pozos de evaluación se presentan en la Figura 11-2, Figura 11-3 y en la Figura 11-4. Del conjunto de pozos evaluados, se han escogido como prioritarios o de verificación aquellos de simbología cuadrada de color rojo en las figuras anteriores, ya que, de acuerdo con observaciones de terreno y al análisis de imágenes satelitales de alta resolución, se sitúan en la zona de alimentación de las lagunas en el caso de los perfiles de La Punta La Brava y de Peine, o bien son los pozos de activación del Plan de Contingencia de SQM, en el caso de aquellos situados en el perfil de Quelana.

**Figura 11-2 Puntos de observación en el perfil SEAWAT de La Punta-La Brava**

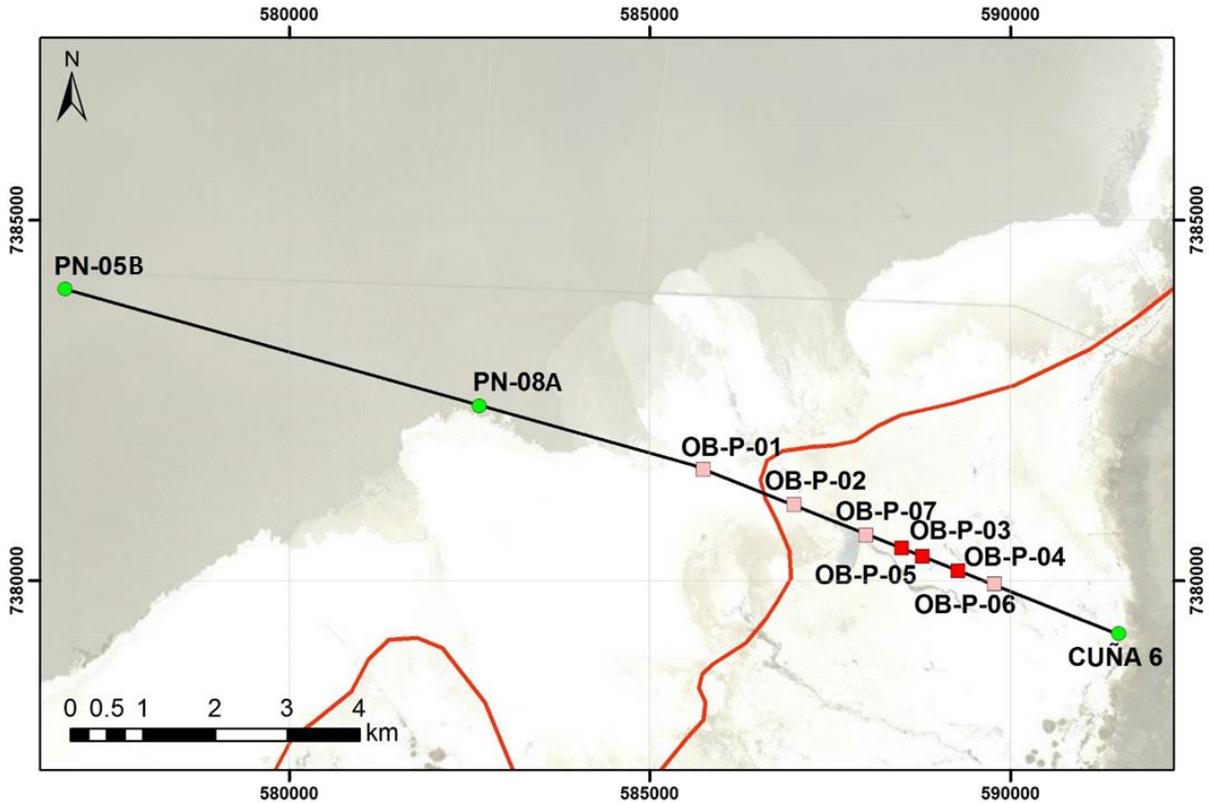


**LEYENDA**

- Puntos de observación prioritarios
- Puntos de observación secundarios
- Pozos existentes
- Perfil SEAWAT
- Interfase salina

Fuente: Elaboración propia

**Figura 11-3 Puntos de observación en el perfil SEAWAT de Peine**

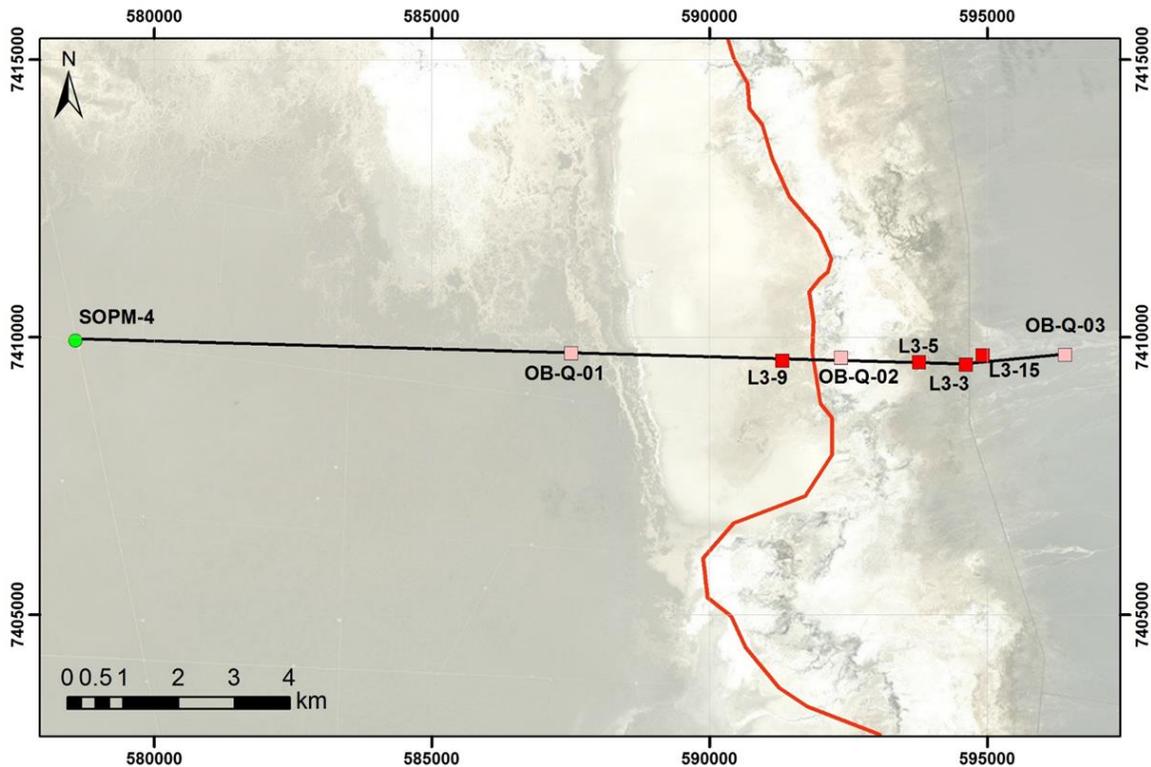


**LEYENDA**

- Puntos de observación prioritarios
- Puntos de observación secundarios
- Pozos existentes
- Perfil SEAWAT
- Interfase salina

Fuente: Elaboración propia

**Figura 11-4 Puntos de observación en el perfil SEAWAT de Quelana**



**LEYENDA**

- Puntos de observación prioritarios
- Puntos de observación secundarios
- Pozos existentes
- Perfil SEAWAT
- Interfase salina

Fuente: Elaboración propia

**11.4 Escenario de Evaluación del Proyecto (Esc1)**

**11.4.1 Descripción de Escenario de Evaluación del Proyecto**

El escenario de evaluación del Proyecto, llamado también Esc1, corresponde al escenario en el cual las condiciones tanto de extracción de salmuera desde el Salar como de agua dulce-salobre desde el acuífero, son las de operación normal y esperable por parte de cada uno de los usuarios. También considera condiciones hidrológicas esperables, estimadas en base a los registros históricos de precipitaciones. Este escenario se ha modelado para evaluar los descensos producidos por el proyecto de Rockwood y abarca el período 01/01/2014 a 31/12/2065, incluyendo los 25 años posteriores a la finalización del proyecto en diciembre 2040.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

Al igual que la calibración transiente, el modelo fue operado con períodos mensuales para representar así los ciclos hidrológicos de precipitaciones. La recarga aplicada al modelo durante el periodo de simulación de 50 años, consistió en replicar el régimen de precipitaciones del período de enero 1989 a diciembre 2014, es decir el de los últimos 26 años, dos veces. La recarga se ha calculado de acuerdo a la metodología indicada en el punto 9.3.3 de este documento y en el Apéndice K Planillas del modelo numérico, se entrega la recarga mensual determinada para cada subcuenca.

Para la simulación en SEAWAT, debido a la manera en la cual se acoplan los modelos numéricos, se requirió simular un período de pre-bombeo durante 115 años antes de iniciar el bombeo señalado (run-up), que proporciona un tiempo para la estabilización del campo de TDS (concentración de sólidos totales, expresada en mg/L) que permite representar la interfase y las condiciones hidráulicas antes del inicio de bombeo a simular. Lo anterior, permite que cualquier cambio posterior se pueda atribuir al bombeo impuesto y a las diferencias entre los escenarios de bombeo simulados.

Para evaluar los descensos atribuibles al Proyecto bajo condiciones esperables en la cuenca (extracción y recarga), que corresponde al Escenario de Evaluación del Proyecto o “**Esc1**”, se simularon 2 casos de bombeo: Esc1-CB- **Caso Base** y el escenario Esc1-CP - **Con Proyecto**.

- **Esc1-CB:** Este escenario considera que Rockwood mantiene su condición actual de bombeo y que SQM lo hace según su aprobación ambiental. En la Tabla 11-1 se resumen los caudales actuales y aprobados, los cuales se describen en detalle en Capítulo 5 (Explotación de la cuenca) y que son considerados para la simulación del Caso Base.

**Tabla 11-1 Bombeos salmuera y agua salobre Caso Base (Esc1-CB)**

Origen Bombeo	Caudal (L/s)	Descripción
Rockwood salmuera	142	Caudal actualmente aprobado, desde los pozos de bombeo.
Rockwood agua salobre	10,9	Bombeo actual desde pozos Tucúcaro y Tilopozo.
SQM salmuera	1.700	Bombeo según RCA0226/2006 el año 2030
SQM agua dulce	226,8	Pozos Allana, Camar 2, Mullay 1, P2 y Socaire, según caudal medio histórico (enero 2009-junio 2014) informado por SQM en reportes del PSAH

Fuente: Elaboración propia

- **Esc1-CP:** considera que: (1) Rockwood aumenta en 300 L/s su explotación de salmuera, según un programa de aumento de explotación, detallado más adelante; (2) Rockwood aumenta su extracción de agua salobre desde los pozos de Tucúcaro y Tilopozo en 6 L/s respecto a lo actualmente aprobado; y (3) SQM explota salmuera y agua dulce de acuerdo a lo aprobado ambientalmente (RCA N°0226/2006), de la misma manera que en el Caso Base. El resumen de los bombeos se incluye en la Tabla 11-2.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

**Tabla 11-2 Bombeos salmuera y agua salobre Caso Con Proyecto (Esc1-CP)**

Origen Bombeo	Caudal (L/s)	Descripción
Rockwood salmuera	442	Desde los pozos de bombeo actual (142 L/s) más 300 L/s distribuidos de manera uniforme en zona de extracción A1 de Rockwood (ver Figura 11-1) y evitando cercanía a pozos existentes de bombeo.
Rockwood agua salobre	16,9	Bombeo desde pozos Tucúcaro, Tilopozo, considerando un aumento de 6 L/s respecto de bombeo actual.
SQM salmuera	1.700	Bombeo según RCA N°0226/2006 el año 2030 (igual al Caso Base).
SQM agua dulce	226,8	Pozos Allana, Camar 2, Mullay 1, P2 y Socaire, según caudal medio histórico (enero 2009-junio 2014) informado por SQM en reportes del PSAH (igual al Caso base)

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 11-5 se muestra la ubicación de los pozos de bombeo en el Esc1- CP en el modelo MODFLOW, incluyendo los de la explotación adicional de 300 L/s de Rockwood en la zona A1 y los de SQM.

En lo que se refiere a la distribución de los pozos de SQM para los distintos escenarios de simulación, si bien ésta no es información de acceso público, considera las actuales áreas ambientalmente autorizadas MOP y SOP, las cuales abarcan una extensión mayor hacia el Oeste del Núcleo respecto de las antiguas autorizadas. Esta distribución, tuvo en cuenta el compromiso adquirido en la RCA N° 0226/2006, de ubicar sus extracciones considerando que su *“regla operacional asegura que las tasas promedio anuales de bombeo no produzcan daño ambiental”*. Esto se relaciona, de acuerdo a lo señalado en sus estudios (Dictuc 2004b), con el hecho de que el traslado de los puntos de bombeo hacia el oeste produce una disminución de los descensos en el Núcleo hacia las lagunas, para evitar la activación de su Plan de Contingencia.



	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

De acuerdo con lo anterior, los caudales de bombeo para ambas simulaciones se resumen en la Tabla 11-3:

**Tabla 11-3 Caudal de bombeo en escenario (Esc1) de evaluación del Proyecto (L/s)**

Bombeo	Caso base	Con Proyecto
Rockwood Salmuera	142,0	442,0
Rockwood Agua Salobre	10,9	16,9
SQM Salmuera	1700,0	
SQM Agua Salobre	226,8	

Fuente: Elaboración propia

La recarga aplicada en el modelo considera las extracciones de agua que se producen fuera del área del modelo a través del balance hídrico. Esto en base a los volúmenes reportados en caso de las extracciones de uso minero de MEL y CMZ, o bien teniendo en cuenta los coeficientes de uso correspondientes para el resto de los usos, según se expone en el punto 5.1.3. En el caso de las extracciones de MEL y CMZ, se utilizaron los volúmenes estimados por estas compañías en el acuífero Monturaqui-Negrillar-Tilopozo (MEL, 2015) para los años 2015 y 2016, y para los años posteriores se mantuvo este mismo valor hasta mayo de 2020, fecha en que se estimó el fin de las extracciones por alcanzar una volumen acumulado que equivale a una reducción de flujo pasante del 6%. Esto según lo indica el PAT de esta compañía (MEL, 2001).

#### 11.4.2 Resultados del Escenario de Evaluación del Proyecto

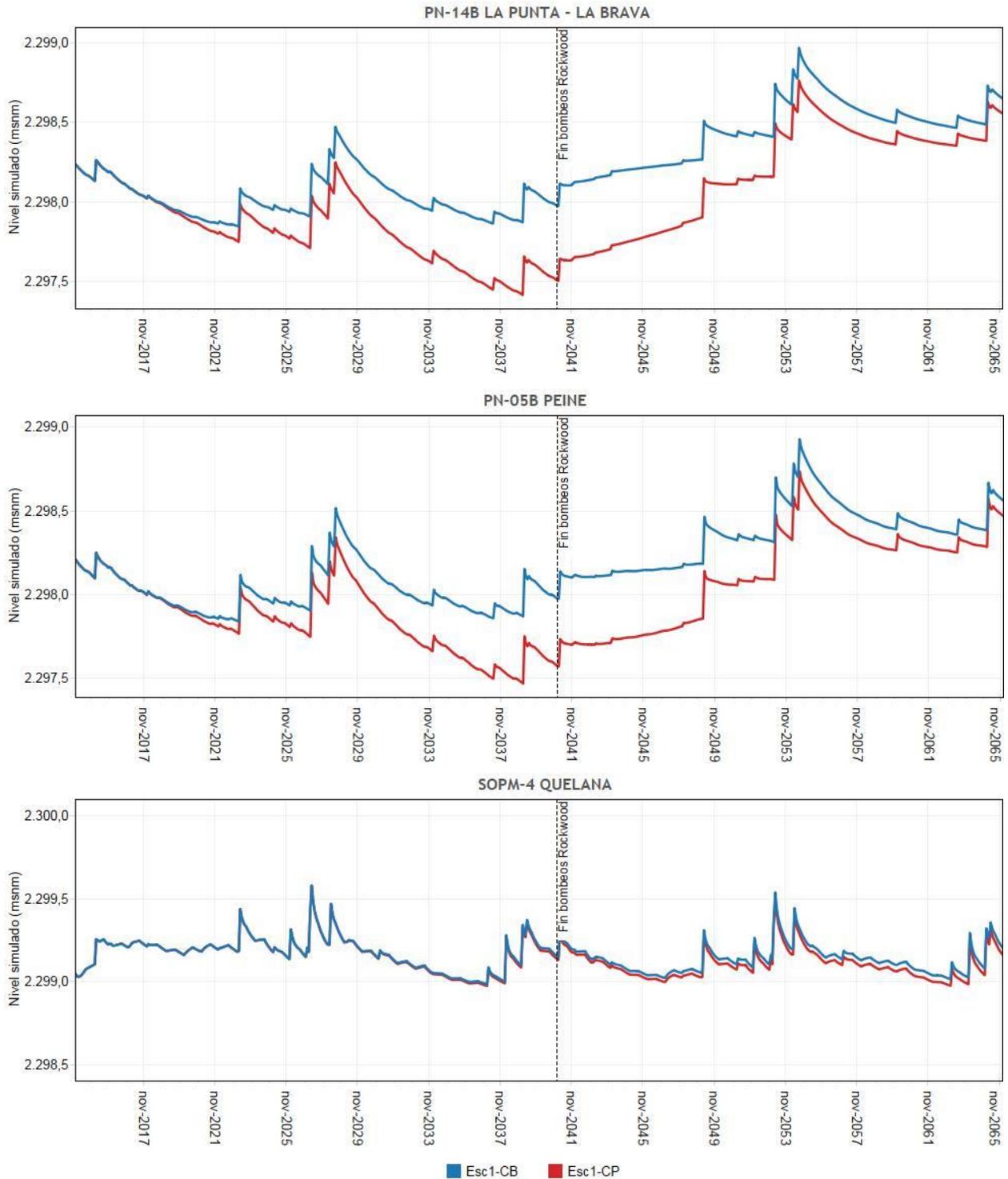
El resultado de los niveles simulados en los modelos MODFLOW y SEAWAT para el Esc1 se presentan en el Apéndice K-1 Planillas Digitales de los Modelos MODFLOW y SEAWAT, para todo el período de simulación.

##### 11.4.2.1 Resultados MODFLOW

###### 11.4.2.1.1 Niveles

Los resultados de las simulaciones realizadas con el modelo MODFLOW tienen como objetivo evaluar el efecto del aumento del bombeo de Rockwood en los niveles de salmuera. En la Figura 11-6 se presentan los resultados de niveles simulados en estos tres puntos del Núcleo para el Caso base o Esc1-CB (explotación actual) y Con Proyecto o Esc1-CP (aumento bombeo de salmuera en 300 L/s).

**Figura 11-6 Evolución de niveles simulados en puntos de control SEAWAT Esc1-CB y Esc1-CP**



Fuente: Elaboración propia

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

En la Tabla 11-4 se presentan los descensos máximos producidos, para en el caso Con Proyecto (Esc1-CP), y para la misma fecha en el Caso Base (Esc1-CB), desde el inicio de la simulación (enero 2014). Además, se muestra el descenso adicional del Proyecto que se determina como la diferencia entre el nivel más bajo simulado y el correspondiente a diciembre 2013. En los sectores de La Punta - La Brava (PN-14B) y Peine (PN-05B) el nivel mínimo se predice en el año 2039 y en el sector de Quelana (SOPM-4) en el año 2037.

**Tabla 11-4 Descenso máximo en puntos de control para modelo SEAWAT**

Escenario	PN-05B	PN-14B	SOPM-4
Esc1-CB (m)	0,34	0,37	0,05
Esc1-CP (m)	0,74	0,82	0,06
Fecha de máximo descenso en caso con Proyecto	enero-39	enero-39	enero-37
Descenso adicional (Esc1-CP) – (Esc1-CB)	0,40	0,46	0,01

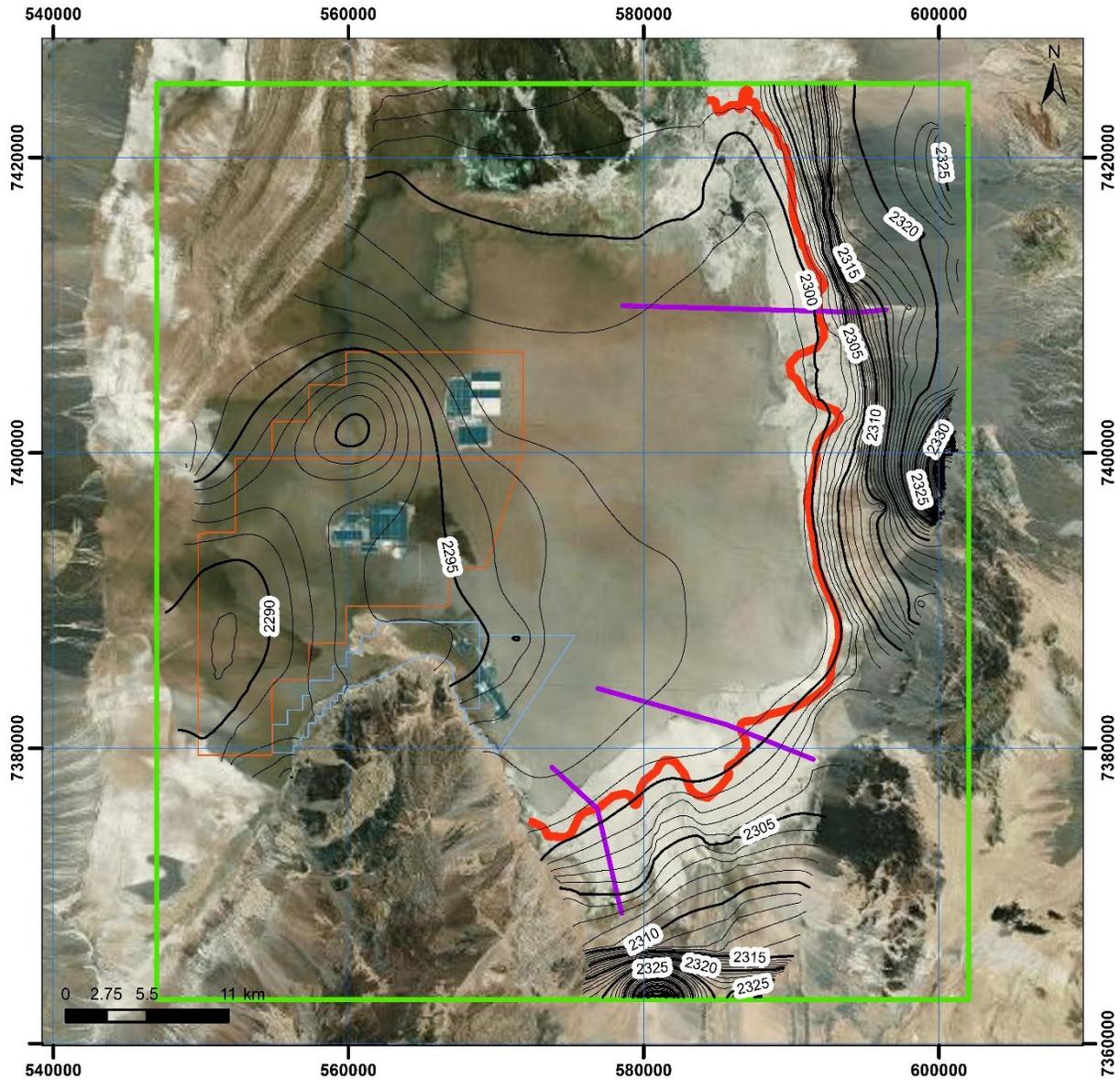
Fuente: Elaboración propia

En los gráficos de evolución de niveles de la Figura 11-6, se observa que el efecto por aumento del bombeo de Rockwood en 300 L/s en la salmuera, produce un descenso adicional del orden de centímetros en los niveles de los puntos señalados. De acuerdo con la tabla anterior, este descenso adicional es de 0,46 m en PN-14B (La Punta-La Brava) y de 0,40 m en PN-05B (Peine). Cabe destacar que estos descensos son las condiciones de borde para la modelación con SEAWAT y cuyos resultados se presentan para este escenario en el punto 11.4.2.2. En el sector de Quelana, el efecto en el Núcleo es marginal, obteniéndose un descenso adicional máximo de tan sólo 0,01 m.

Con estos resultados de MODFLOW es posible generar las curvas isofreáticas en el Núcleo para ambos casos simulados (Caso Base y Con Proyecto), que se entregan para los años 5, 10 y 25 en la Figura 11-7, Figura 11-8, Figura 11-9, Figura 11-10, Figura 11-11 y Figura 11-12. Estas figuras muestran que el efecto del bombeo de Rockwood en el Salar es más importante en la zona de explotación de salmuera, que está situada en el sector suroeste.

A partir las figuras anteriores se generan los mapas de isodescenso adicional entre el Caso Base y Con Proyecto mostrados en la Figura 11-13, Figura 11-14 y Figura 11-15. Observando estos mapas se aprecia un efecto adicional en la zona misma de bombeo de hasta 12 m. Sin embargo, ésta influencia se amortigua hacia el sureste, siendo mínima en las proximidades de la interfase salina, cercana a los sectores lacustres de La Punta-La Brava y de Peine.

**Figura 11-7 Mapa de isofreáticas Esc1-CB: Año 5**

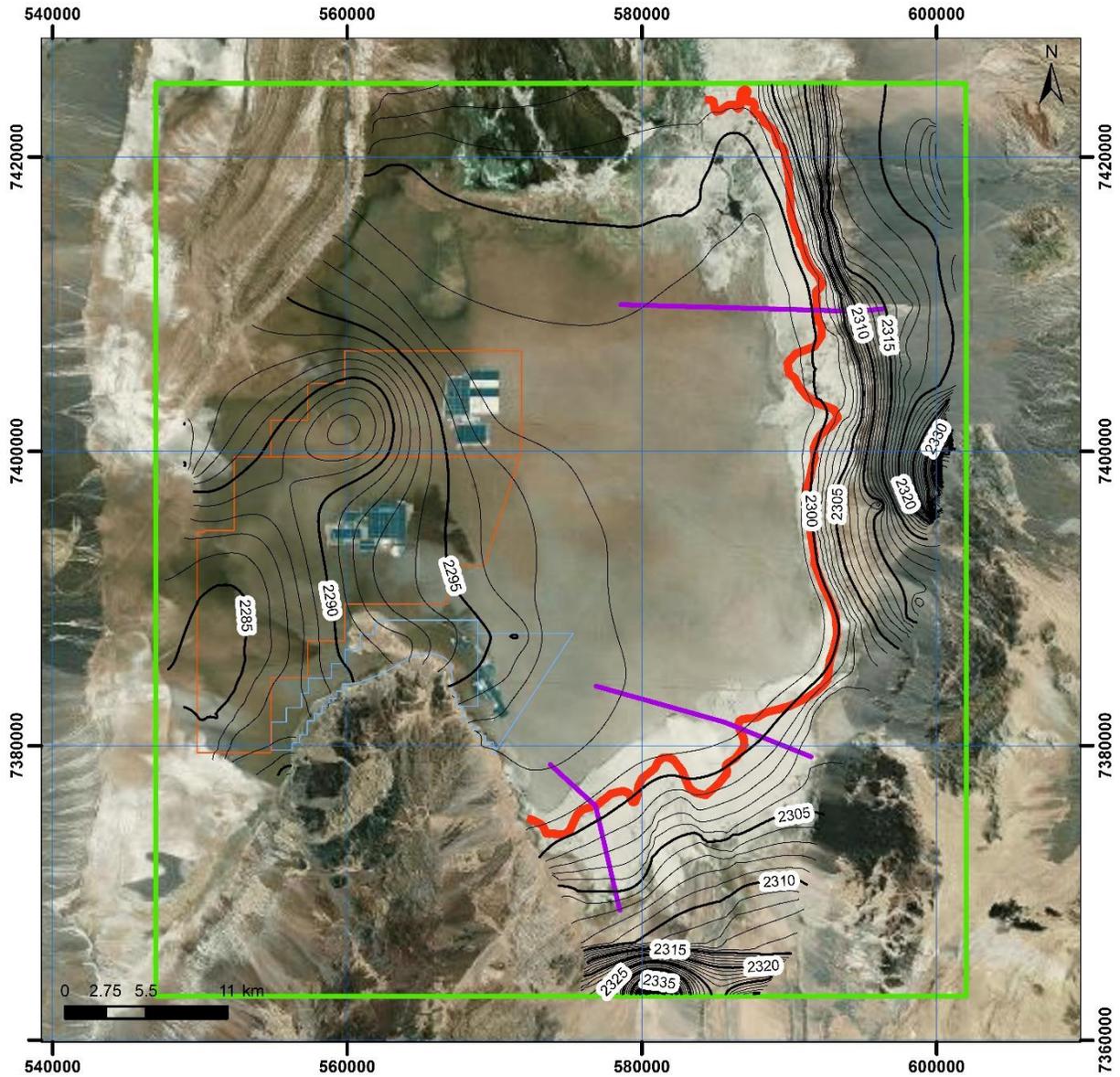


**Legenda**

- Isopieza cada 5 m.
- Isopieza cada 1 m.
- Perfiles SEAWAT
- Interfase Salina
- ▭ Dominio Modelo MODFLOW
- ▭ Áreas Extracción SQM
- ▭ Áreas Extracción Rocwood

Fuente: Elaboración propia

**Figura 11-8 Mapa de isofreáticas Esc1-CB: Año 10**

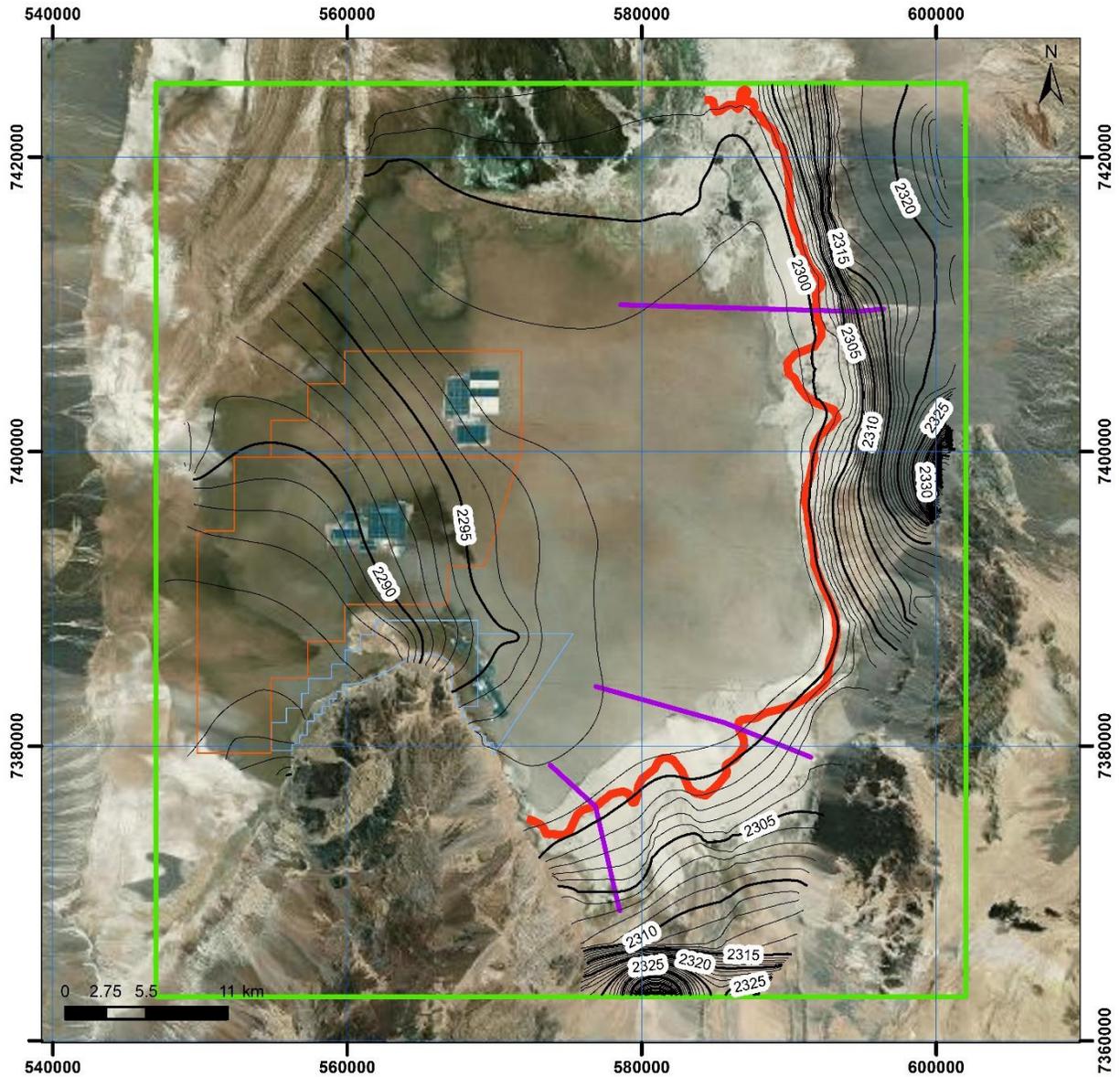


**Leyenda**

- Isopieza cada 5 m.
- Isopieza cada 1 m.
- Perfiles SEAWAT
- Interfase Salina
- Dominio Modelo MODFLOW
- Áreas Extracción SQM
- Áreas Extracción Rocwood

Fuente: Elaboración propia

**Figura 11-9 Mapa de isofreáticas Esc1-CB: Año 25**

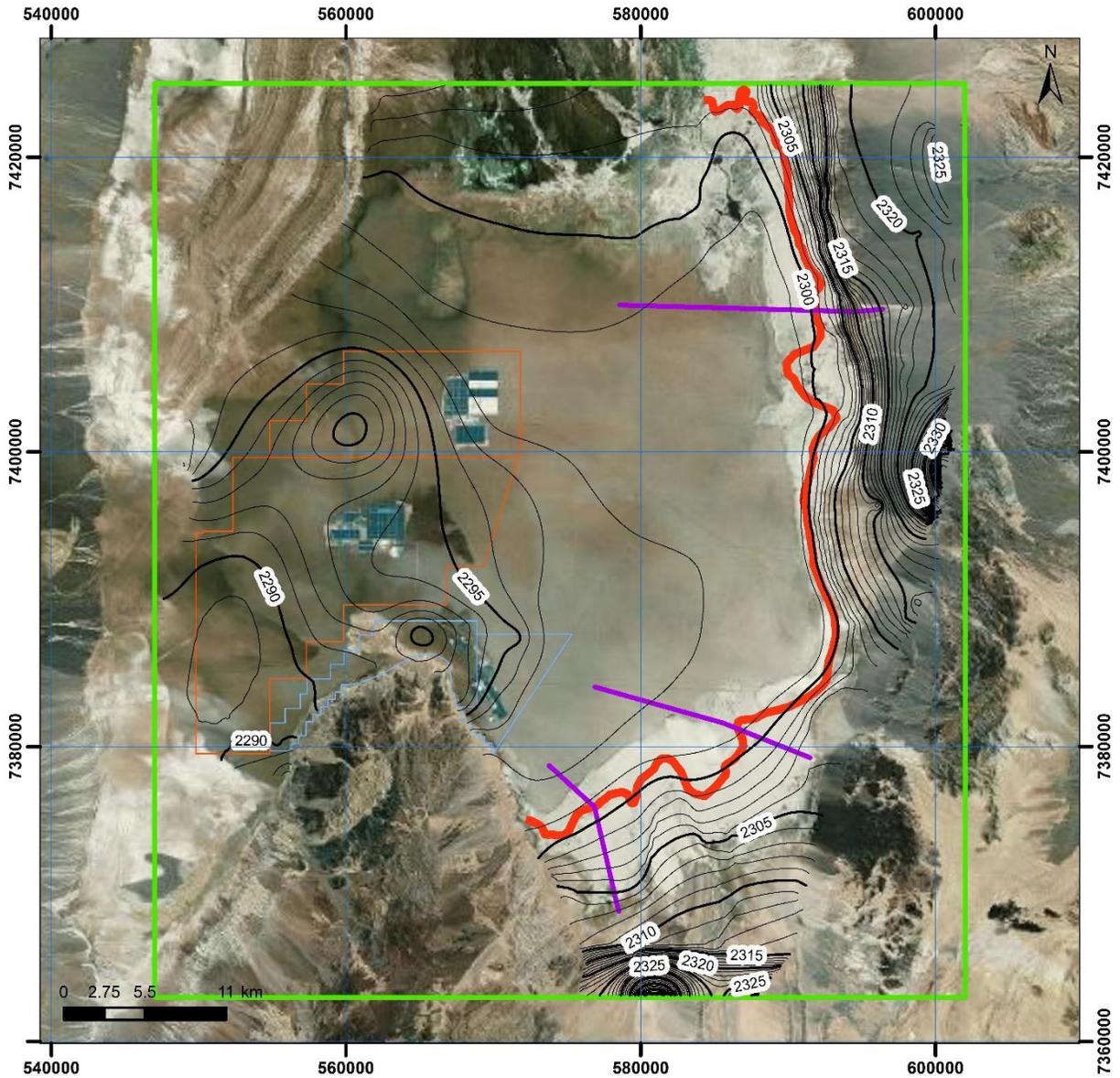


**Leyenda**

- Isopieza cada 5 m.
- Isopieza cada 1 m.
- Perfiles SEAWAT
- Interfase Salina
- ▭ Dominio Modelo MODFLOW
- ▭ Áreas Extracción SQM
- ▭ Áreas Extracción Rocwood

Fuente: Elaboración propia

**Figura 11-10 Mapa de isofreáticas Esc1-CP: Año 5**

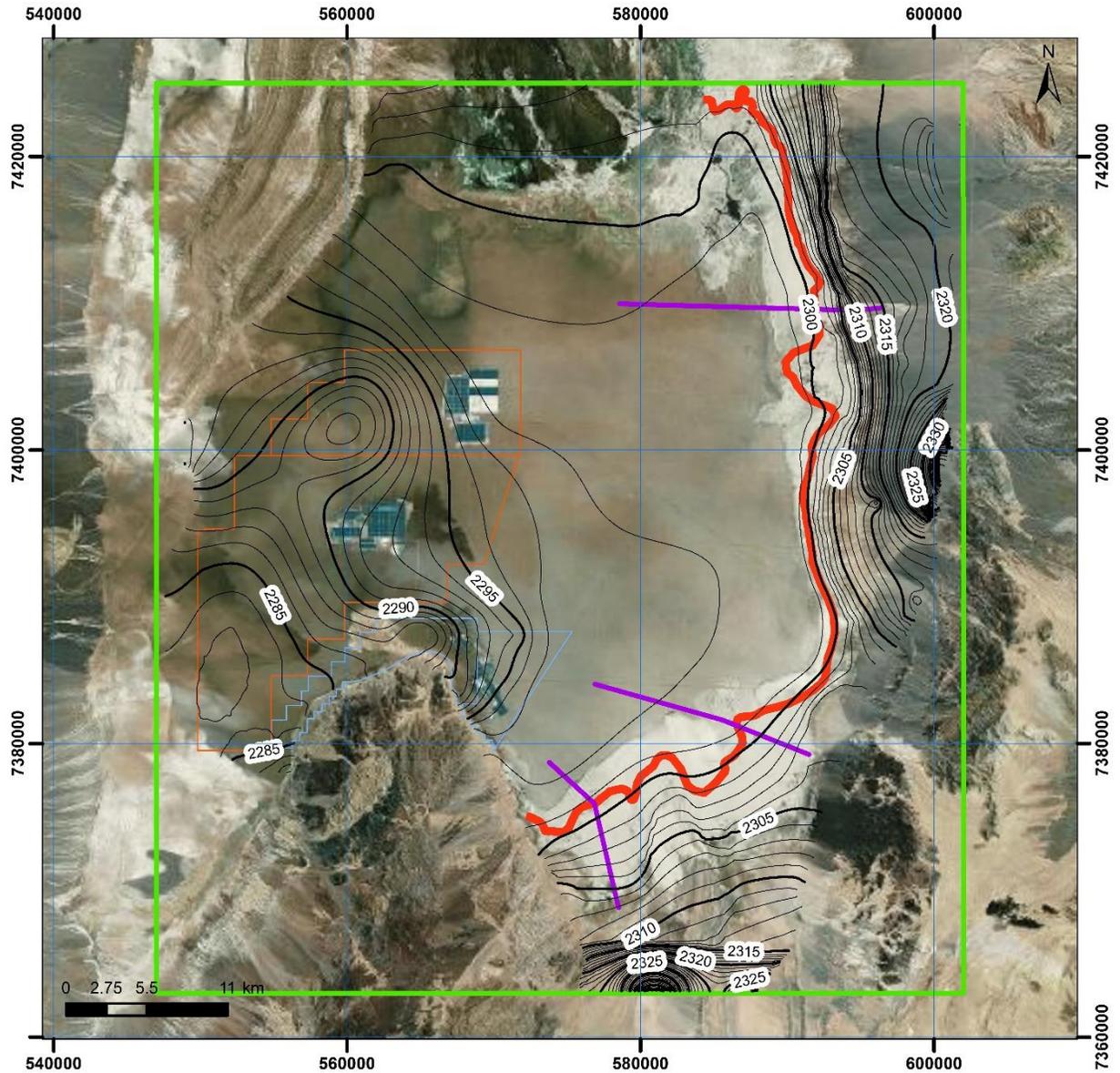


**Leyenda**

- Isopieza cada 5 m.
- Isopieza cada 1 m.
- Perfiles SEAWAT
- Interfase Salina
- Dominio Modelo MODFLOW
- Áreas Extracción SQM
- Áreas Extracción Rocwood

Fuente: Elaboración propia

**Figura 11-11 Mapa de isofreáticas Esc1-CP: Año10**

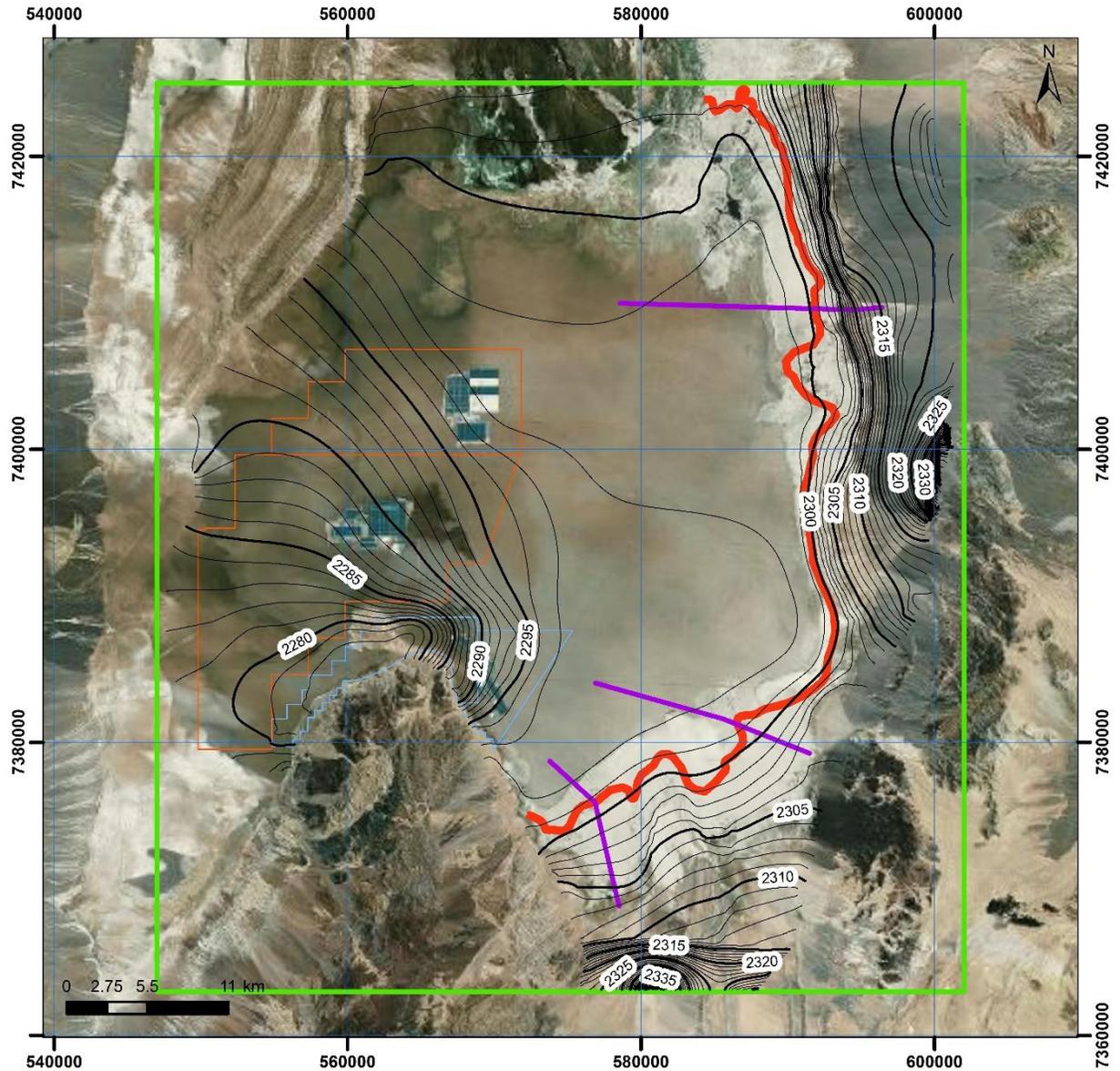


**Legenda**

- Isopieza cada 5 m.
- Isopieza cada 1 m.
- Perfiles SEAWAT
- Interfase Salina
- ▭ Dominio Modelo MODFLOW
- ▭ Áreas Extracción SQM
- ▭ Áreas Extracción Rocwood

Fuente: Elaboración propia

**Figura 11-12 Mapa de isofreáticas Esc1-CP: Año25**

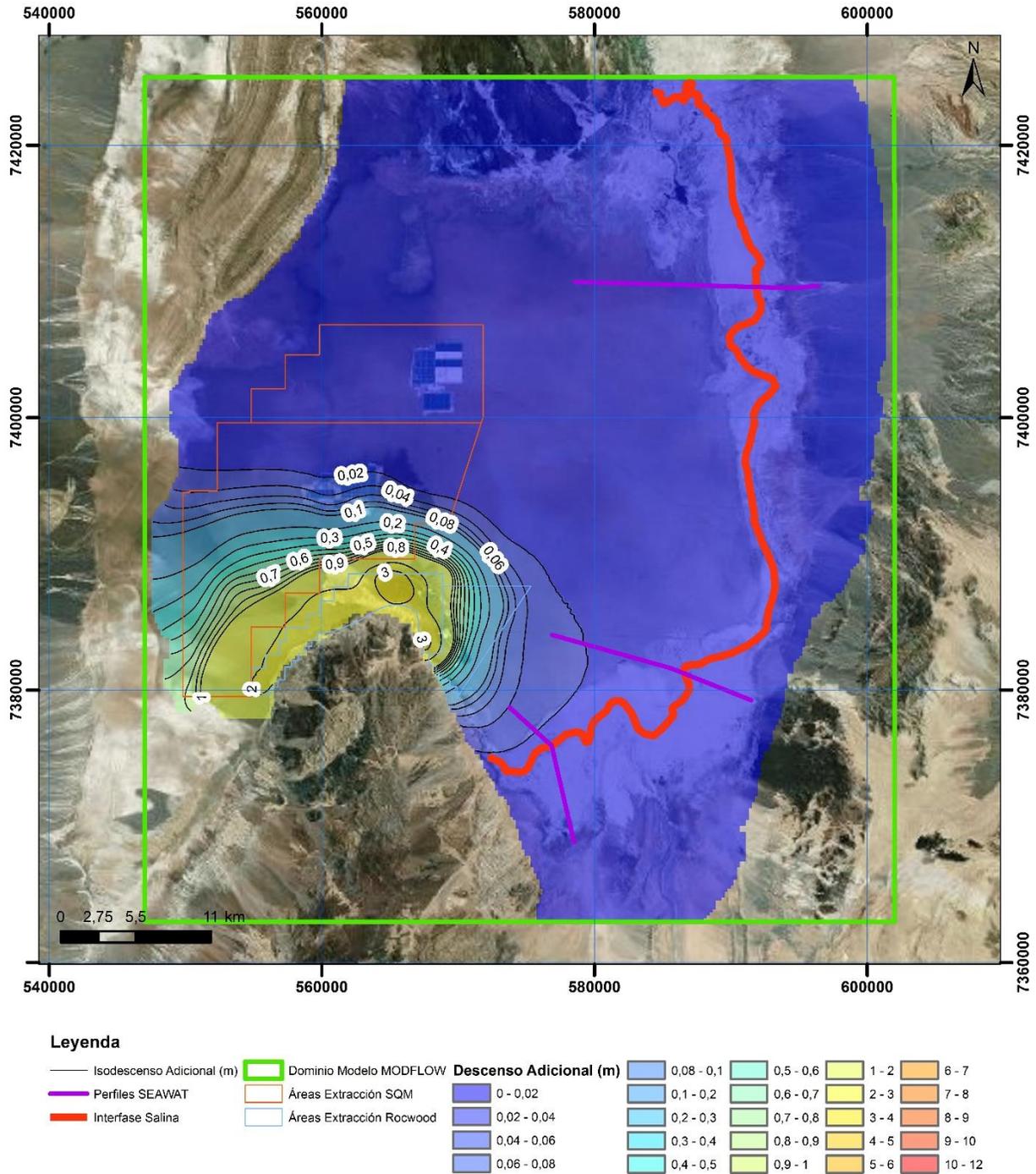


**Leyenda**

- Isopieza cada 5 m.
- Isopieza cada 1 m.
- Perfiles SEAWAT
- Interfase Salina
- Dominio Modelo MODFLOW
- Áreas Extracción SQM
- Áreas Extracción Rocwood

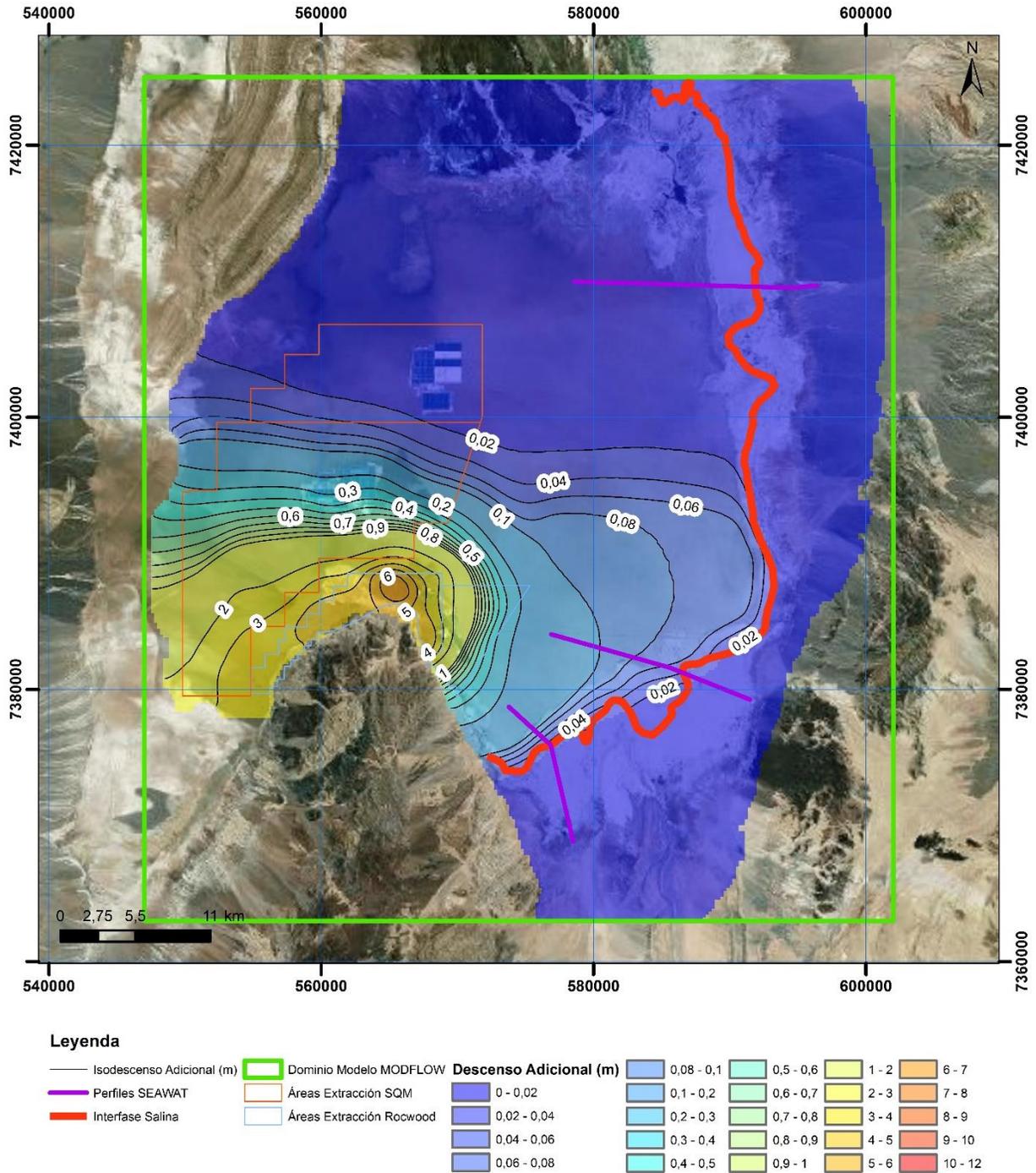
Fuente: Elaboración propia

**Figura 11-13 Descenso adicional año 5 (Esc1CP- Esc1CB)**



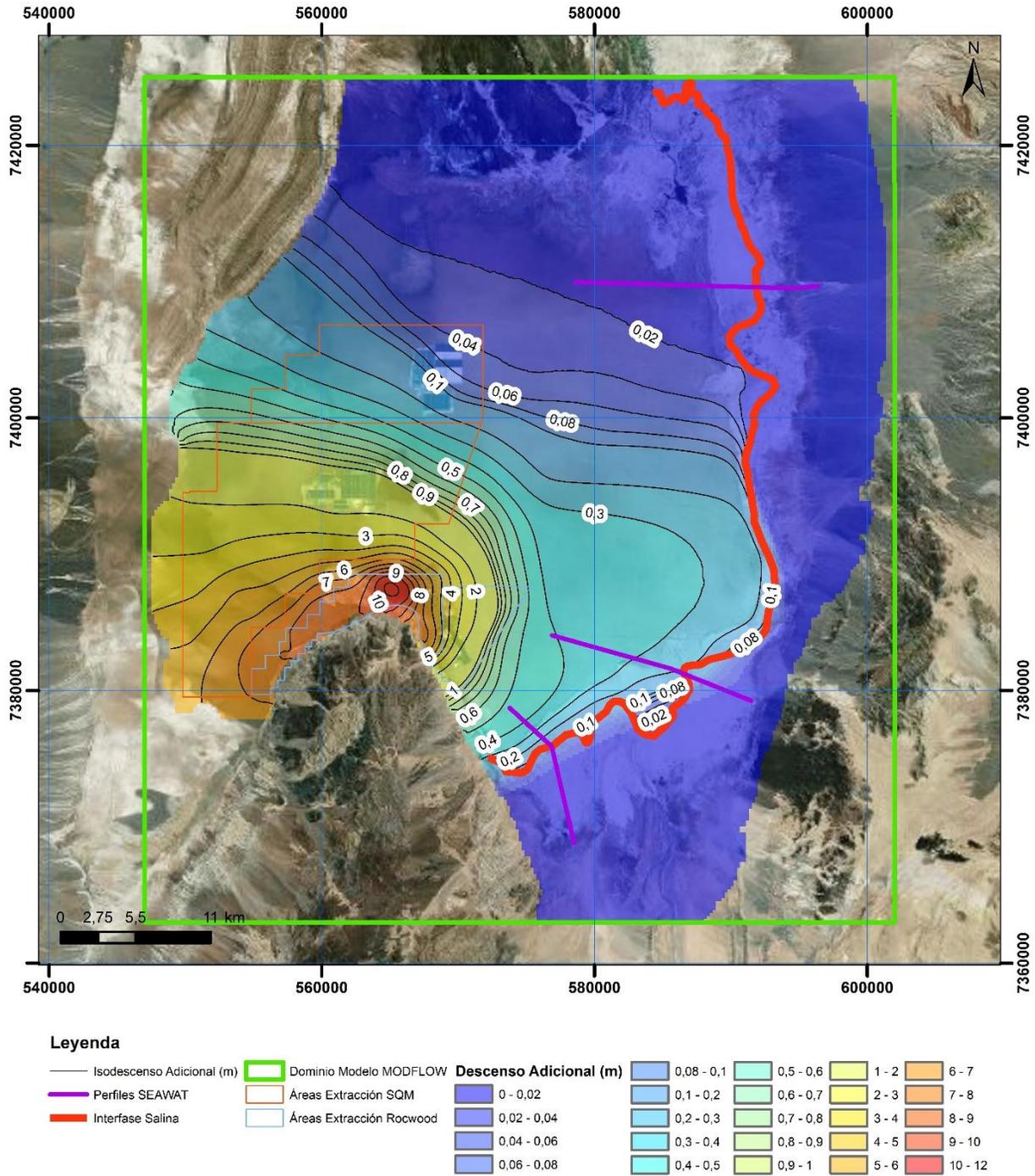
Fuente: Elaboración propia

**Figura 11-14 Descenso adicional año 10 (Esc1CP- Esc1CB)**



Fuente: Elaboración propia

**Figura 11-15 Descenso adicional año 25 (Esc1CP- Esc1CB)**



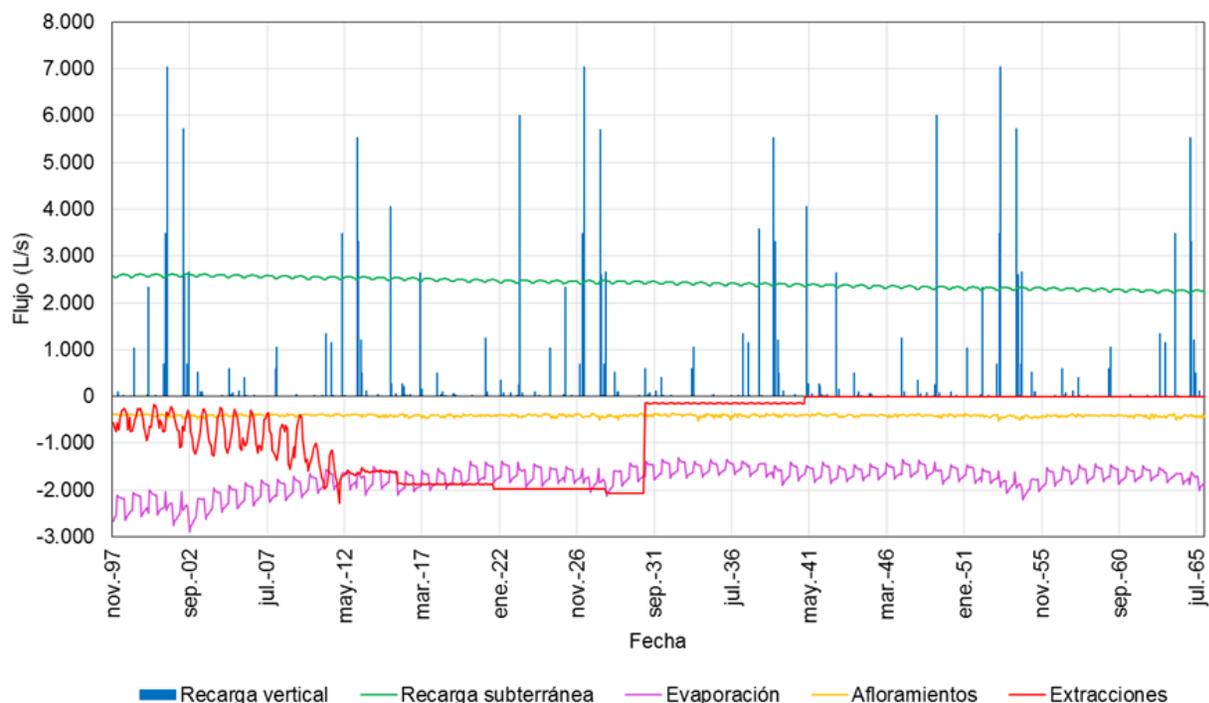
Fuente: Elaboración propia

### 11.4.2.1.2 Flujos

Con el fin de comprobar la consistencia de los flujos de entrada y salida del modelo de las principales componentes hídricas del sistema, y siguiendo las recomendaciones de la Guía para el uso de Modelos de aguas subterráneas en el SEIA (SEA, 2012), se confeccionaron gráficos con los flujos de recarga por precipitación (recarga directa), flujo subterráneo (pozos de inyección), evapotranspiración y evaporación de la napa (evaporación), afloramientos que alimentan los sistemas lagunares (drenes) y extracciones (pozos de bombeo).

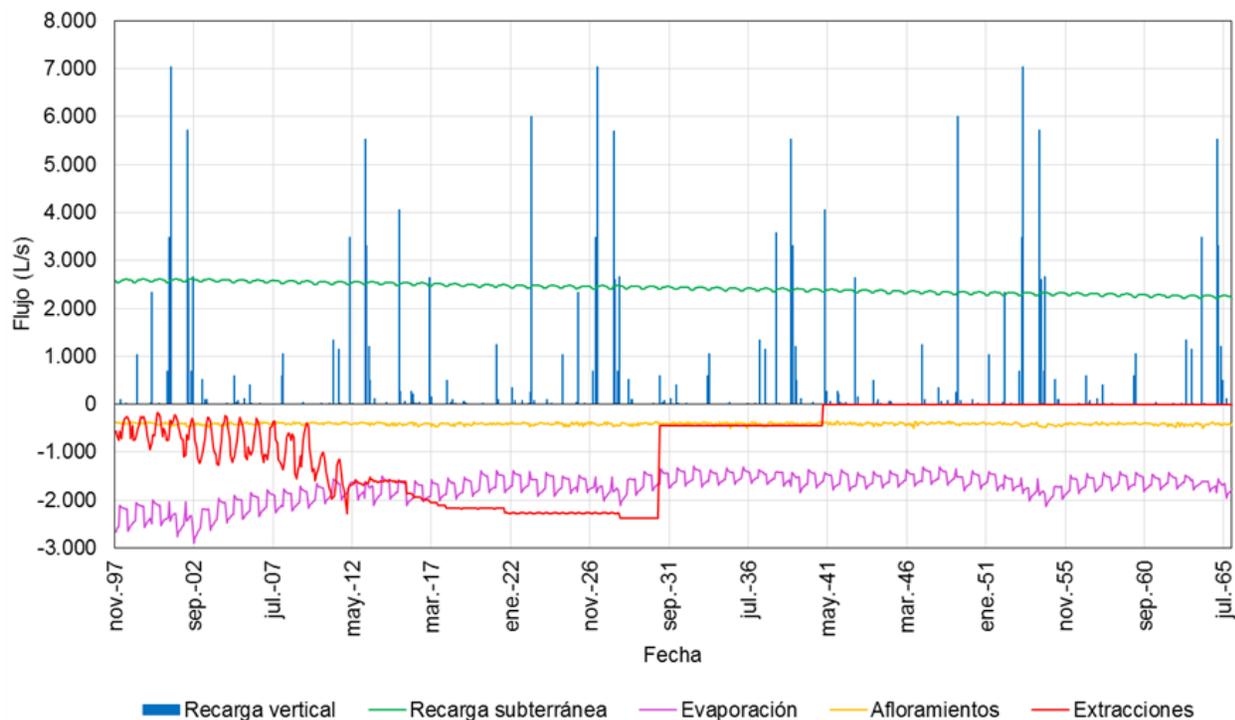
Los flujos anteriores se muestran en la Figura 11-16 y Figura 11-17 para los escenarios Caso Base (Esc1-CB) y Con Proyecto (Esc1-CP) respectivamente, y permiten verificar que las condiciones de borde de entrada simuladas en ambos escenarios son iguales, mientras que las de salida no lo son, ya que el caso Con Proyecto considera una extracción adicional de 300 L/s, lo que influye además en los flujos de evaporación del Núcleo. Cabe señalar que los flujos de entrada al sistema se consideran positivos mientras que los de salida son negativos. En estos gráficos se presentan los flujos desde el año 1997 en adelante, de manera de mostrar cual era la situación de dichos flujos en la condición de borde respectiva, para el período de calibración-validación.

**Figura 11-16 Flujos de entrada y salida Esc1-CB**



Fuente: Elaboración propia

**Figura 11-17 Flujos de entrada y salida Esc1-CP**



Fuente: Elaboración propia

De la Figura 11-16 y Figura 11-17, se observa que la recarga subterránea disminuye en el tiempo, siguiendo la tendencia presentada en el período de calibración transiente. La serie de precipitaciones implementada fue la misma en ambos casos por lo que no se observan diferencias en ésta.

Con respecto a las salidas de flujo, se observa una mayor extracción en el caso Con Proyecto (lectura debe hacerse al revés, aumenta hacia abajo), que corresponde a los 300 L/s de Rockwood. Para facilitar la comparación de las salidas por evaporación y afloramientos, en la Tabla 11-5 se incluyen los promedios de estos flujos para el período de simulación desde enero 2014 a diciembre 2065 y la diferencia entre ambos casos de simulación.

**Tabla 11-5 Flujos de salida promedio (2014-2065) en escenario de evaluación del proyecto (Esc1)**

Caso de simulación (Esc1)	Evaporación (L/s)	Afloramientos (L/s)
Caso Base	1.775,0	410,5
Con Proyecto	1.748,4	409,2
Diferencia entre casos	-26,6	-1,3

Fuente: Elaboración propia

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

Se observa que la evaporación tiene una disminución de 26,6 L/s, lo que corresponde al 1,5% de flujo, mientras que los afloramientos, al estar más alejados de la zona de las extracciones de Rockwood, disminuyen sólo 1,3 L/s, lo que corresponde al 0,3% de este flujo.

#### 11.4.2.2 Resultados SEAWAT

Los tres perfiles SEAWAT calibrados, son ejecutados para el período de predicción con el fin de evaluar los posibles cambios debido a las tasas actuales de bombeo (Caso Base) y bombeo aumentado por Rockwood (Con Proyecto). Estos casos fueron simulados considerando como condición de borde los valores de altura especificados para los extremos de los Perfiles SEAWAT del Núcleo, de acuerdo con niveles simulados por MODFLOW para el período predictivo o proyecciones de niveles observados, tal como se mostraron en la Figura 10-51, Figura 10-52 y Figura 10-53.

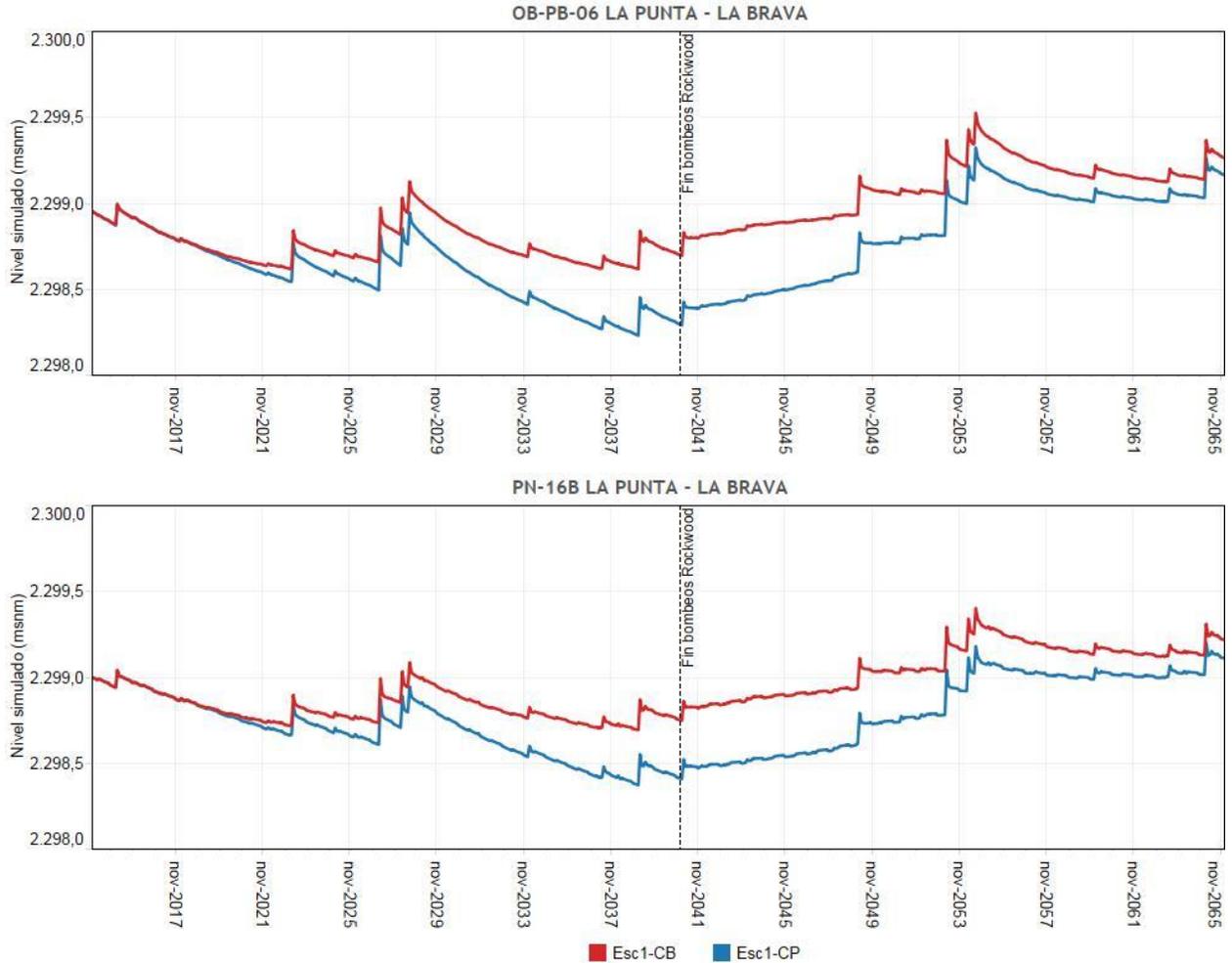
Como se explicó en el punto 10.3.1, la salida desde el final del período de calibración proporciona las condiciones iniciales (niveles y TDS: total de sólidos disueltos, en mg/L) para el período de predicción.

La evolución de niveles y distribución de TDS del caso Con Proyecto fueron evaluados en comparación con los del Caso Base, con el objetivo de identificar si se producen efectos en la zona donde se sitúan las surgencias que alimentan los sistemas lagunares.

- **Evaluación de resultados – Variación de niveles**

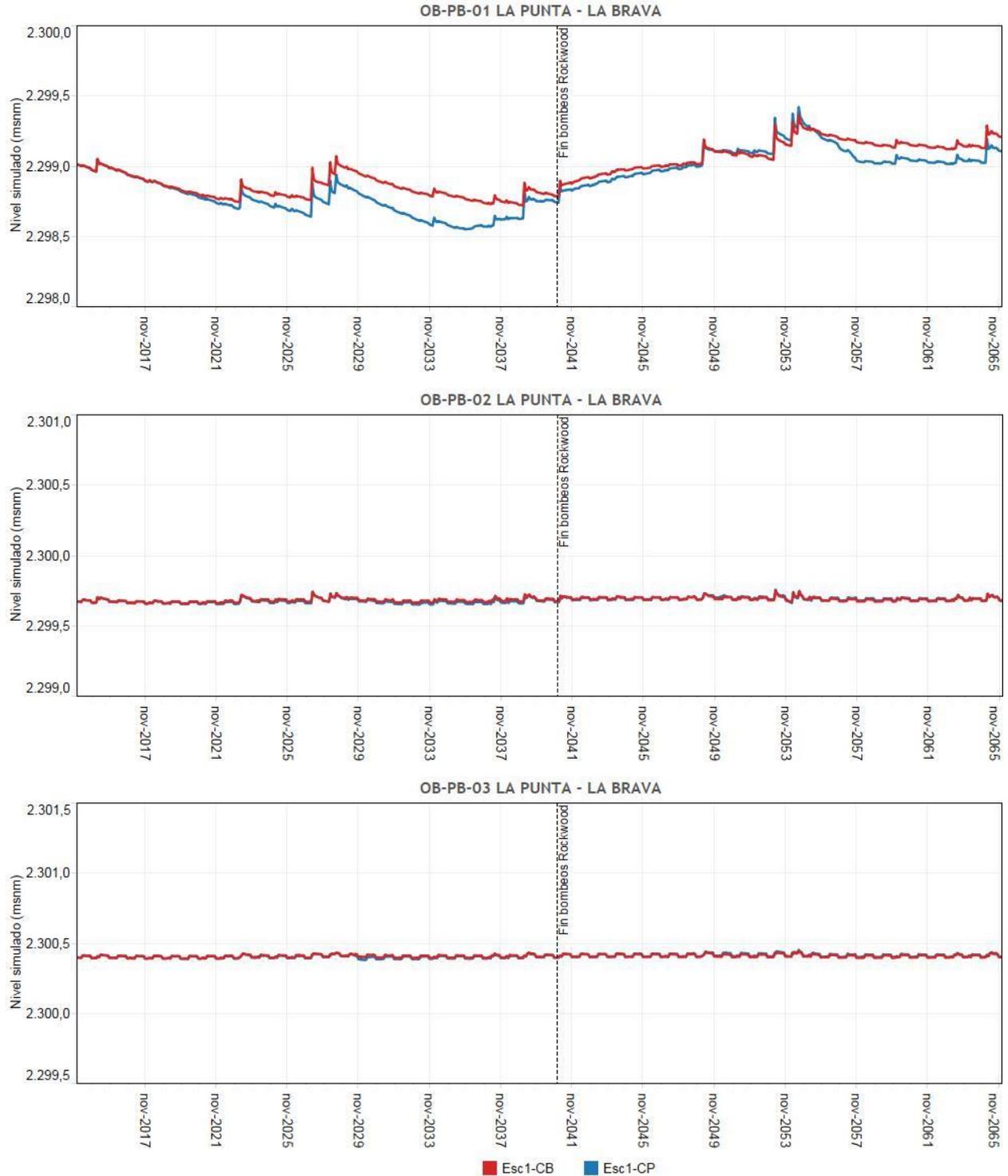
Esta evaluación de los niveles de agua se realizó en los pozos de observación ubicados a lo largo de cada Perfil SEAWAT, según se muestran en la Figura 11-2, Figura 11-3 y Figura 11-4. Los resultados gráficos de evolución de niveles simulados para estos puntos de observación se muestran en la Figura 11-18, Figura 11-19 y Figura 11-20.

**Figura 11-18 Nivel simulado en puntos de observación del perfil La Punta – La Brava, Esc1-CB y Esc1-CP**



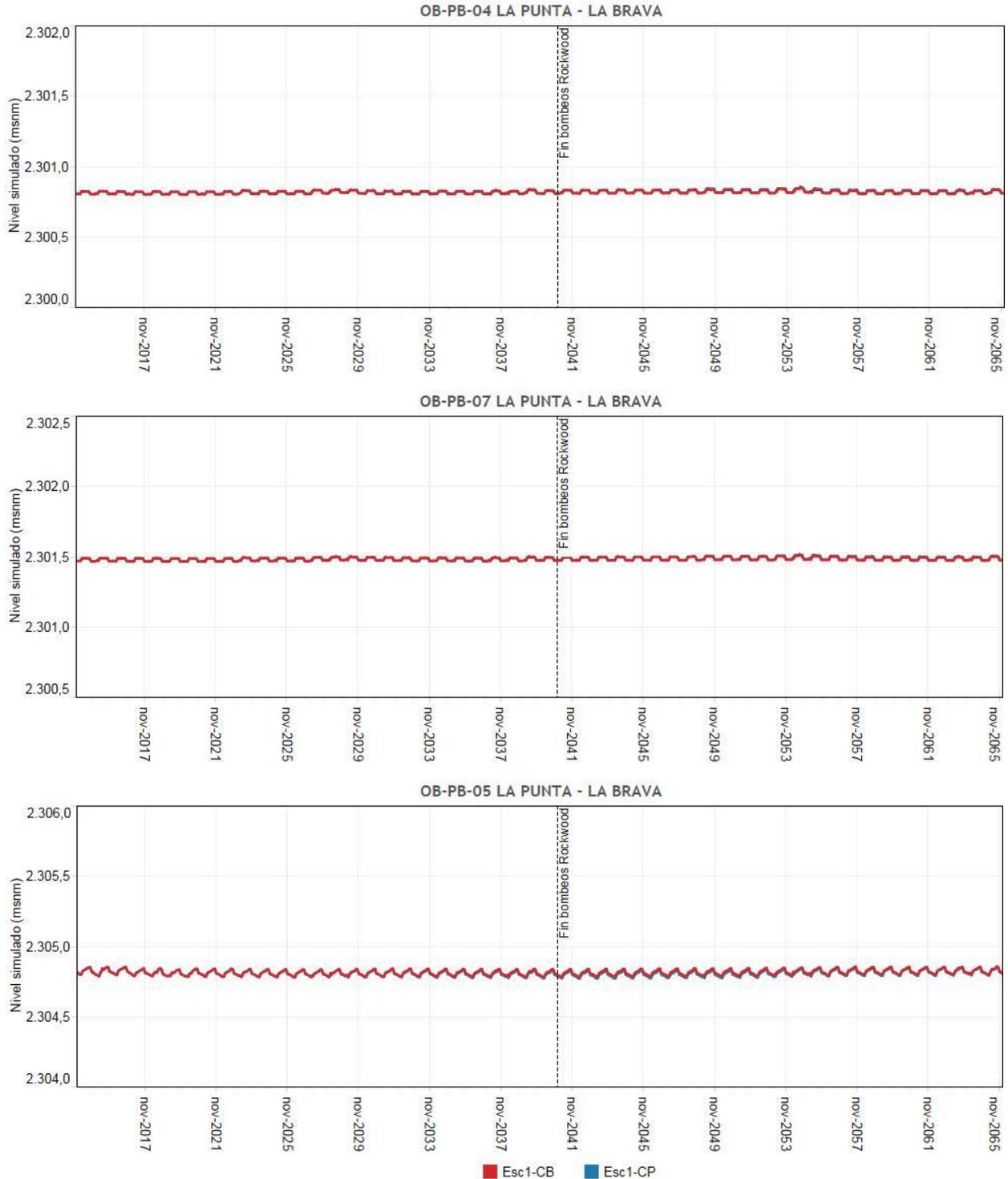
Fuente: Elaboración propia

**Figura 11-18 Nivel simulado en puntos de observación del perfil La Punta – La Brava, Esc1-CB y Esc1-CP (Cont.)**



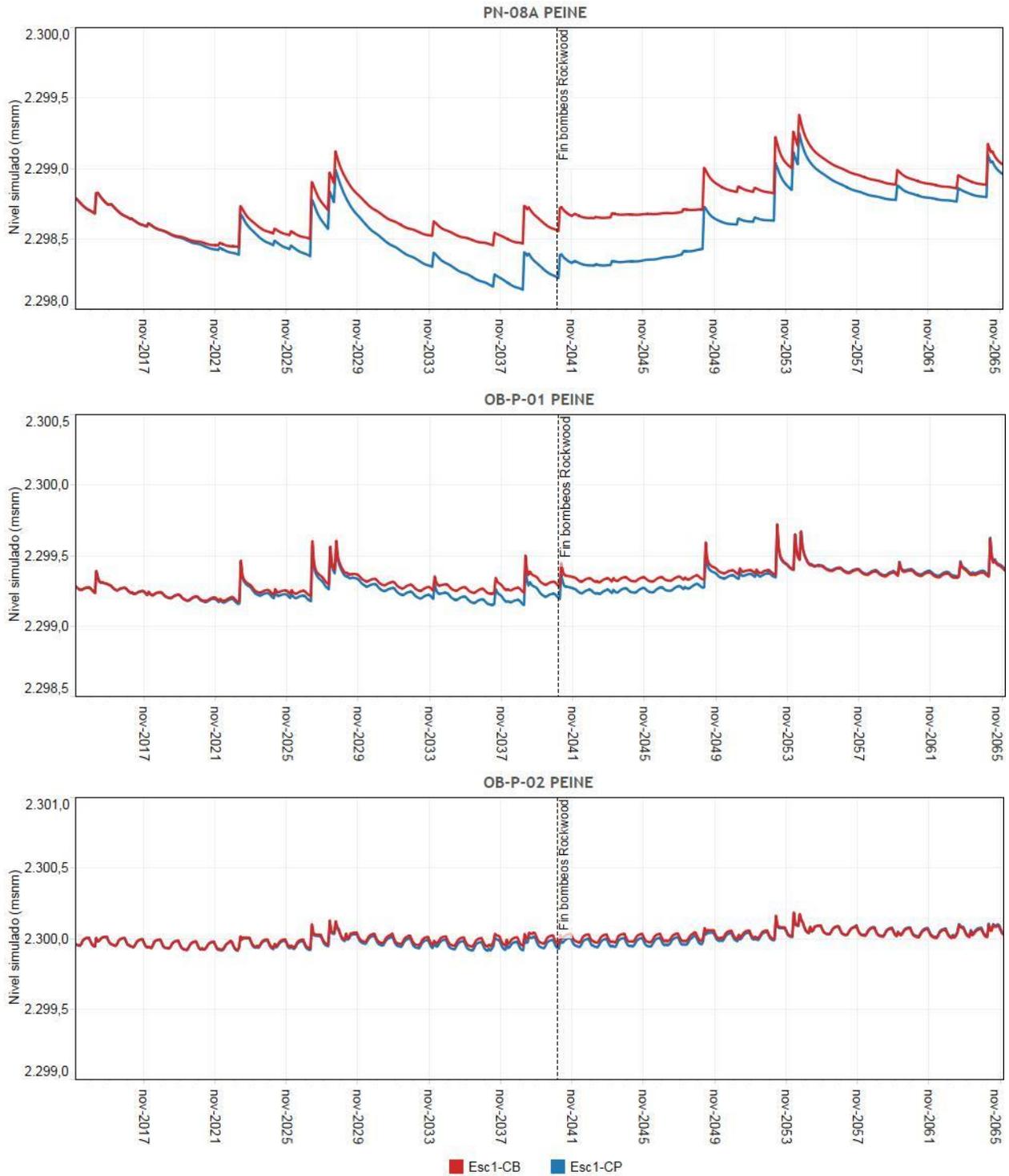
Fuente: Elaboración propia

**Figura 11-18 Nivel simulado en puntos de observación del perfil La Punta – La Brava, Esc1-CB y Esc1-CP (Cont.)**



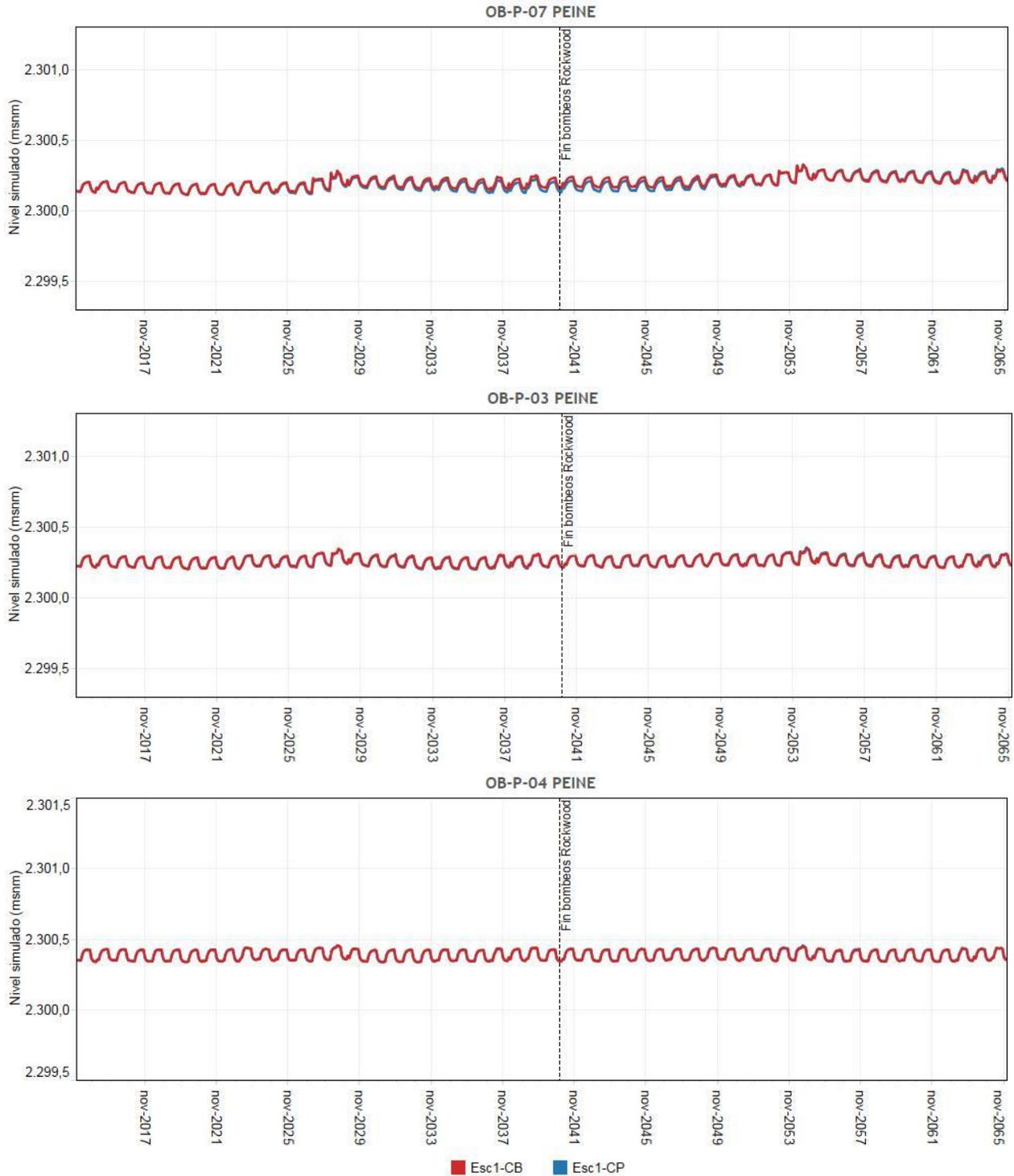
Fuente: Elaboración propia

**Figura 11-19 Nivel simulado en puntos de observación del perfil Peine, Esc1-CB y Esc1-CP**



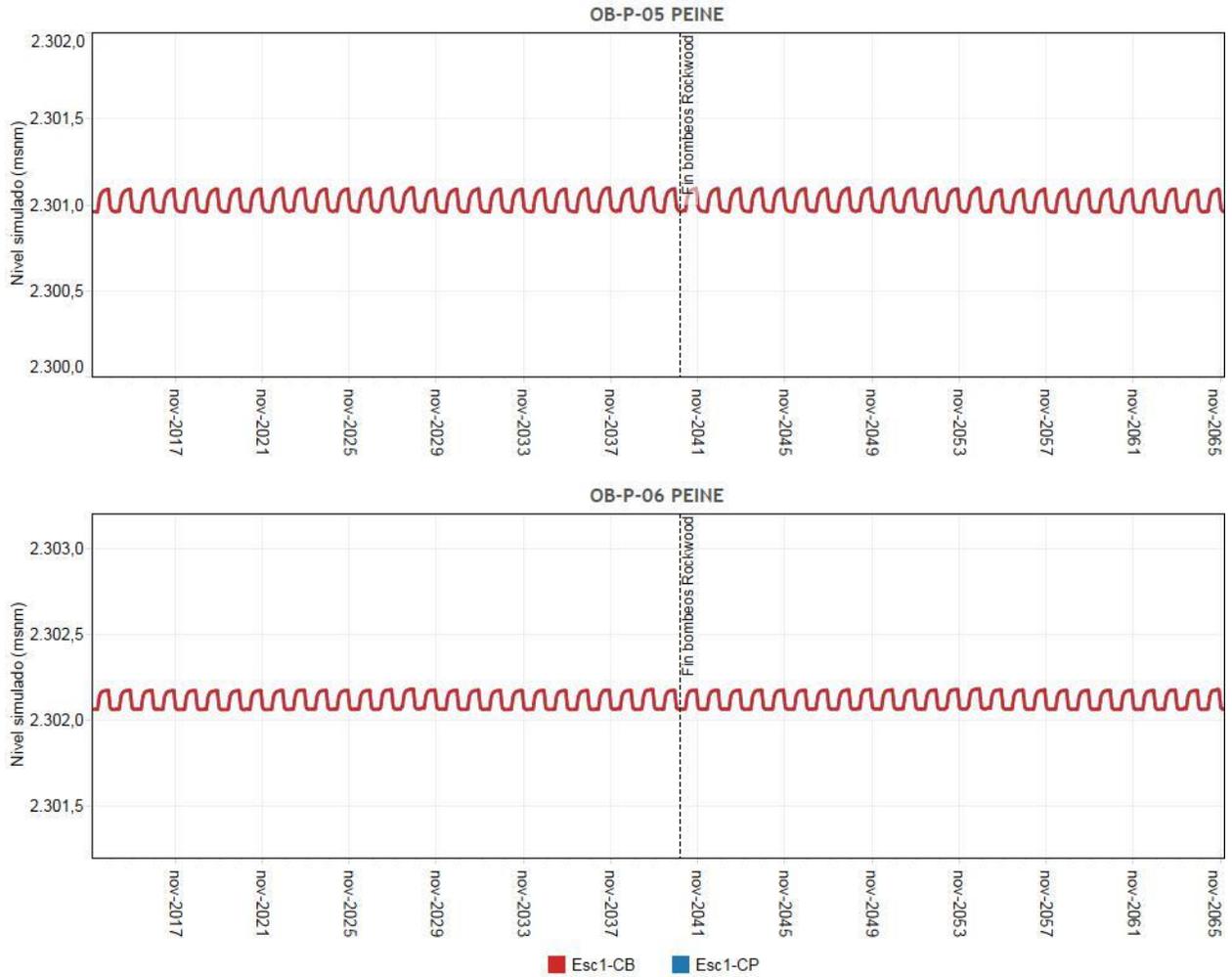
Fuente: Elaboración propia

**Figura 11-19 Nivel simulado en puntos de observación del perfil Peine, Esc1-CB y Esc1-CP (cont)**



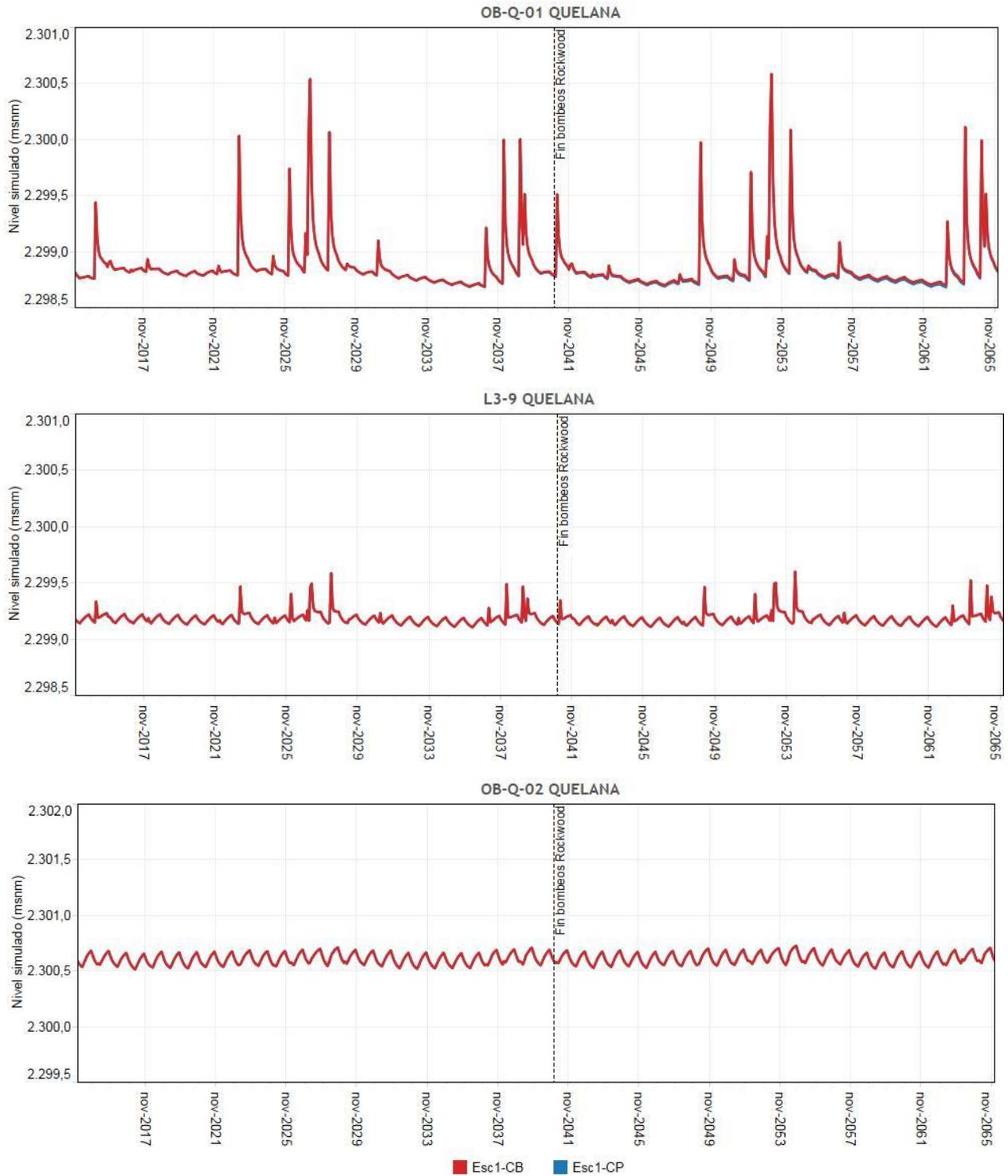
Fuente: Elaboración propia

**Figura 11-19 Nivel simulado en puntos de observación del perfil Peine, Esc1-CB y Esc1-CP (cont)**



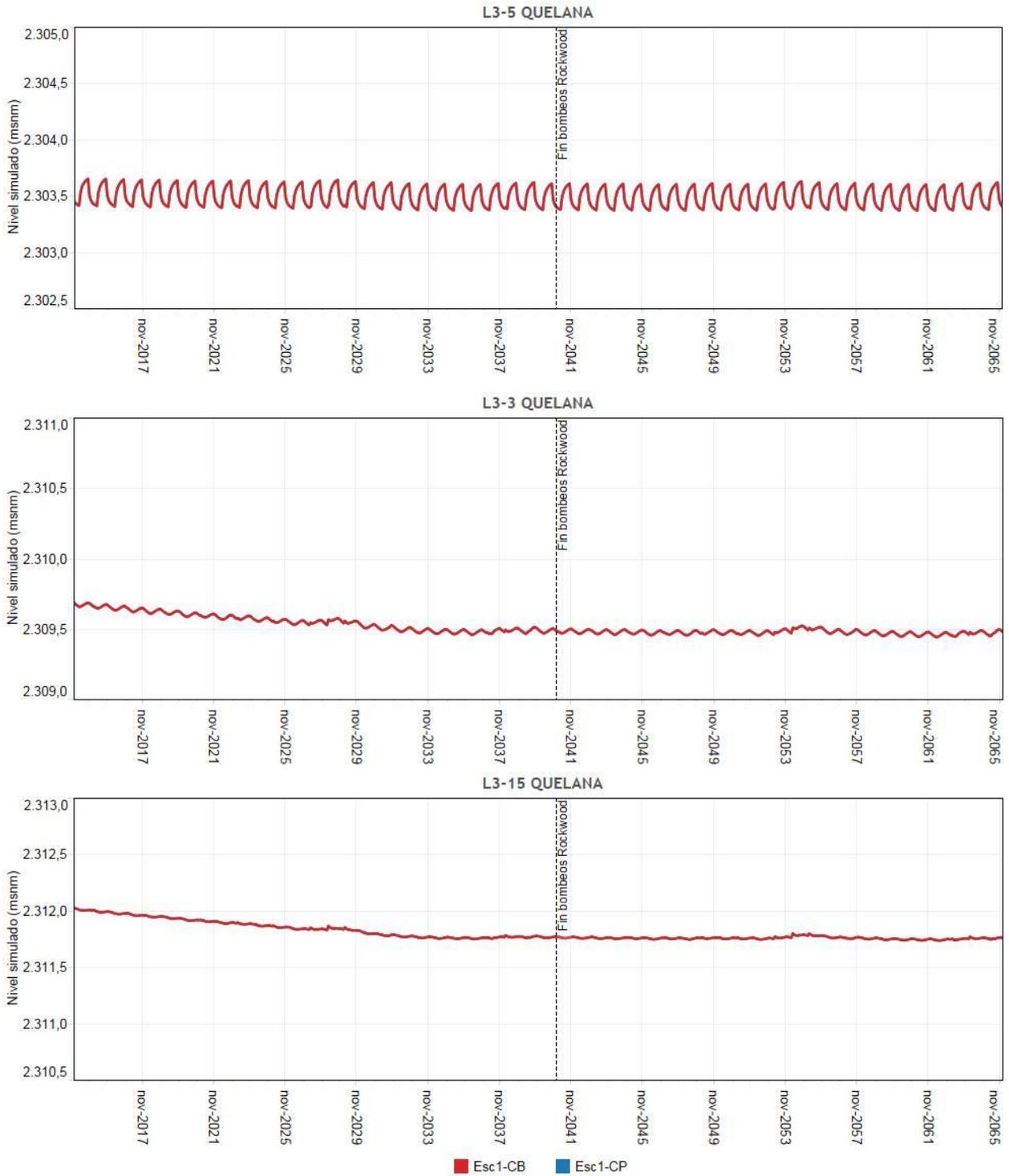
Fuente: Elaboración propia

**Figura 11-20 Nivel simulado en puntos de observación del perfil Quelana, Esc1-CB y Esc1-CP**



Fuente: Elaboración propia

**Figura 11-20 Nivel simulado en puntos de observación del perfil Quelana, Esc1-CB y Esc1-CP (cont.)**



Fuente: Elaboración propia

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

En las figuras anteriores se ha podido realizar una comparación cuantitativa entre la predicción de descensos para el Caso Base y Con Proyecto. Se observa que en los puntos prioritarios, localizados en su mayoría aguas arriba de la interfase, en la zona de alimentación de las lagunas, el descenso mínimo.

Sin embargo, en los perfiles de La Punta – La Brava (punto OB-PB-05 en Figura 11-18) y Quelana (puntos L3-5 y L-3-15 en Figura 11-20) se observa que el descenso previsto aumenta hacia los extremos de agua dulce-salobre de ambos perfiles. Este comportamiento es debido al efecto que tiene el bombeo de agua por parte de SQM y de MEL respectivamente, desde los pozos situados aguas arriba de los perfiles en las subcuencas aportantes, por lo que no está relacionado con el bombeo de salmuera desde el Núcleo.

Un resumen cuantitativo de los resultados de estas simulaciones se observa en la Tabla 11-6, Tabla 11-7 y Tabla 11-8 identificando los valores de “Descenso máximo”, y de “Descenso adicional”, dos medidas que han sido elegidas para facilitar la interpretación de resultados y que se definen de la siguiente manera:

- El descenso máximo es la diferencia mayor entre el nivel mínimo de todo el período de predicción y el nivel simulado al final del período de validación (diciembre de 2013). Este valor representa la condición de nivel más desfavorable para la zona de alimentación de las lagunas, por lo que ha sido seleccionado como parámetro de evaluación del proyecto. Se destaca que para el Caso Base, las tablas presentan su descenso de niveles existente en la fecha de descenso máximo del caso Con Proyecto.
- El descenso adicional se calcula para la misma fecha de descenso máximo mencionada en el párrafo anterior, como la diferencia de descensos entre ambos casos, el Caso Base y Con Proyecto. Este parámetro es el principal indicador de la respuesta del sistema al aumento de bombeo de salmuera por parte del proyecto en evaluación de Rockwood.

En estas tablas además se ha destacado la celda con un sombreado de color rosado aquellos puntos de observación que se califican como prioritarios para la evaluación de la no afección a las lagunas. Se aclara que las diferencias entre los descensos máximos del Caso Base y Con Proyecto el valor entregado como descenso adicional, tanto en el escenario de Evaluación del Proyecto como en los demás escenarios, pueden presentar una variación de  $\pm 1$  cm debido a los decimales que no se incluyen en las tablas.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

**Tabla 11-6 Descenso máximo en puntos de observación del perfil La Punta – La Brava. Esc1-CP y Esc1-CB.**

Descenso máximo (m), referido a nivel fecha 31 de diciembre de 2013 (Sistema La Punta – La Brava)							
Simulación	OB-PB-06	PN-16B	OB-PB-01	OB-PB-02	OB-PB-03	OB-PB-04	OB-PB-07
Esc1-CB	0,34	0,31	0,25	0,01	0,00	0,00	0,00
Esc1-CP	0,72	0,63	0,46	0,02	0,02	0,00	0,00
Descenso adicional (m), diferencia nivel entre Esc1-CB y Esc1-CP							
Descenso adicional	0,39	0,32	0,22	0,01	0,02	0,00	0,00

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 11-7 Descenso máximo en puntos de observación del perfil Peine. Esc1-CB y Esc1-CP.**

Descenso máximo (m), referido a nivel fecha 31 de diciembre de 2013 (Sistema Peine)								
Simulación	PN-08A	OB-P-01	OB-P-02	OB-P-07	OB-P-03	OB-P-04	OB-P-05	OB-P-06
Esc1-CB	0,63	0,04	0,04	0,03	0,02	0,01	0,01	0,00
Esc1-CP	0,95	0,13	0,05	0,03	0,03	0,01	0,00	0,00
Descenso adicional (m), diferencia nivel entre Esc1-CB y Esc1-CP								
Descenso adicional	0,33	0,09	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 11-8 Descenso máximo en puntos de observación y verificación del perfil Quelana. Esc1-CB y Esc1-CP.**

Descenso máximo (m), referido a nivel fecha 31 de diciembre de 2013 (Sistema Aguas de Quelana)							
Simulación	OB-Q-01	L3-9	OB-Q-02	L3-5	L3-3	L3-15	OB-Q-03
Esc1-CB	0,11	0,07	0,07	0,08	0,25	0,29	0,40
Esc1-CP	0,13	0,07	0,07	0,08	0,25	0,29	0,40
Descenso adicional (m), diferencia nivel entre Esc1-CB y Esc1-CP							
Descenso adicional	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Fuente: Elaboración propia

De los resultados de las simulaciones y como se observa en las tablas anteriores, los efectos (tanto en términos de descenso máximo como de descenso adicional) del incremento de bombeo de salmuera y agua dulce-salobre por parte del proyecto son mínimos en los puntos de evaluación prioritarios, con valores menores o iguales a 3 cm como descenso máximo, y menores o iguales a 2 cm como descenso adicional. Estos resultados indican una variación insignificante, ya que estos valores son tres o cuatro veces inferiores a la oscilación natural estacional de los niveles que se describe con detalle en el Apéndice I. A continuación se describe la evaluación de estos resultados por cada perfil:

- **Perfil La Punta / La Brava**

El descenso máximo obtenido en los tres puntos de evaluación prioritarios es de 2 cm. El valor de descenso máximo en el punto de evaluación OB-PB-05 está relacionado con el bombeo de agua dulce-salobre que

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

se produce en la subcuenca aportante, procedente de la extracción en el campo de bombeo de MEL, y no está relacionado con la extracción de salmuera. El descenso adicional en los tres puntos de observación prioritarios se prevé menor a 2 cm.

- **Perfil Peine**

El descenso máximo en los tres puntos de evaluación prioritarios es de 3 cm, lo que sucede en el punto OB-P-03. El descenso máximo se hace nulo en el punto OB-P-05, que es el situado más alejado del Núcleo. El descenso adicional en los tres puntos de evaluación prioritarios es menor a 1 cm.

- **Perfil Quelana**

El menor descenso máximo tiene lugar en el punto de verificación más cercano al Núcleo (L3-9). Desde este punto, el descenso se incrementa en ambas direcciones, siendo mayor en el extremo Este del perfil (OB-Q-03). Este comportamiento muestra que el efecto en el Núcleo debido a las extracciones de salmuera es menor que hacia el lado del acuífero. Sin embargo, los descensos máximos registrados en el centro y en el Este del perfil, son producidos por el bombeo de agua dulce-salobre desde los pozos de extracción de SQM en el acuífero del borde Este, lo que no tiene relación con el proyecto Rockwood. Sin perjuicio de lo anterior, el descenso adicional es nulo (0 cm) en todos los puntos del perfil, indicando que los descensos observados no tienen relación con el aumento de bombeo previsto por el proyecto de Rockwood.

Los puntos de verificación (prioritarios) del perfil de Quelana corresponden a los puntos del Plan de Contingencia (PC) de SQM (Geohidrología, 2014b), cuyos umbrales y niveles son reportados periódicamente en cota absoluta. Adicionalmente, dado que la cota topográfica de referencia utilizada no es de conocimiento público, no resulta posible una comparación directa entre los valores obtenidos en la modelación realizada en esta evaluación ambiental y los reportados por esta empresa, lo que no obsta, a que sí pueda evaluarse la superación de los umbrales mediante el análisis de los descensos máximos previstos.

Lo anterior, se realiza calculando la diferencia entre el valor umbral de “Cota Fase I” reportado por SQM y el nivel observado en diciembre de 2013 (Geohidrología, 2014b), que corresponde al descenso que activaría el umbral de Fase I, y comparando esta diferencia, con los descensos máximos simulados desde la fecha de referencia (diciembre de 2013). Tal como se muestra en la Tabla 11-9, en ninguno de los puntos analizados se sobrepasan los descensos máximos permitidos, por lo que se puede indicar que, según las predicciones realizadas por el modelo, no se activará el PC de SQM.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

**Tabla 11-9 Comparación descensos simulados con descenso máximo permitido por PC de SQM**

Pozo	Sistema	Umbral más restrictivo FI (msnm) según PSAH n°14 SQM	Nivel diciembre 2013 (msnm) según PSAH n°14 SQM	Diferencia (m)	Descenso máximo simulado (m)
L3-9	Aguas de Quelana	2.299,37	2299,53	0,16	0,07
L3-5	Aguas de Quelana	2.302,99	2303,17	0,18	0,08
L3-3	Vegetación Brea Atriplex	2.309,81	2310,08	0,27	0,25
L3-15	Alerta temprana	2314,46(*)	2314,76	0,30	0,29

Fuente: Elaboración propia con datos de terceros

(\*) Este valor corresponde a la cota Fase II, ya que para L3-15 el PC-SQM no tiene valor de Cota Fase I

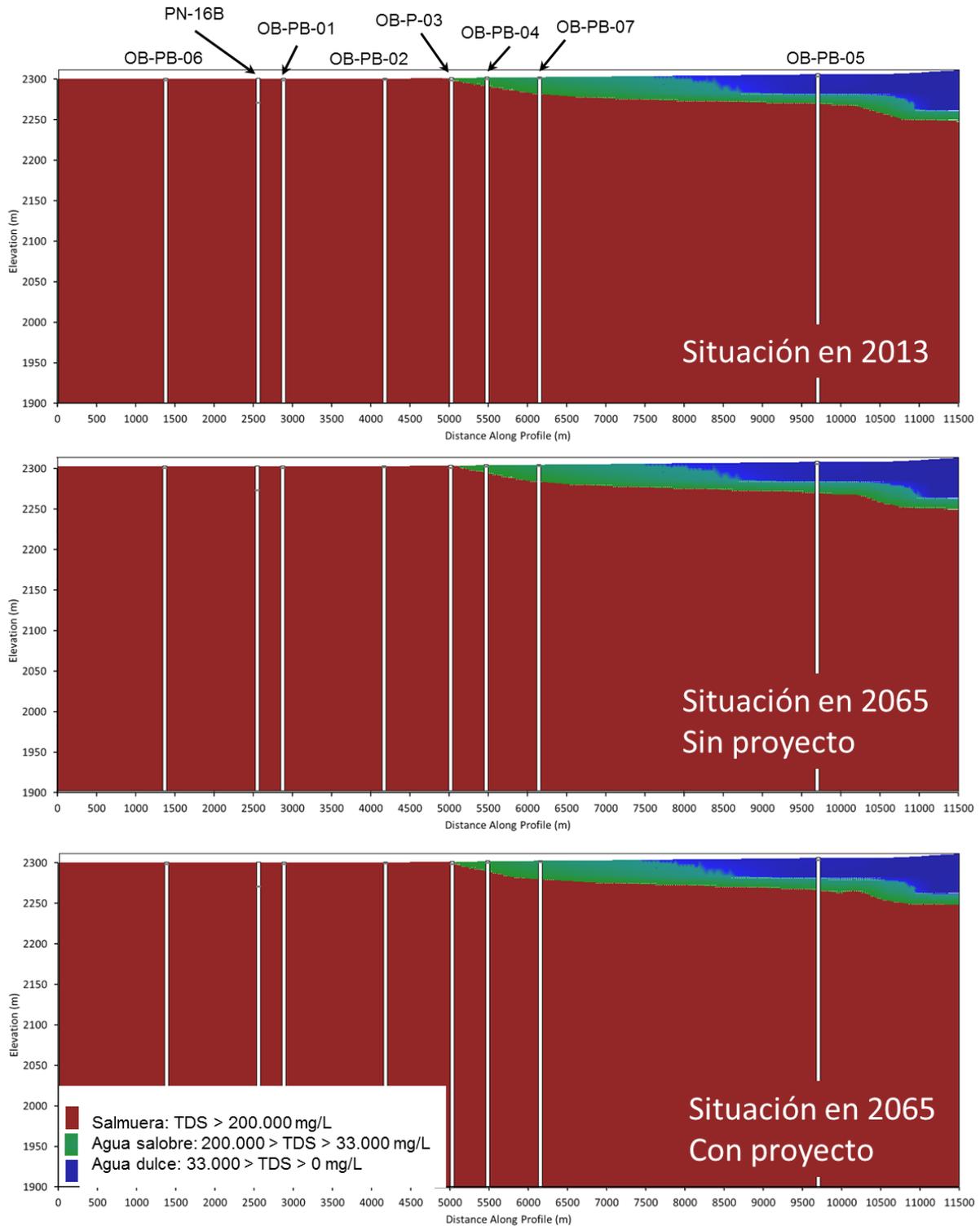
- **Evaluación de distribución de TDS y de la posición de la Interfase**

Se compararon las distribuciones de concentración de TDS simuladas para el Caso Base y Con Proyecto con el fin de evaluar si el Proyecto causaría efectos en la distribución de este parámetro, y por lo tanto, también en la posición y/o forma de la interfase existente entre salmuera y agua salobre. En la Figura 11-21, Figura 11-22 y Figura 11-23 se muestra una comparación entre los siguientes casos para cada perfil:

- Distribución de TDS simulada en 2013 (final periodo de validación)
- Distribución de TDS en escenario Caso Base en 2065
- Distribución de TDS en escenario Con Proyecto en 2065

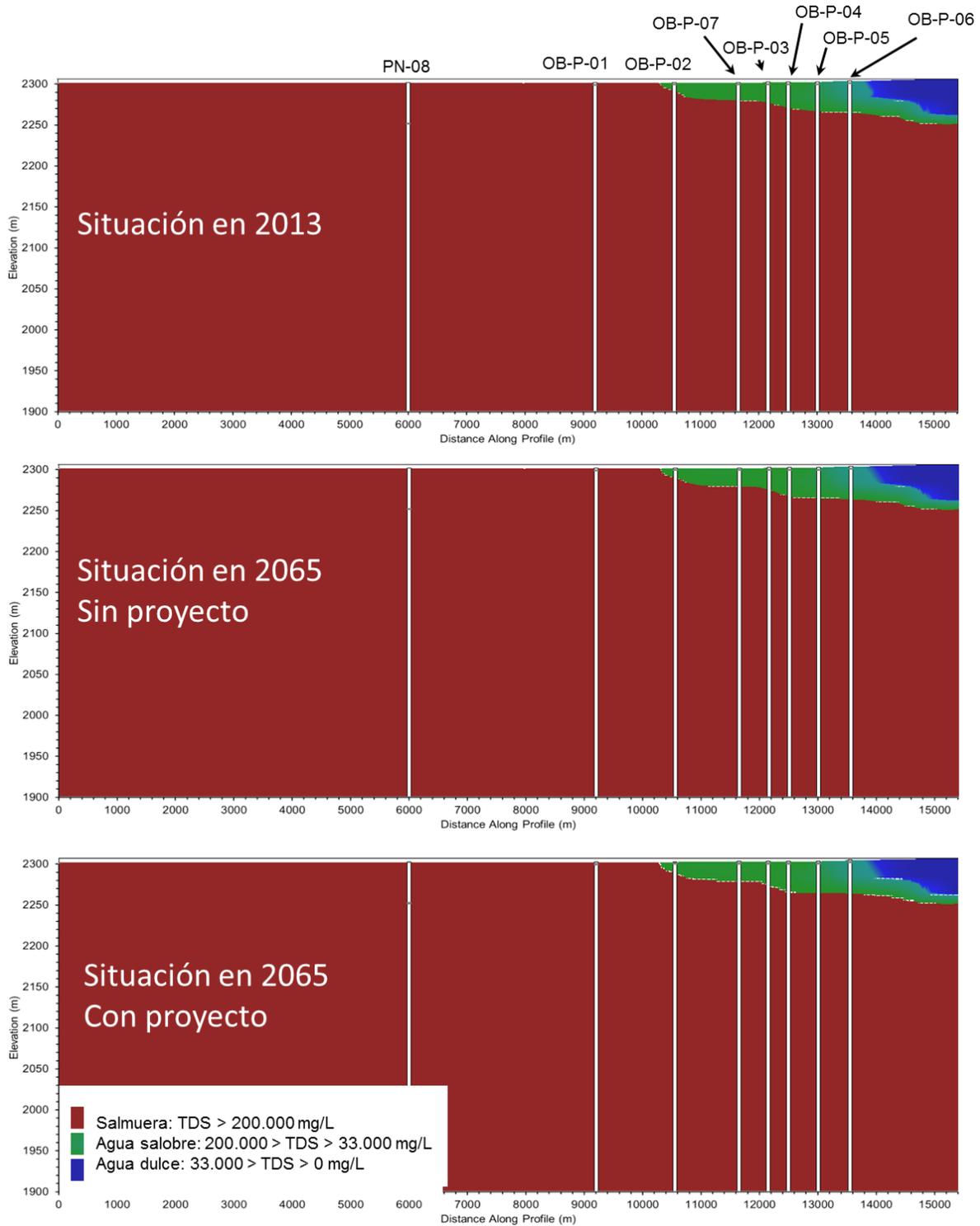
Como límites de concentración de TDS para la distinción entre agua salobre y salmuera se ha considerado lo establecido en el “Capítulo 7. Hidroquímica”, que es de 200.000 mg/L (equivalentes a 200 mS/cm). Sin embargo, para efectos de representación gráfica y con el fin de facilitar la identificación de la entrada de agua dulce en los perfiles, en este punto se ha representado la concentración de 33.000 mg/L de TDS para visualizar la entrada de aguas dulces desde el borde del perfil. No obstante, el límite entre aguas dulces y salobres utilizado en el resto del documento es la concentración de 4.200 mg/L de TDS, como se indica en el Capítulo 7.

**Figura 11-21 Comparación de distribución de TDS en Esc1 perfil La Punta- La Brava**



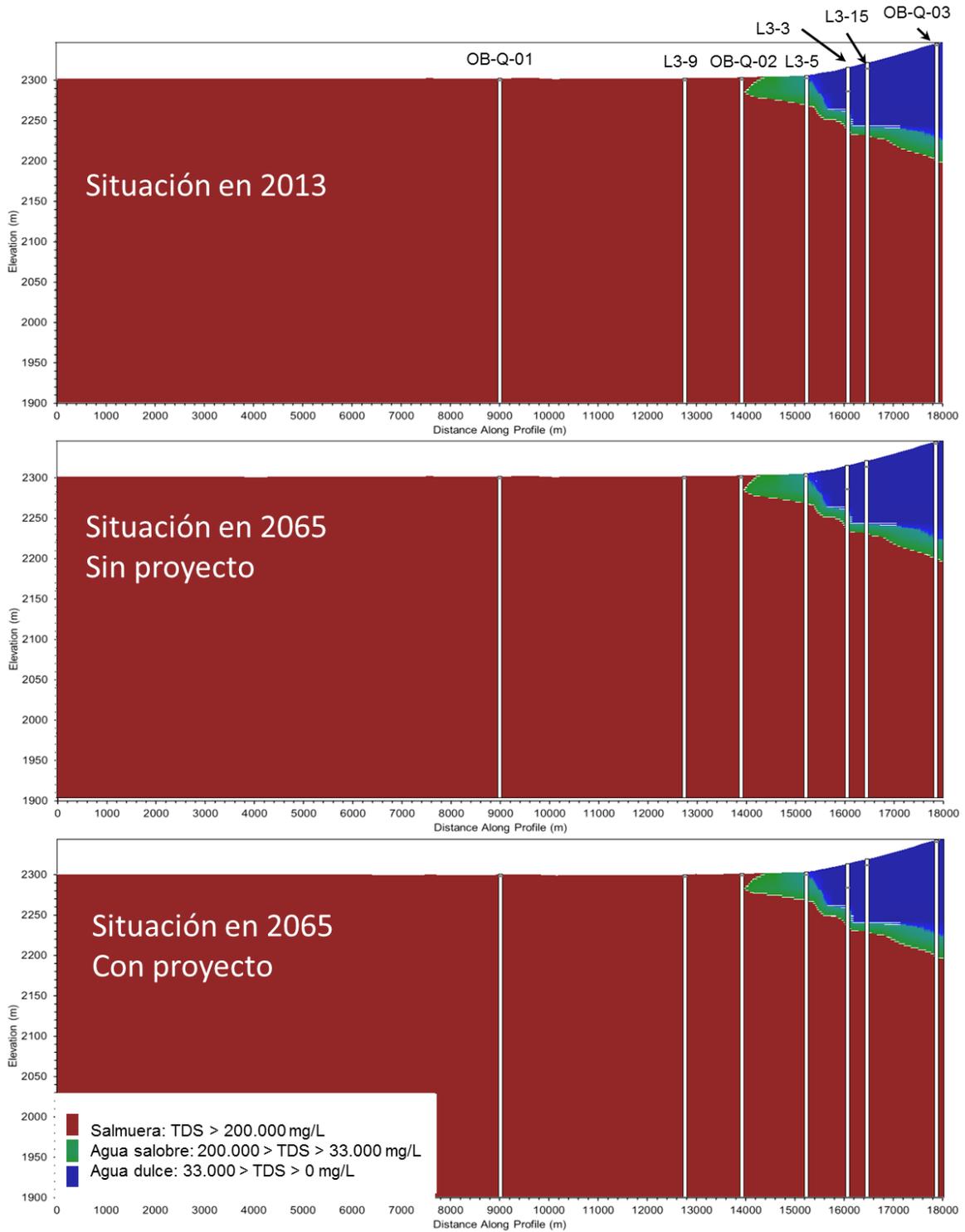
Fuente: Elaboración propia

**Figura 11-22 Comparación de distribución de TDS en Esc1 perfil Peine**



Fuente: Elaboración propia

**Figura 11-23 Comparación de distribución de TDS en Esc1 perfil Quelana**

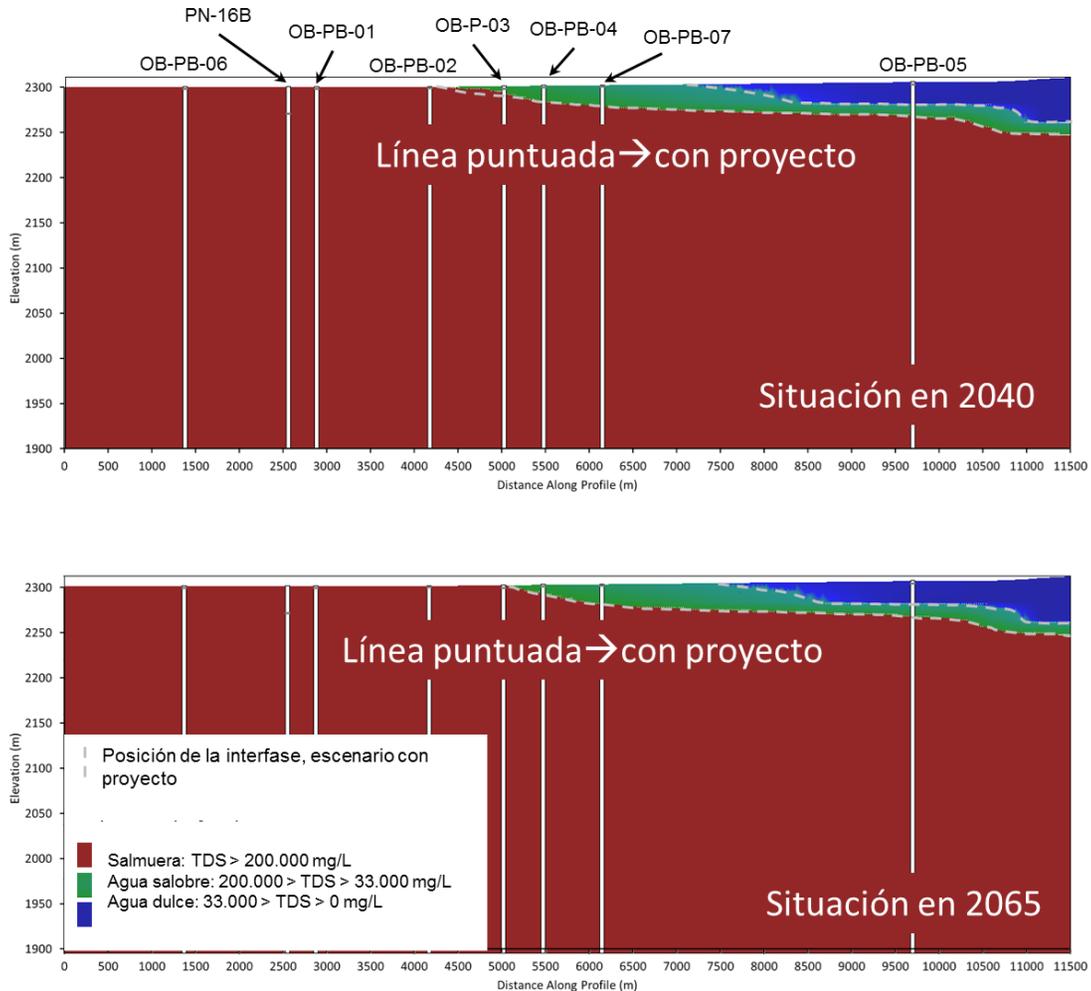


Fuente: Elaboración propia

La comparación de estas tres representaciones indica que el efecto del proyecto en la distribución de TDS y en la interfase es despreciable.

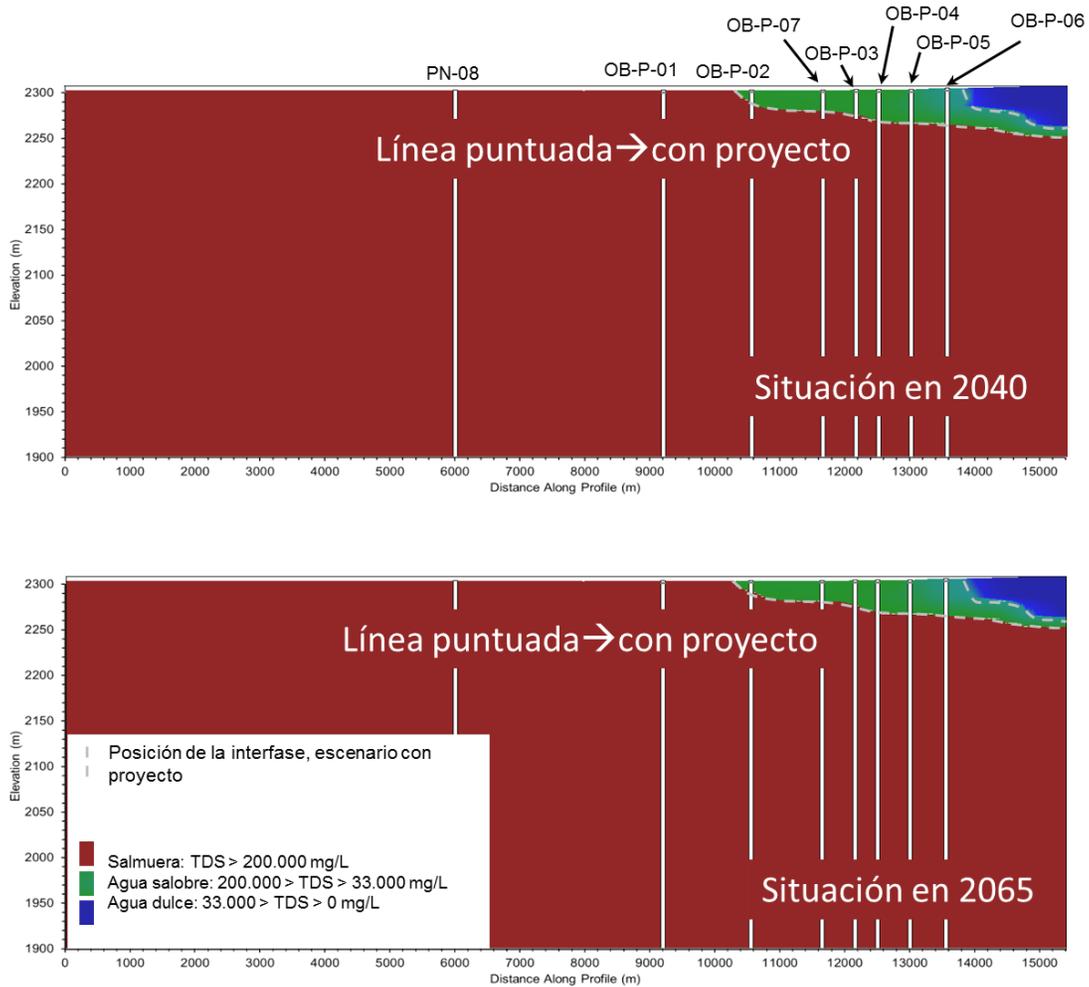
La Figura 11-24, Figura 11-25 y Figura 11-26 se elaboraron para mejorar la visualización de las distribuciones de TDS para el Caso Base y Con Proyecto. Estas figuras muestran una línea discontinua que delimita el contorno del agua salobre para el escenario Con Proyecto sobre la delimitación de colores que corresponde al Caso Base, tanto para la previsión en el año 2040, fecha prevista para el término del proyecto de Rockwood (imagen superior), como en 2065 correspondiente a 25 años de detenido el bombeo (imagen inferior), la que se interpreta como la posición de la interfase en los dos escenarios.

**Figura 11-24 Comparación detallada entre distribuciones de TDS y posición de interfase en Esc1 perfil La Punta – La Brava**



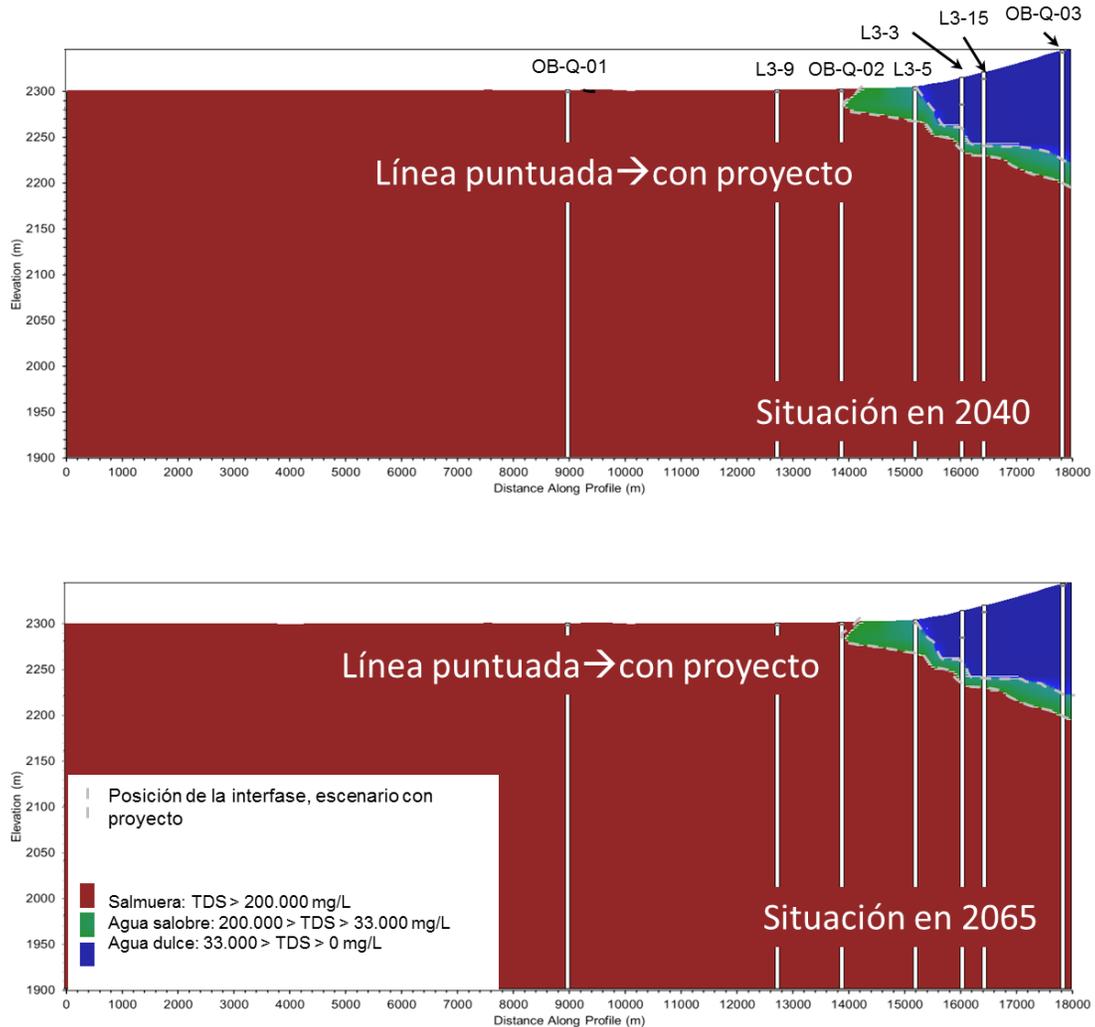
Fuente: Elaboración propia

**Figura 11-25 Comparación detallada entre distribuciones de TDS y posición de interfase en Esc1, perfil Peine**



Fuente: Elaboración propia

**Figura 11-26 Comparación detallada entre distribuciones de TDS y posición de interfase en Esc1, perfil Quelana**



Fuente: Elaboración propia

De estas figuras, se puede indicar que no se aprecian diferencias en la distribución de TDS para estos dos instantes de tiempo, 2040 y 2065, para el Caso Base y Con Proyecto.

Por lo tanto, a partir del análisis cuantitativo y cualitativo de los resultados de simulación en la distribución de TDS, se puede concluir que el incremento de bombeo del proyecto no produce efectos significativos en la distribución prevista de TDS y en la posición y/o forma de la interfase.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

## 11.5 Escenario de Recarga Reducida (Esc2)

Este escenario surge con el objetivo de evaluar las condiciones más desfavorables para la operación del proyecto desde un punto de vista hidrológico (menores recargas al sistema) y junto con ello, evaluar un escenario que permita obtener los valores umbrales de niveles de salmuera en el Núcleo, para ser incorporados al Plan de Alerta Temprana (PAT) de esta Adenda, demostrando que aun en un escenario de menor recarga hidrológica no se ven afectadas los sistemas lagunares. El PAT se presenta en el Capítulo 4 del Anexo 3 de esta Adenda 5.

Este escenario (Esc2) considera períodos prolongados de sequía que replican el período de 11 años de menor precipitación histórica medida entre los años 1970 y 2013, obteniendo una condición de precipitación y recarga disminuidas.

Los resultados de los niveles simulados en los modelos para este escenario de recarga reducida se presentan en el Apéndice K-1 para todo el período de simulación.

### 11.5.1 Descripción del Escenario de Recarga Reducida

De acuerdo con el estudio hidrogeológico desarrollado, se puede concluir que una variable importante que influye en los resultados de la simulación es la recarga al Salar, tanto al Núcleo como a la Zona Marginal. Si bien la recarga subterránea afluente al Salar desde las subcuencas aportantes no presenta una variabilidad estacional significativa, si ocurre con la recarga directa en el Núcleo y en la Zona Marginal por efecto de las precipitaciones que muestran una variabilidad importante cada año.

El objetivo de simular un escenario de recarga reducida, es analizar la respuesta del sistema a la condición con proyecto ante situaciones hidrológicas extremas y que conlleven montos de recarga por precipitación menores a los estimados como más probables de acuerdo a la estadística histórica y utilizada en la evaluación del proyecto. Desde este punto de vista se trata de un escenario ambientalmente desfavorable en relación con la disminución natural de la precipitación.

En este escenario, el resto de variables hidrológicas, tales como la explotación de la cuenca, se han mantenido iguales que en el Escenario de Evaluación del Proyecto, y al igual que en éste, se han simulado dos casos: Caso Base (Esc2-CB) y Con Proyecto (Esc2-CP).

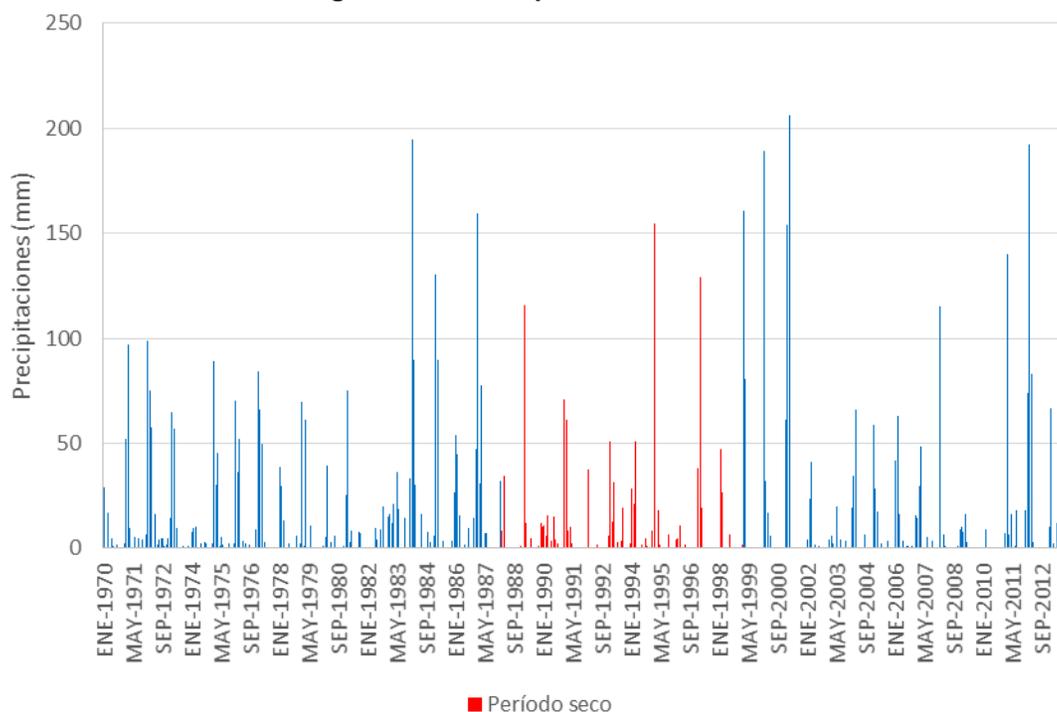
A continuación se describe la metodología seguida para obtener los valores de recarga reducida, que se definen sobre la base del análisis estadístico de las precipitaciones históricas descritas en el Capítulo 6 de este Anexo 1.

Para definir la menor recarga, se consideró la variabilidad estadística interanual de las estaciones pluviométricas utilizadas en el cálculo de la recarga subterránea proveniente desde las subcuencas

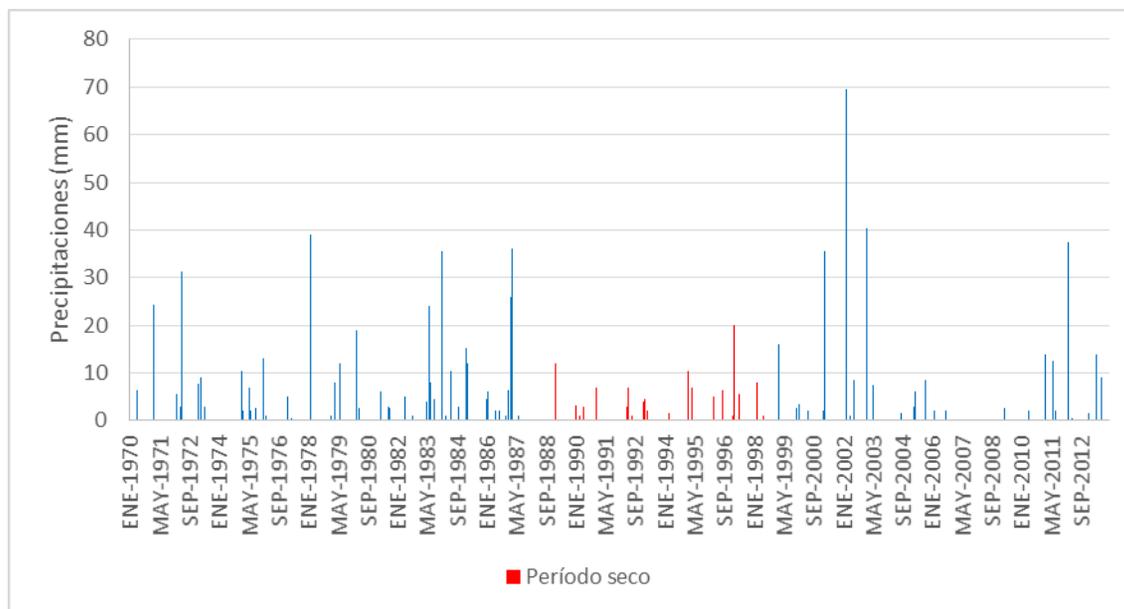
aportantes, esto es, El Tatio y Peine, además de las estaciones ubicadas en el Núcleo (Planta SCL, Chaxa y Salar). Considerando que de la observación de la estadística completa disponible de precipitaciones en la cuenca, se desprenden que eventos pluviométricos importantes tendrían un periodo de retorno del orden de 11 años (tales como los ocurridos en 2001-2003 o 2011-2013), se calculó en dichas estaciones un promedio móvil de 11 años para las precipitaciones identificando el periodo más seco desde que se tienen registros desde 1970.

De este análisis se determinó que éste periodo corresponde a febrero de 1988 a enero de 1999, ambos incluidos. En la Figura 11-27 y Figura 11-28 se presentan las series de precipitación de las estaciones meteorológicas de Peine y El Tatio, donde se destaca en rojo el período con menor precipitación. En la estación Peine, cuyo promedio de precipitaciones mensuales en su serie completa es de 1,6 mm, en el período seco alcanzan 0,9 mm, mientras que en la estación El Tatio el período seco cuenta con un promedio mensual de precipitación de 8,8 mm, versus los 12,3 mm de su serie completa.

**Figura 11-27 Precipitaciones El Tatio**



**Figura 11-28 Precipitaciones Peine**



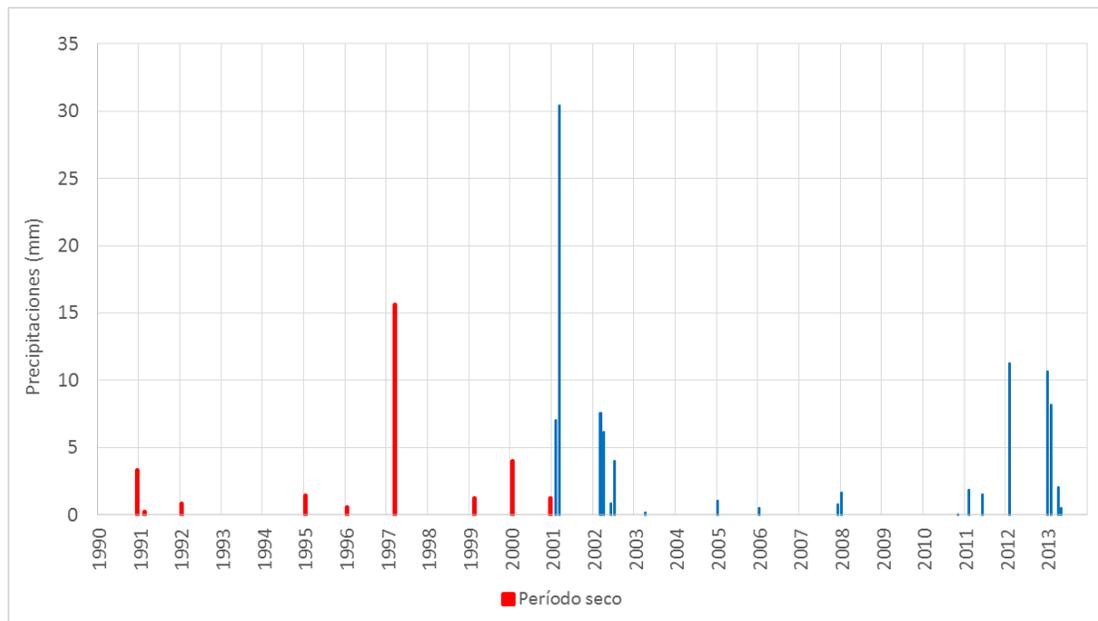
Fuente: Elaboración propia con datos de la DGA

A partir del análisis realizado, se utilizó la serie de precipitaciones de los 11 años más secos (1988-1999) para generar las recargas en el escenario futuro, repitiendo esta serie el número de veces necesarias para completar el período de simulación (25 años de proyecto y 25 de recuperación). De esta forma, y siguiendo el procedimiento explicado en el punto 9.3, se generaron las nuevas recargas subterráneas afluentes desde las subcuencas aportantes.

La disminución en los flujos subterráneos desde las subcuencas producto de la menor precipitación, en relación al escenario histórico simulado como condición de precipitación normal, es menor a un 1% en promedio, es decir, no es una magnitud importante. Lo anterior se explica debido a que el volumen almacenado en las subcuencas actúa como un regulador de las precipitaciones, por lo que a esta escala temporal, una disminución importante de las lluvias no tendría mayor efecto en la recarga subterránea, pues su aporte sigue siendo menor en relación al gran volumen embalsado, manteniéndose un flujo de recarga aproximadamente constante.

En el caso de la recarga directa en el Núcleo y en la Zona Marginal Intermedia, por efecto de las precipitaciones directas, se siguió el mismo procedimiento, calculando los promedios móviles de la serie disponible de precipitaciones en las estaciones Planta SCL, Chaxa y Salar (1990 a 2013). Para dichas estaciones, el período de 11 años con menores precipitaciones corresponde a enero de 1990 a diciembre de 2000. El promedio de precipitaciones en estas tres estaciones se presenta en la Figura 11-29, donde se destaca en color rojo el período más seco.

**Figura 11-29 Promedio de precipitaciones en el Núcleo**



Fuente: Elaboración propia

De la misma manera que con las subcuencas aportantes, para generar la recarga vertical se repitió la serie seca hasta completar el período de simulación. La serie de menores precipitaciones en el Núcleo presenta un promedio mensual de 0,22 mm, en comparación a los 0,43 mm de la serie completa, lo que representa una disminución de casi un 50% de la recarga. Las series de recarga vertical reducida para Peine, El Tatio y Núcleo se presentan a nivel mensual en el Apéndice K., donde también se incluyen las tasas de recarga implementadas en el modelo para el escenario de evaluación del Proyecto y del de Recarga Reducida.

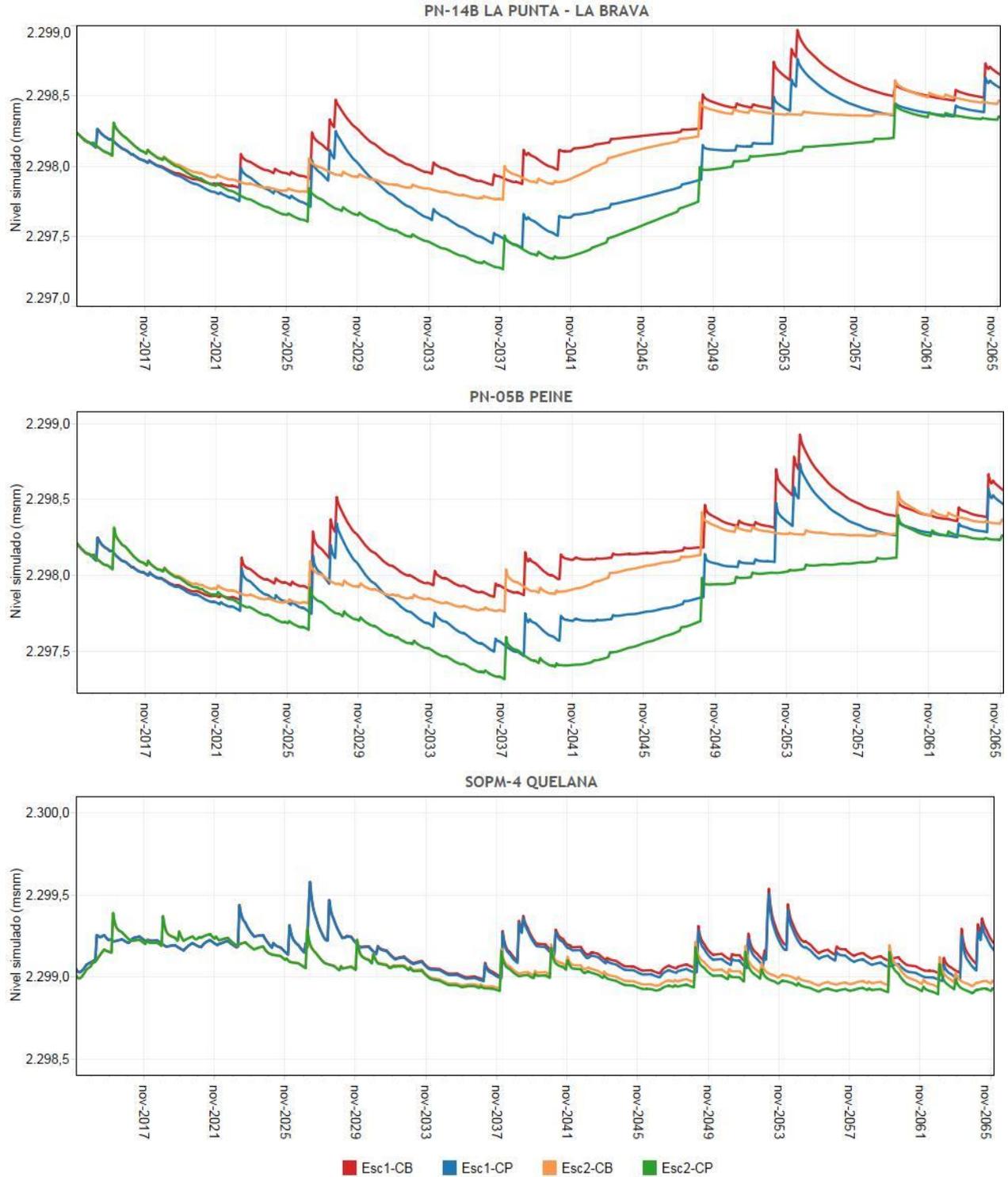
## 11.5.2 Resultados Escenario de Recarga Reducida

### 11.5.2.1 Resultados MODFLOW

#### 11.5.2.1.1 Niveles

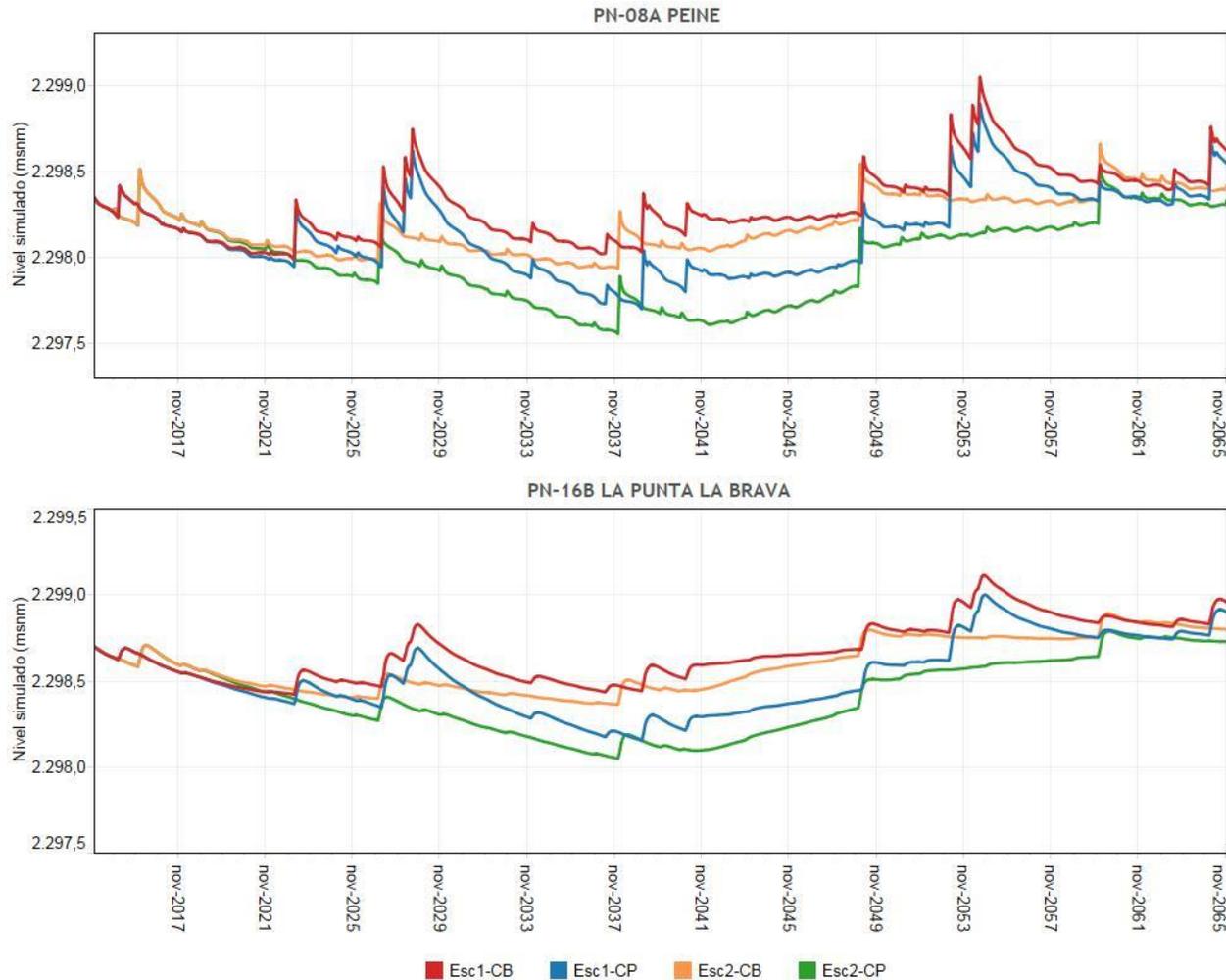
En la Figura 11-30 y Figura 11-31 se muestran los descensos simulados por MODFLOW en los puntos de acople con los perfiles SEAWAT y en los puntos de control del PAT en salmuera para los casos Esc2-CB y Esc2-CP, y su comparación con los casos simulados anteriormente en el escenario de evaluación del Proyecto (Esc1-CB y Esc1-CP).

**Figura 11-30 Evolución de niveles simulados en puntos de acople SEAWAT-MODFLOW. Esc1 y Esc2**



Fuente: Elaboración propia

**Figura 11-31 Resultados de simulación de niveles en puntos de control PAT en salmuera. Esc1 y Esc2.**



Fuente: Elaboración propia

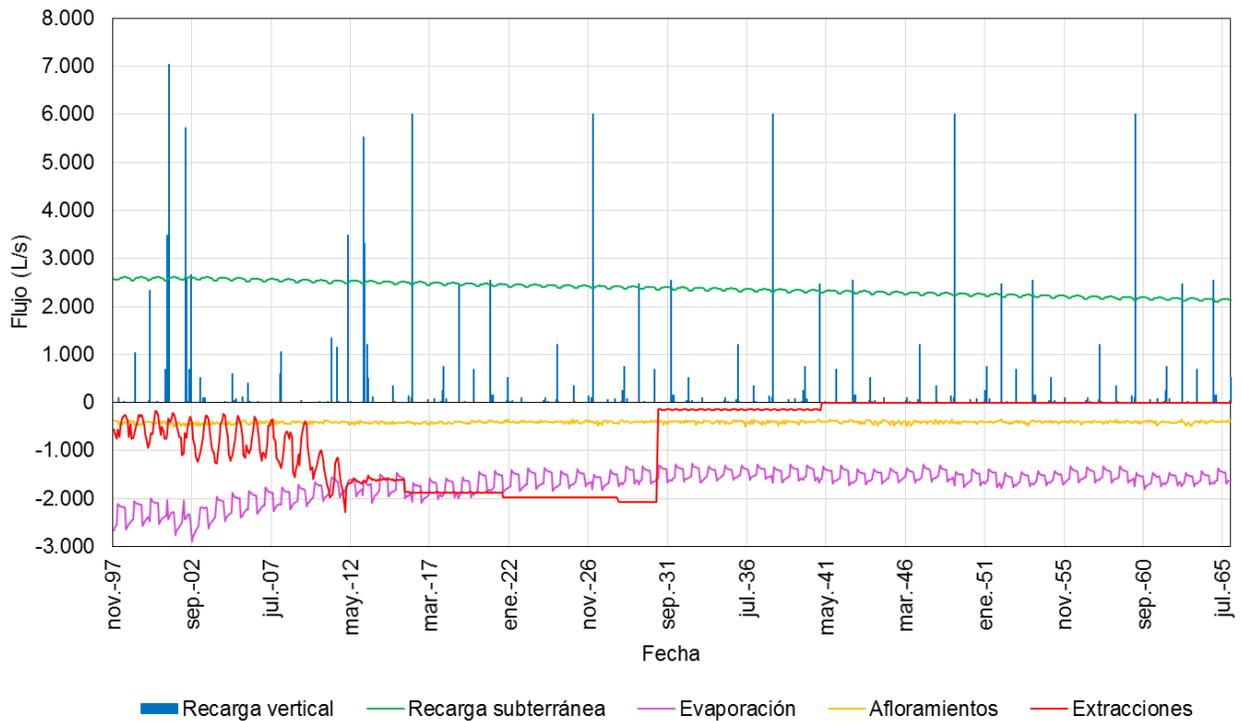
En caso de registrarse una recarga menor a la esperada, el descenso adicional que se produce entre los escenarios Esc2-CB y Esc2-CP, sería del orden de 20 cm en el momento de mayor descenso al año 25 del proyecto, para Peine (PN-05B) y para La Punta-La Brava (PN-14B), valor similar al obtenido como descenso adicional en la comparación entre los escenarios Esc1-CB y Esc1-CP. Para Quelana (SOPM-4) en cambio, la diferencia es insignificante.

Tal como era de esperar, los descensos máximos en la salmuera son mayores para el caso de recarga reducida, por lo que este escenario también fue simulado en SEAWAT para evaluar su efecto en el acuífero salobre próximo a las lagunas, lo que se describe más adelante (ver sección 11.5.2.2.).

### 11.5.2.1.2 Flujos

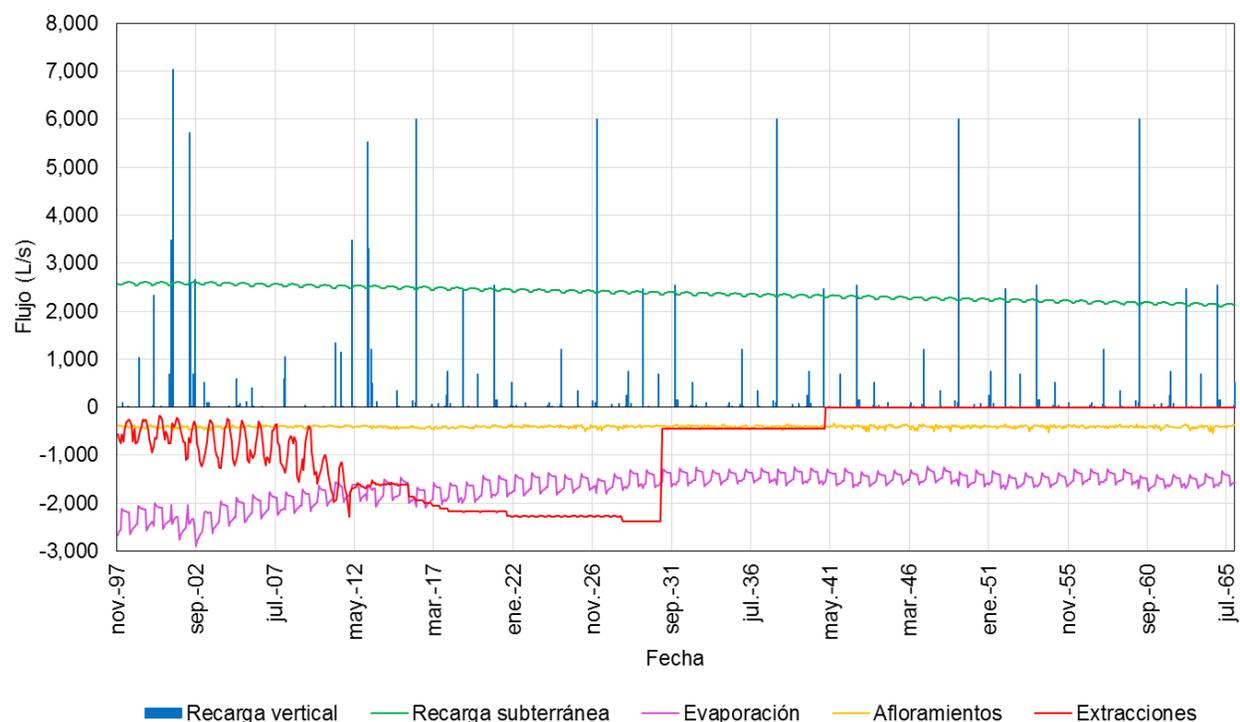
En la Figura 11-32 y en la Figura 11-33 se muestran los flujos de entrada y salida simulados por el modelo MODFLOW en el escenario de recarga reducida para el Caso Base (Esc2-CB) y para el caso Con Proyecto (Esc2-CP) respectivamente.

**Figura 11-32 Flujos de entrada y salida Esc2-CB**



Fuente: Elaboración propia

**Figura 11-33 Flujos de entrada y salida Esc2-CP**



Fuente: Elaboración propia

Al comparar la Figura 11-32 (Esc2-CB) con la Figura 11-16 (Esc1-CB), se observa que las condiciones de entrada al sistema, como la recarga subterránea y la recarga vertical, disminuyen a partir de enero 2014, lo que responde a la reducción de la recarga implementada para la simulación de este escenario. Con respecto a las extracciones, éstas se mantienen iguales a la de los escenarios de evaluación del Proyecto. Los flujos de salida promedio de evaporación y afloramientos se incluyen y se comparan con los resultados anteriores en la Tabla 11-10.

**Tabla 11-10 Flujos de salida en escenarios Esc1 y Esc2**

Caso de simulación	Escenario de evaluación del Proyecto (Esc1)		Escenario de recarga reducida (Esc2)	
	Evaporación (L/s)	Afloramientos (L/s)	Evaporación (L/s)	Afloramientos (L/s)
Caso Base (CB)	1.775,0	410,5	1.775,0	411,2
Con Proyecto (CP)	1.748,4	409,2	1.671,4	406,0
Diferencia	-26,6	-1,3	-103,6	-5,2

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a lo que se observa en la tabla anterior, los afloramientos presentan una disminución de 5,2 L/s, mientras que la diferencia en la evaporación es 103,6 L/s, en ambos casos más de tres veces la

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

reducción obtenida en el escenario de evaluación. Esto es coherente con los niveles simulados en el Núcleo, ya que el descenso adicional que produce el Proyecto a lo largo de la simulación es mayor en los escenarios de recarga reducida que en el de evaluación del Proyecto.

#### 11.5.2.2 Resultados SEAWAT

- **Evaluación de resultados – Variación de niveles**

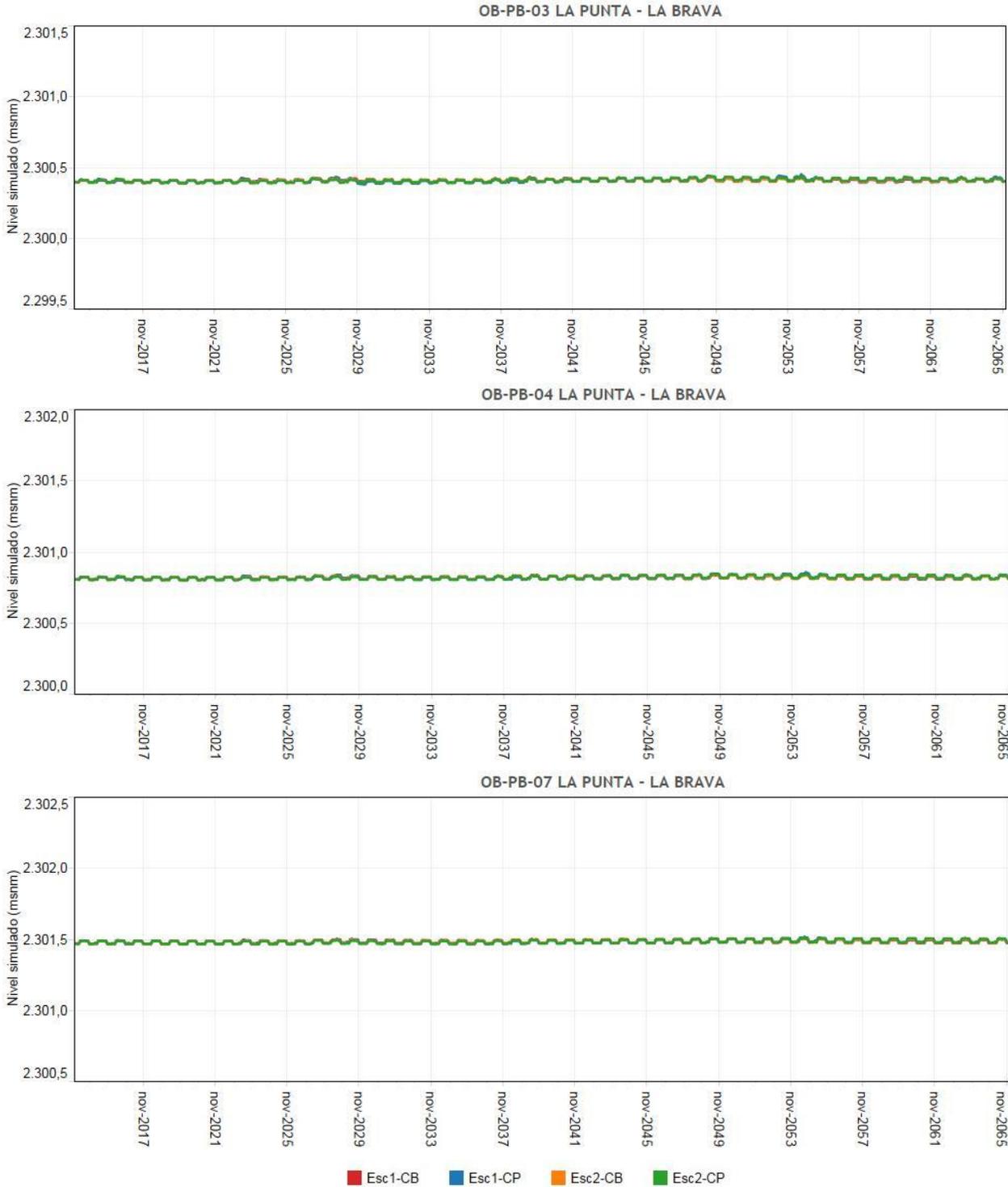
Utilizando los niveles simulados por MODFLOW para los escenarios Esc2-CB y Esc2-CP en los puntos de acople entre los modelos MODFLOW y SEAWAT, PN-14B, PN-05B y SOPM-4,, para los perfiles La Punta-La Brava, Peine y Quelana respectivamente, se realizó la simulación de niveles en estos últimos para el período 01/01/2014 a 31/12/2065.

En la Figura 11-34, Figura 11-35 y Figura 11-36, se muestran los niveles simulados en los puntos considerados prioritarios, cuya ubicación se muestra en la Figura 11-2, Figura 11-3 y Figura 11-4:

- OB-PB-03, OB-PB-04 y PB-PB-07 en el perfil La Punta – La Brava
- OB-P-03, OB-P-04 y PB-P-05 en el perfil Peine
- L3-9, L3-5, L3-3 y L3-15 en el perfil Quelana

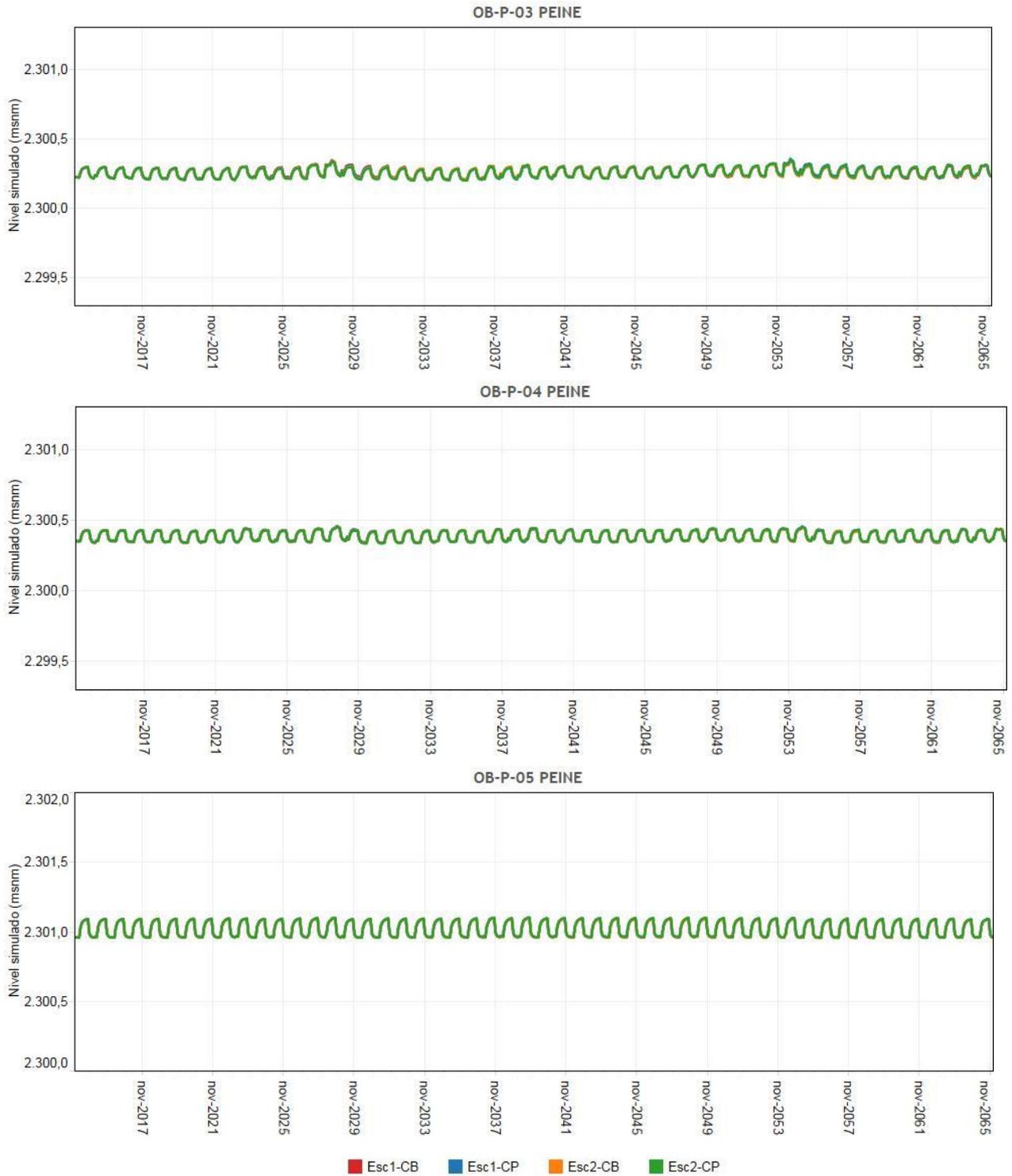
Cabe señalar que algunas de las series de nivel representadas en los gráficos siguientes son coincidentes, por lo que sólo se aprecia aquella que representa al escenario analizado Con Proyecto, ya que el resto de series se encuentran bajo ésta y no se visualizan en el gráfico.

**Figura 11-34 Nivel simulado en puntos de observación prioritarios del perfil La Punta – La Brava. Esc1 y Esc2**



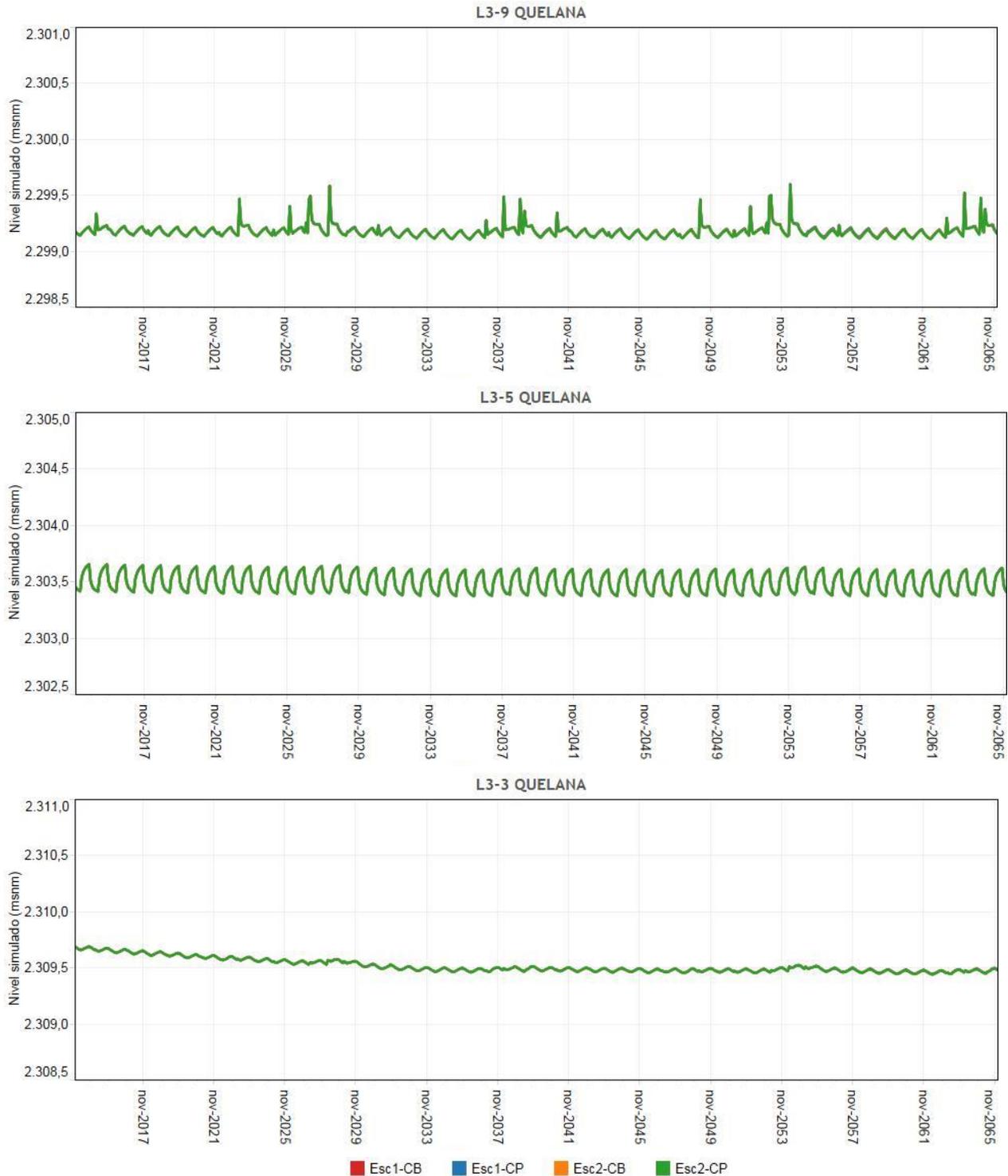
Fuente: Elaboración propia

**Figura 11-35 Nivel simulado en puntos de observación prioritarios del perfil Peine Esc1 y Esc2**



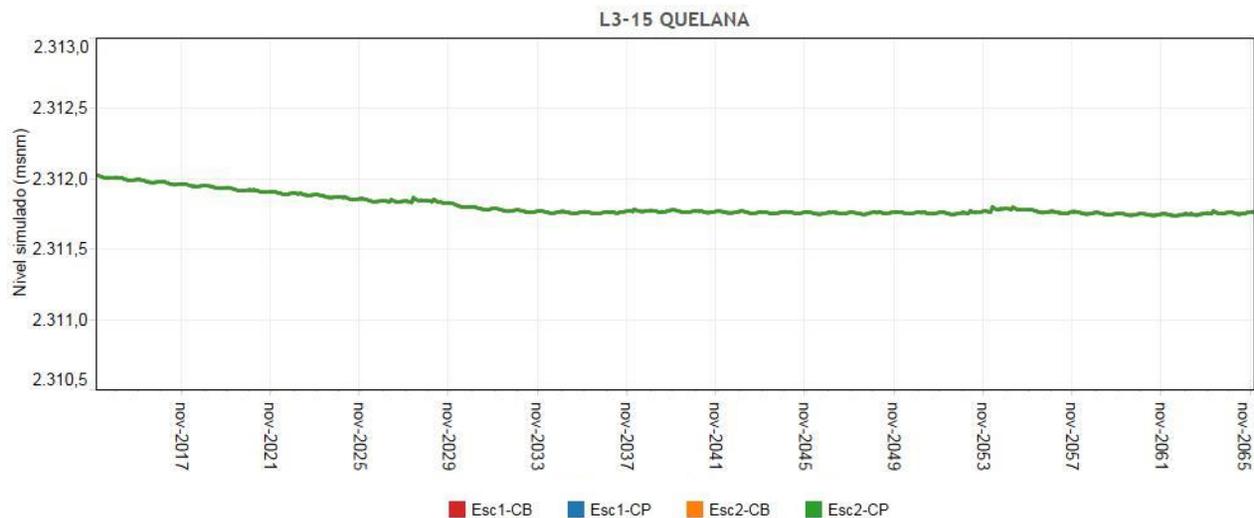
Fuente: Elaboración propia

**Figura 11-36 Nivel simulado en puntos de observación prioritarios del perfil Quelana. Esc1 y Esc2**



Fuente: Elaboración propio

**Figura 11-36 Nivel simulado en puntos de observación prioritarios del perfil Quelana. Esc1 y Esc2 (cont.)**



Fuente: Elaboración propia

Como se ve en los gráficos anteriores, no se observan diferencias significativas del nivel simulado por SEAWAT en los puntos prioritarios de los perfiles entre los escenarios Esc2-CB y Esc2-CP. A pesar del aumento del descenso simulado por MODFLOW en los puntos utilizados como condición de borde por SEAWAT, tampoco se observan diferencias en relación a los escenarios simulados en la condición de recarga probable (Esc1), lo que indica que frente a una condición de sequía extrema, la extracción de 300 L/s adicionales tampoco afecta los sistemas lagunares.

En la Tabla 11-11, Tabla 11-12 y Tabla 11-13 se muestran los resultados de “Descenso máximo” y “Descenso adicional” para la fecha de mayor descenso del caso Con Proyecto.

**Tabla 11-11 Descenso máximo en puntos de observación y verificación del perfil La Punta – La Brava Esc2**

Descenso máximo (m), referido a nivel fecha 31 de diciembre de 2013 (Sistema La Punta – La Brava)							
Simulación	OB-PB-06	PN-16B	OB-PB-01	OB-PB-02	OB-PB-03	OB-PB-04	OB-PB-07
Esc2-CB	0,44	0,4	0,31	0,01	0,01	0,00	0,00
Esc2-CP	0,86	0,75	0,52	0,02	0,01	0,00	0,00
Descenso adicional (m), diferencia de nivel entre escenarios Esc2-CB y Esc2-CP							
Descenso adicional	0,42	0,34	0,21	0,01	0,00	0,00	0,00

Fuente: Elaboración propia

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA						
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA						

**Tabla 11-12 Descenso máximo en puntos de observación y verificación del perfil Peine Esc2**

Descenso máximo (m), referido a nivel fecha 31 de diciembre de 2013 (Sistema Peine)							
Simulación	PN-08A	OB-P-01	OB-P-02	OB-P-07	OB-P-03	OB-P-04	OB-P-05
Esc2-CB	0,42	0,07	0,03	0	<b>0,02</b>	<b>0,02</b>	<b>0,00</b>
Esc2-CP	0,77	0,17	0,07	0,03	<b>0,03</b>	<b>0,02</b>	<b>0,00</b>
Descenso adicional (m), diferencia de nivel entre escenarios Esc2-CB y Esc2-CP							
Descenso adicional	0,35	0,10	0,04	0,03	<b>0,01</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 11-13 Descenso máximo en puntos de observación y verificación del perfil Quelana Esc2**

Descenso máximo (m), referido a nivel fecha 31 de diciembre de 2013 (Sistema Aguas de Quelana)							
Simulación	OB-Q-01	L3-9	OB-Q-02	L3-5	L3-3	L3-15	OB-Q-03
Esc2-CB	0,12	<b>0,07</b>	0,07	<b>0,08</b>	<b>0,25</b>	<b>0,29</b>	0,40
Esc2-CP	0,14	<b>0,07</b>	0,07	<b>0,08</b>	<b>0,25</b>	<b>0,29</b>	0,40
Descenso adicional (m), diferencia de nivel entre escenarios Esc2-CB y Esc2-CP							
Descenso adicional	0,01	<b>0,00</b>	0,00	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	0,00

Fuente: Elaboración propia

Tal como se indica en la Tabla 11-11 y en la Tabla 11-12, se obtienen descensos adicionales en la salmuera de hasta 42 y 35 cm en los perfiles de La Punta – La Brava (OB-PB-06) y de Peine (PN-08A), respectivamente.

En esta simulación los descensos también disminuyen desde el extremo del perfil en el Núcleo hacia el acuífero, resultando que en los puntos de evaluación prioritarios, los descensos máximos esperados son inferiores a 1 y 3 cm en los perfiles de La Punta-La Brava y de Peine, respectivamente.

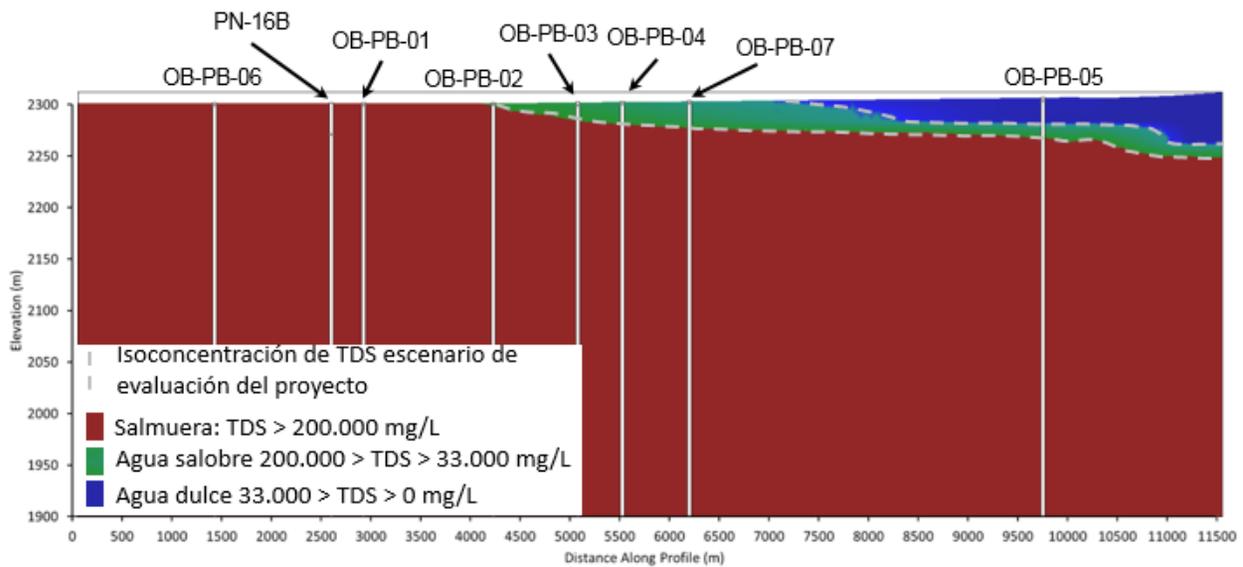
En los resultados correspondientes al perfil de Quelana (Tabla 11-13), las diferencias entre ambos casos (Caso Base y Con Proyecto) son también insignificantes en todos los puntos de observación, con descensos adicionales inferiores a 1 cm. Sin embargo, los descensos máximos previstos en este perfil (29 cm en L3-15) son mayores a los de los otros dos perfiles aludidos, similar a lo obtenido en el escenario de evaluación del proyecto. Esto, debido a la influencia del bombeo de agua dulce que SQM realiza desde sus pozos en el acuífero aluvial del Borde Este del Salar.

- **Evaluación de distribución de TDS y de la posición de la Interfase**

Se han comparado las distribuciones de TDS de los escenarios Esc1-CP y Esc2-CP, con el fin de evaluar si el escenario de recarga reducida, en la situación Con Proyecto, causaría variaciones significativas en la distribución de este parámetro respecto al escenario de evaluación del Proyecto y, por lo tanto, también en la posición y/o forma de la interfase existente entre salmuera y agua salobre en caso de que se produjera un período de menor recarga.

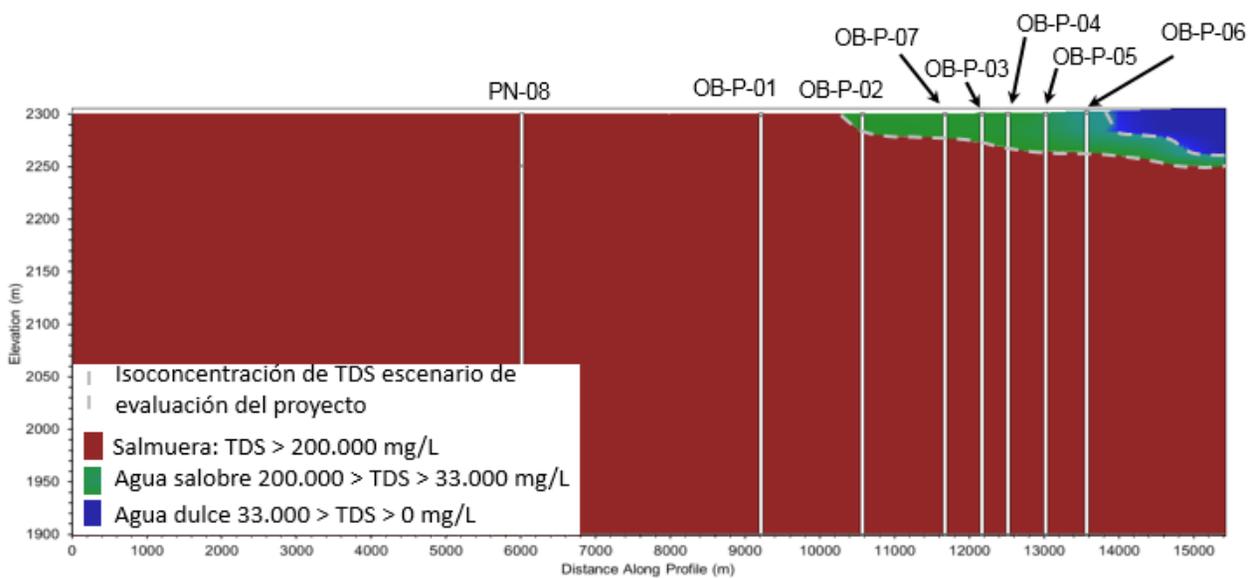
En la Figura 11-37, Figura 11-38 y Figura 11-39 se muestra la distribución de TDS para diciembre de 2040, fecha que corresponde al término del Proyecto, y con una línea segmentada se identifica el límite entre salmuera y agua salobre y el límite de los 33.000 mg/L de TDS para la misma fecha en el escenario Esc1-CP.

**Figura 11-37 Concentración de TDS en perfil La Punta – La Brava. Esc2-CP versus Esc1-CP (línea discontinua)**



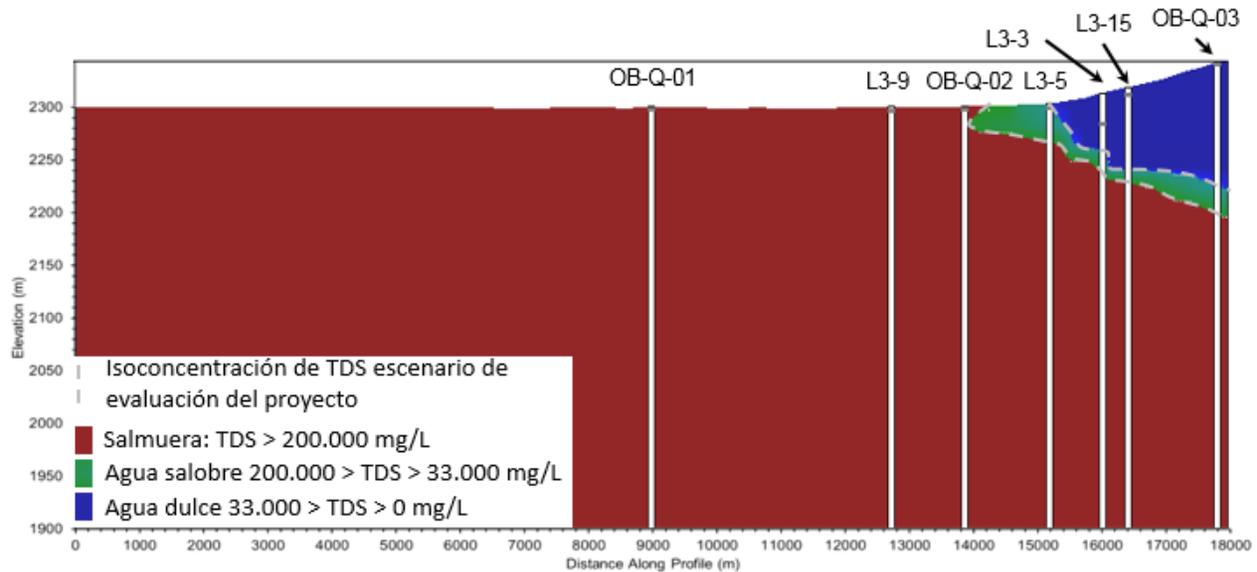
Fuente: Elaboración propia

**Figura 11-38 Concentración de TDS en perfil Peine. Esc2-CP versus Esc1-CP (línea discontinua)**



Fuente: Elaboración propia

**Figura 11-39 Concentración de TDS en perfil Quelana. Esc2-CP versus Esc1-CP (línea discontinua)**



Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a lo observado en las figuras anteriores, con la simulación de disminución de la recarga, además de no verse afectados los niveles en los puntos prioritarios, la concentración de TDS se mantiene prácticamente igual a la observada en la simulación Esc1-CP, y por lo tanto, la posición de la interfase también. Con esto se comprueba que la operación del Proyecto no afecta la posición de la interfase ni los niveles en el área de alimentación de las lagunas.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

## 11.6 Otros escenarios para evaluación

### 11.6.1 Escenario de Incremento del Uso de Agua Dulce-salobre (Esc3)

Este escenario tiene por objetivo verificar el comportamiento del sistema, en cuanto a los niveles en el Núcleo y en la Zona Marginal, ante una explotación de agua dulce-salobre, por parte de terceros, mayor a la prevista en la Cuenca. Lo anterior consiste en que los usuarios que hoy tienen derechos de aprovechamiento constituidos realicen una extracción más intensiva de sus derechos de aprovechamiento, respecto a la prevista según los coeficientes de uso obtenidos de la bibliografía existente y que se detallaron en el punto 5.1.3 de este Anexo.

Dicho lo anterior, este escenario mantiene las condiciones de recarga del Escenario de Evaluación del Proyecto (Esc1), así como los montos de extracción de salmuera y de agua dulce-salobre del titular.

El resultado de los niveles simulados en los modelos MODFLOW y SEAWAT para este escenario se presentan también en el Apéndice K1 para todo el período de simulación.

#### 11.6.1.1 Descripción del Escenario de Incremento del Uso de Agua dulce-salobre

Como se explica detalladamente en el capítulo 5, en la cuenca del Salar de Atacama existen distintos usuarios que extraen agua dulce, principalmente desde el Norte, Borde Este y Borde Sur del Salar de Atacama. Los derechos otorgados alcanzan los 5.107,7 L/s, de los cuales un 60,2% corresponden a agua subterránea y un 39,8% a superficial. El uso principal que tienen estos derechos es minero, seguido por el uso en riego.

En base a los antecedentes disponibles y con el fin de estimar la explotación real en la cuenca del Salar, se establecieron los factores de uso para el agua subterránea explotada en el acuífero, que se presentan en la Tabla 5-8 incluida en el Capítulo 5. Con respecto a las aguas superficiales utilizadas para riego, se consideró un factor de uso de 0,6 (60%) según se indica en el capítulo mencionado. Estos factores fueron utilizados para el cálculo de la recarga y determinación de los bombeos para el Escenario de Evaluación del Proyecto.

Un escenario ambientalmente desfavorable en cuanto al uso de agua desde el acuífero, sería aquel en el cual la explotación de los derechos de agua sea mayor a la estimada según los factores de uso establecidos, lo que disminuiría levemente la recarga subterránea afluente al Salar y aumentaría los bombeos en el área modelada. Para determinar la respuesta de los niveles en el Salar a una explotación en la Cuenca mayor a la estimada y utilizada para el Escenario de Evaluación del Proyecto (Esc1), se simuló un escenario que considera un factor de uso de 0,89 (89%) para todos los derechos con factores de uso desconocido, ya sean de naturaleza superficial o subterránea, como se observa en la Tabla 11-14.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

Este factor de uso, considera el mayor uso anual registrado para los diferentes usos de agua y corresponde al de la minería en el año 2009, (ver Figura 5-5). Este ejercicio se realiza con el objetivo de evaluar un escenario desfavorable, que podría ser posible aunque es poco realista, pues representa una situación en la que todos los usuarios destinarían sus derechos a este uso.

**Tabla 11-14 Factores de uso derechos subterráneos otorgados en la Cuenca**

Naturaleza	Uso	Factor de uso (%)	
		Estimado Esc1	Esc3
Subterránea	Minero (Otros)	66	89
	Riego	60	
	Bebida/Uso Doméstico/Saneamiento	75	
	Otros Usos	75	
Superficial	Riego	60	

Fuente: Elaboración propia

En el caso de los bombeos de agua dulce vinculados a proyectos con autorización ambiental, se consideró un factor de uso de 1 (100%) respecto a lo aprobado ambientalmente, como se muestra en la Tabla 11-15.

**Tabla 11-15 Caudales de extracción de agua dulce y salobre**

Usuario	Pozo	Caudal extraído (L/s)	
		Escenario de evaluación del Proyecto (Esc1)	Escenario Incremento del uso de agua dulce – salobre (Esc3)
SQM	Allana	38,6	40,0
	Camar 2	57,8	60,0
	Mullay 1	38,9	40,0
	P2	29,3	35,0
	Socaire 5	62,2	65,0
Rockwood	Tucúcaro	8,4	8,4
	Tilopozo	8,5	8,5

Fuente: Elaboración propia

Las extracciones de agua que se producen fuera del área del modelo fueron incorporadas al balance hídrico en base a los volúmenes reportados e incorporadas al cálculo de la recarga lateral implementada como condición de borde en el modelo numérico.

Para las extracciones de uso minero de MEL y CMZ, en el caso del período de predicción, se utilizaron los volúmenes estimados por estas compañías en el acuífero Monturaqui-Negrillar-Tilopozo (MEL, 2015) para los años 2015 y 2016, que hacen un promedio anual de 1.575 L/s. Para los años posteriores se utilizaron el 100% de los derechos de aprovechamiento de aguas ambientalmente autorizados de 1.800 L/s hasta mayo de 2020, fecha en que se estimó el fin de las extracciones por alcanzar una volumen acumulado que equivale a una reducción de flujo pasante del 6%. Esto según lo indica el PAT de esta compañía (MEL, 2015)

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

Las extracciones de salmuera no se modificaron con respecto a las utilizadas en la simulación del escenario de evaluación del Proyecto (Esc1).

En este escenario, de la misma manera que en los escenarios anteriores, se simulan dos casos, a saber: Caso Base (Esc3-CB) y caso Con Proyecto (Esc3-CP). Ambos consideran el aumento de extracción de agua dulce-salobre desde el acuífero, sin embargo el primero de ellos no considera el aumento de extracción de salmuera por parte de Rockwood y el segundo si lo hace.

### 11.6.1.2 Resultados del Escenario de Incremento del Uso de Agua dulce-salobre

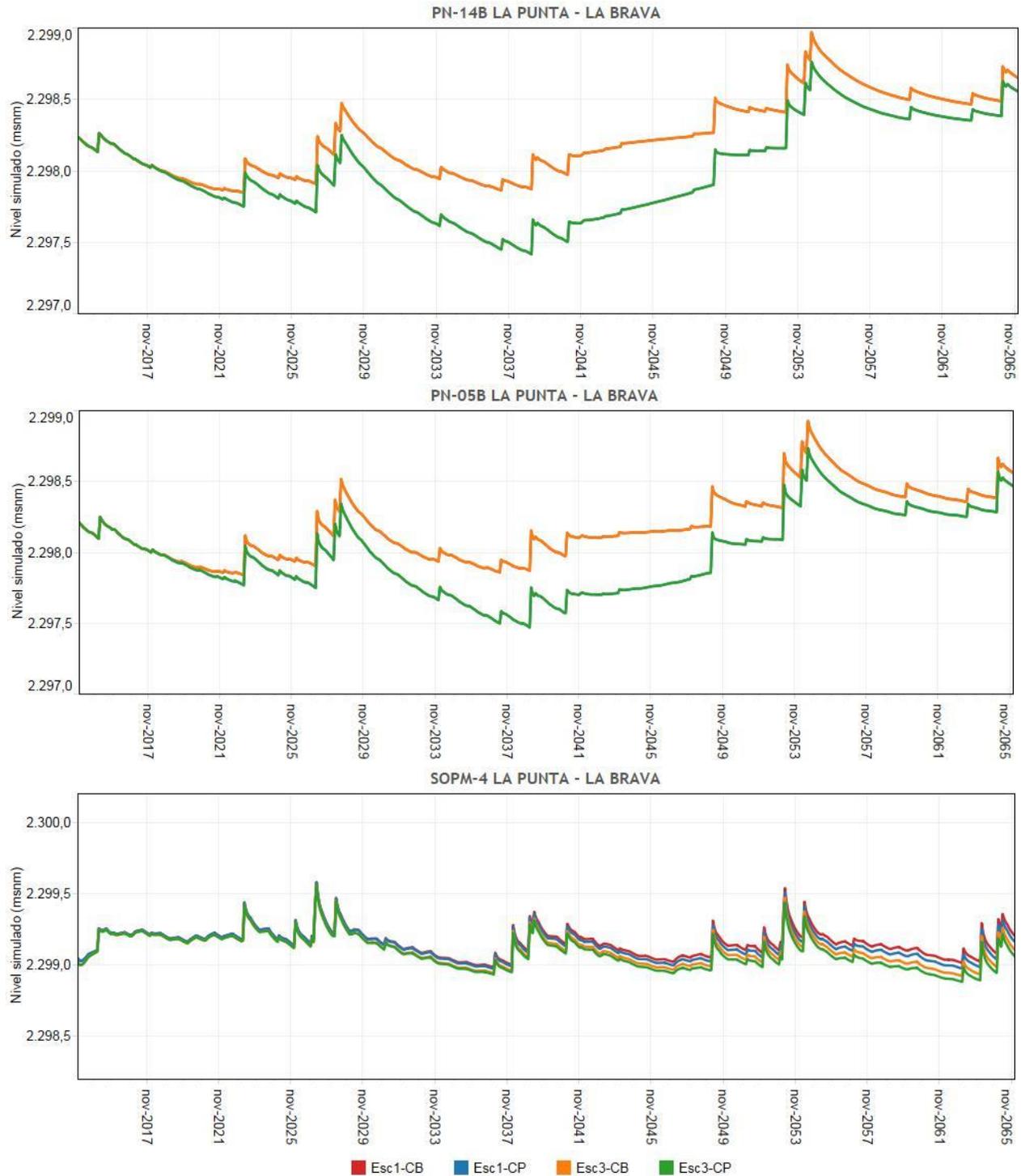
#### 11.6.1.2.1 Resultados MODFLOW

##### 11.6.1.2.1.1 Niveles

A continuación se presentan los niveles simulados por MODFLOW en los puntos considerados como input para el modelo SEAWAT para el Caso Base (Esc3-CB) y Con Proyecto (Esc3-CP) del escenario de incremento del uso del agua dulce-salobre.

En la Figura 11-40 se muestran los niveles simulados en los puntos PN-14B, PN-05B y SOPM-4 que corresponden a la condición de borde utilizada por SEAWAT para la modelación de los perfiles La Punta – La Brava, Peine y Quelana, respectivamente. En esta figura se incluyen los resultados de este escenario, así como los del Esc1 (Evaluación de Proyecto), lo que permite comparar este escenario ambientalmente desfavorable, desde el punto de vista de uso de agua, con el Escenario de Evaluación del Proyecto.

**Figura 11-40 Evolución de niveles simulados en puntos de control SEAWAT Esc1 y Esc3**



Fuente: Elaboración propia

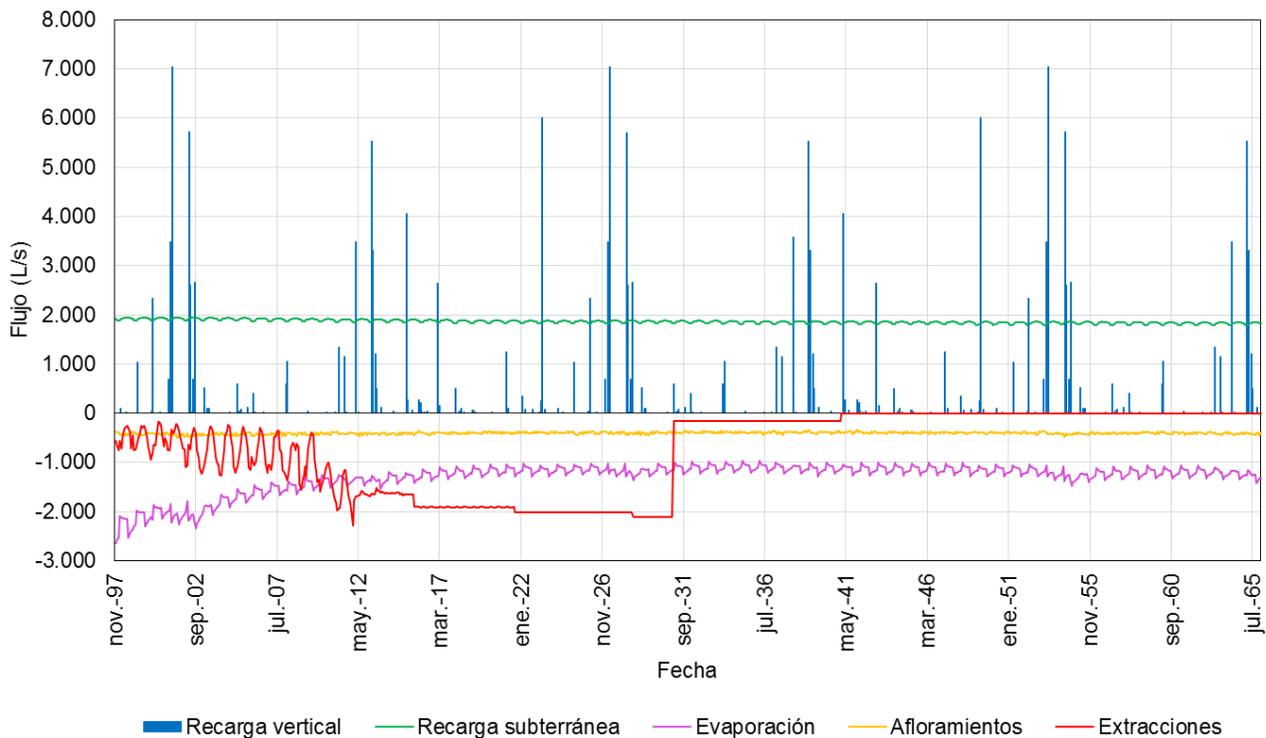
Como se muestra en los gráficos anteriores, en los puntos PN-14B y PN-05B no hay efecto por un incremento al uso del agua dulce-salobre. Sin embargo, se observa que sólo el nivel en el punto SOPM-4 es sensible al factor de uso, ya que el descenso máximo del caso Esc3 en la situación sin y con proyecto es de 0,11 y 0,15 m respectivamente (descenso adicional de 0,04 m), mientras que los descensos del escenario de evaluación (Esc1), son menores, siendo de 0,05 y 0,06 m, para los casos sin y con proyecto, respectivamente (descenso adicional de 0,01 m). Con esto, se deduce que el descenso adicional del proyecto en el punto SOPM-4 es 3 cm mayor producto del aumento de los factores de uso de los derechos de aprovechamiento de agua dulce-salobre.

Considerando lo anterior, sólo se simuló en SEAWAT el perfil de Quelana, resultados que se muestran en el punto 11.3.2.2.2.

#### 11.6.1.2.1.2 Flujos

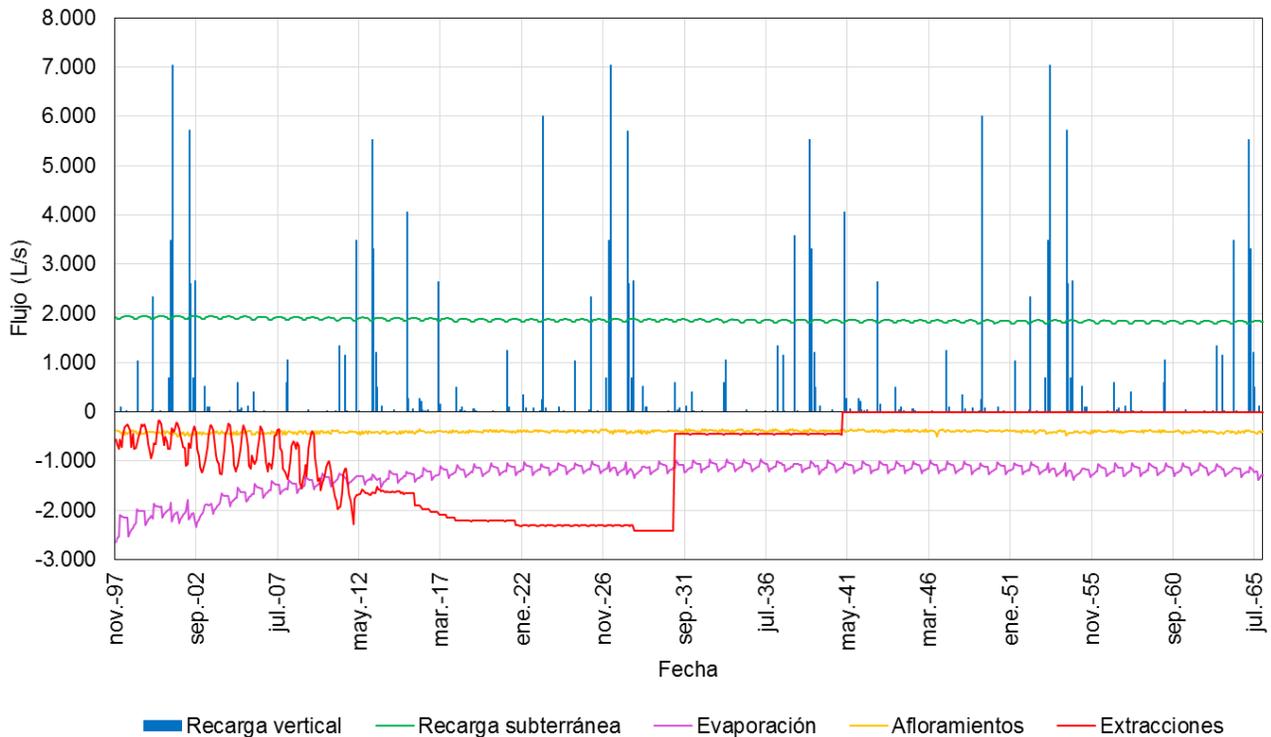
La consistencia de los flujos de entrada y salida simulados por el modelo se verificó a partir de los resultados que muestran la Figura 11-41 y en la Figura 11-42 para Esc3-CB y Esc3-CP respectivamente.

**Figura 11-41 Flujos de entrada y salida Esc3-CB**



Fuente: Elaboración propia

**Figura 11-42 Flujos de entrada y salida Esc3-CP**



Fuente: Elaboración propia

Al comparar la figura anterior con la Figura 11-16 (Esc1-CB), se observa que la recarga vertical que representa la precipitación directa no cambia, mientras que la entrada por recarga subterránea disminuye levemente desde el principio de la simulación.

Con respecto a las salidas del sistema, las extracciones son levemente superiores al considerar un factor de uso de los derechos de aprovechamiento de agua dulce-salobre mayor al probable. Para evaluar los cambios en la evaporación y en los afloramientos simulados, se calculó el promedio de estos flujos en el período 01/01/2014 – 31/12/2065 y se comparó con los promedios calculados para el escenario de evaluación presentados en el punto 11.4.2.1.2, lo que se incluye en la Tabla 11-16.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

**Tabla 11-16 Flujos de salida en escenarios Esc1 y Esc3**

Caso de simulación	Escenario de evaluación del Proyecto (Esc1)		Escenario incremento del uso de agua dulce-salobre (Esc3)	
	Evaporación (L/s)	Afloramientos (L/s)	Evaporación (L/s)	Afloramientos (L/s)
Caso Base	1.775,0	410,5	1.306,2	404,9
Con Proyecto	1.748,4	409,2	1.292,8	401,5
Diferencia entre casos	-26,6	-1,3	-13,4	-3,4

Fuente: Elaboración propia

Se observa que al incrementar el uso de agua dulce, la diferencia entre las salidas por evaporación y afloramientos en relación al Caso Base es de 13,4 L/s y 3,4 L/s, respectivamente.

En cuanto a la variación de los flujos de este escenario respecto al Escenario de Evaluación del Proyecto, tanto en el Caso Base como el Con Proyecto, se observa una disminución apreciable de la evaporación, que ocurriría principalmente en el sector Norte del Salar, donde se observaron diferencias en los niveles (p.e. en SOPM-4) mientras que en los pozos PN-14B y PN-05B, ubicados más hacia el centro - sur, no se observaron estas diferencias.

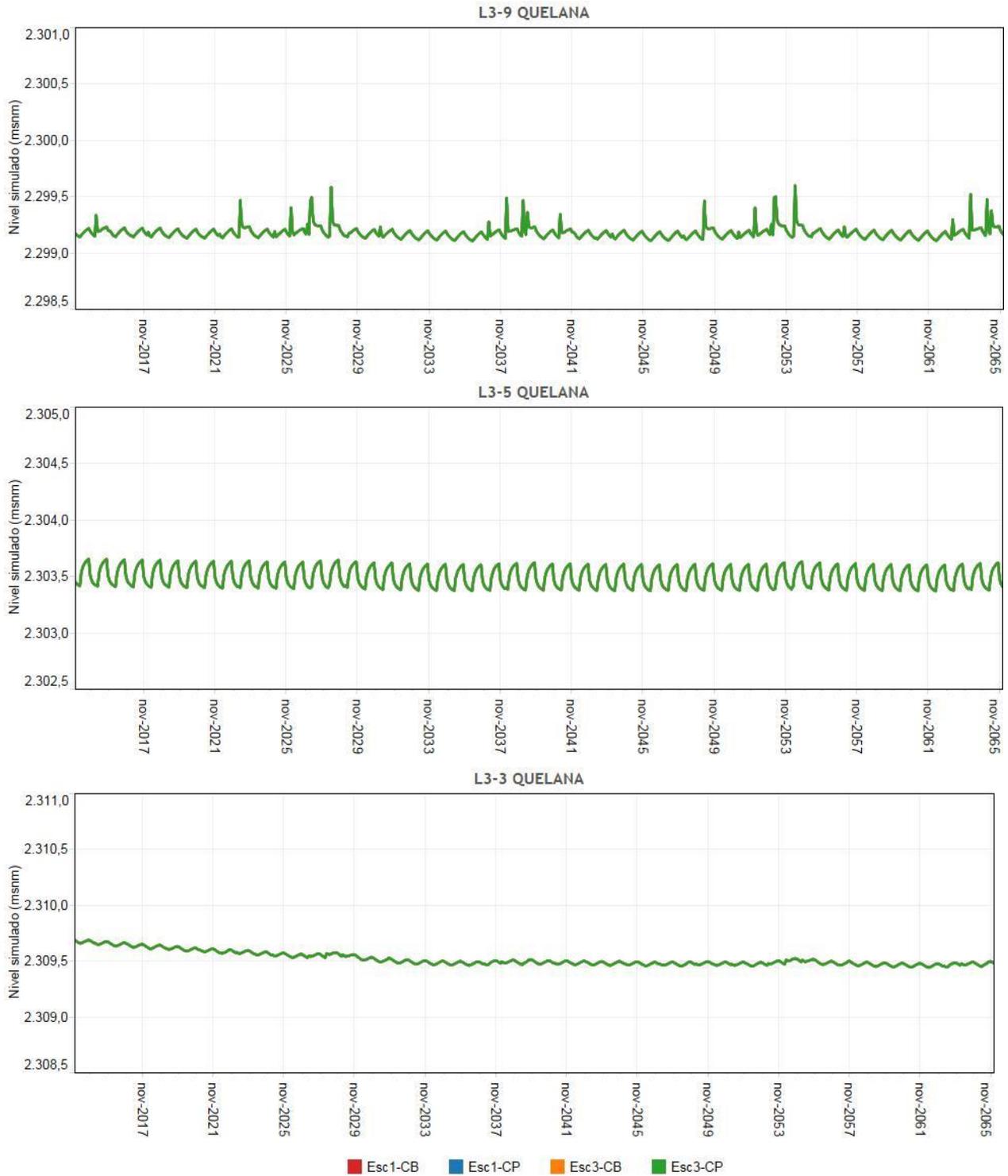
#### 11.6.1.2.2 Resultados SEAWAT

Considerando como input la tendencia del nivel simulado en MODFLOW, sólo se modeló el nivel en los puntos de observación del perfil Quelana ya que, como se señaló anteriormente, en los sectores de La Punta-La Brava y de Peine, no hay variación de los niveles simulados en el escenario Con Proyecto respecto del Caso Base.

El nivel simulado en los puntos prioritarios del perfil Quelana (L3-9, L3-5, L3-3 y L3-15) se observan en la Figura 11-43.

Cabe señalar que algunas de las series de nivel representadas en los gráficos siguientes son coincidentes, por lo que sólo se aprecia aquella que representa al escenario analizado Con Proyecto, ya que el resto de series se encuentran bajo ésta y no se visualizan en el gráfico.

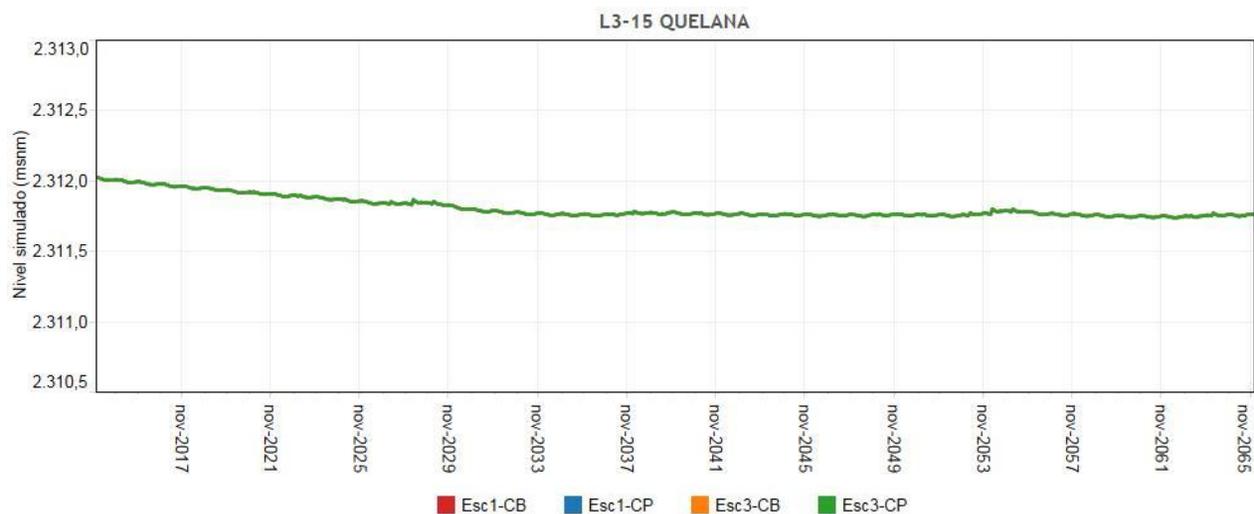
**Figura 11-43 Nivel simulado en puntos de observación prioritarios del perfil Quelana Esc1 y Esc3**



Fuente: Elaboración propia

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

**Figura 11-43 Nivel simulado en puntos de observación prioritarios del perfil Quelana Esc1 y Esc3 (cont)**



Fuente: Elaboración propia

Como se observa en los gráficos anteriores, no se presentan diferencias significativas del nivel simulado por SEAWAT en los puntos prioritarios del perfil de Quelana entre los escenarios Esc3-CB y Esc3-CP, ni tampoco con los escenarios Esc1-CB y Esc1-CP.

Los resultados de descenso para todos los puntos de observación del perfil de Quelana se muestran en la Tabla 11-17.

**Tabla 11-17 Descenso máximo en puntos de observación del perfil Quelana Esc3**

Descenso máximo (m), referido a nivel fecha 31 de diciembre de 2013 (Sistema Aguas de Quelana)							
Simulación	OB-Q-01	L3-9	OB-Q-02	L3-5	L3-3	L3-15	OB-Q-03
Esc3-CB	0,14	<b>0,07</b>	0,07	<b>0,08</b>	<b>0,25</b>	<b>0,29</b>	0,40
Esc3-CP	0,16	<b>0,07</b>	0,07	<b>0,08</b>	<b>0,25</b>	<b>0,29</b>	0,40
Descenso adicional (m), diferencia de nivel entre escenarios Esc3-CB y Esc3-CP							
Descenso adicional	0,02	<b>0,00</b>	0,00	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	0,00

Fuente: Elaboración propia

Los niveles simulados en los puntos de observación prioritarios ubicados sobre el perfil de Quelana, como se muestra en la Figura 11-43, son muy similares a los del escenario de evaluación del Proyecto (Figura 11-20), por lo que en un escenario ambientalmente desfavorable en relación al factor de uso de las extracciones, el Proyecto tampoco produce efectos en los sistemas lagunares.

Debido a que los cambios en los niveles fueron muy pequeños, no se presenta la distribución de TDS ni la ubicación de la interfase salina ya que se considera que se mantienen con respecto al Escenario de Evaluación del Proyecto.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

### 11.6.2 Escenario de Movilidad al Este de los Pozos Rockwood (Esc4)

Este escenario ha sido desarrollado a modo de ejercicio, con el fin de analizar la influencia de la distribución de pozos al interior del área A-1, desde donde se extraerán los 300 L/s considerados por el proyecto en evaluación, simulando una distribución de estos pozos lo más al Este posible dentro de dicha área descontando las áreas de pozas y otras instalaciones industriales de la compañía.

De la misma manera que en el escenario de incremento de uso de agua dulce, este escenario busca verificar el comportamiento del sistema, en cuanto a los niveles en el Núcleo y en la Zona Marginal, ante un cambio en la distribución espacial de explotación de salmuera por parte de Rockwood.

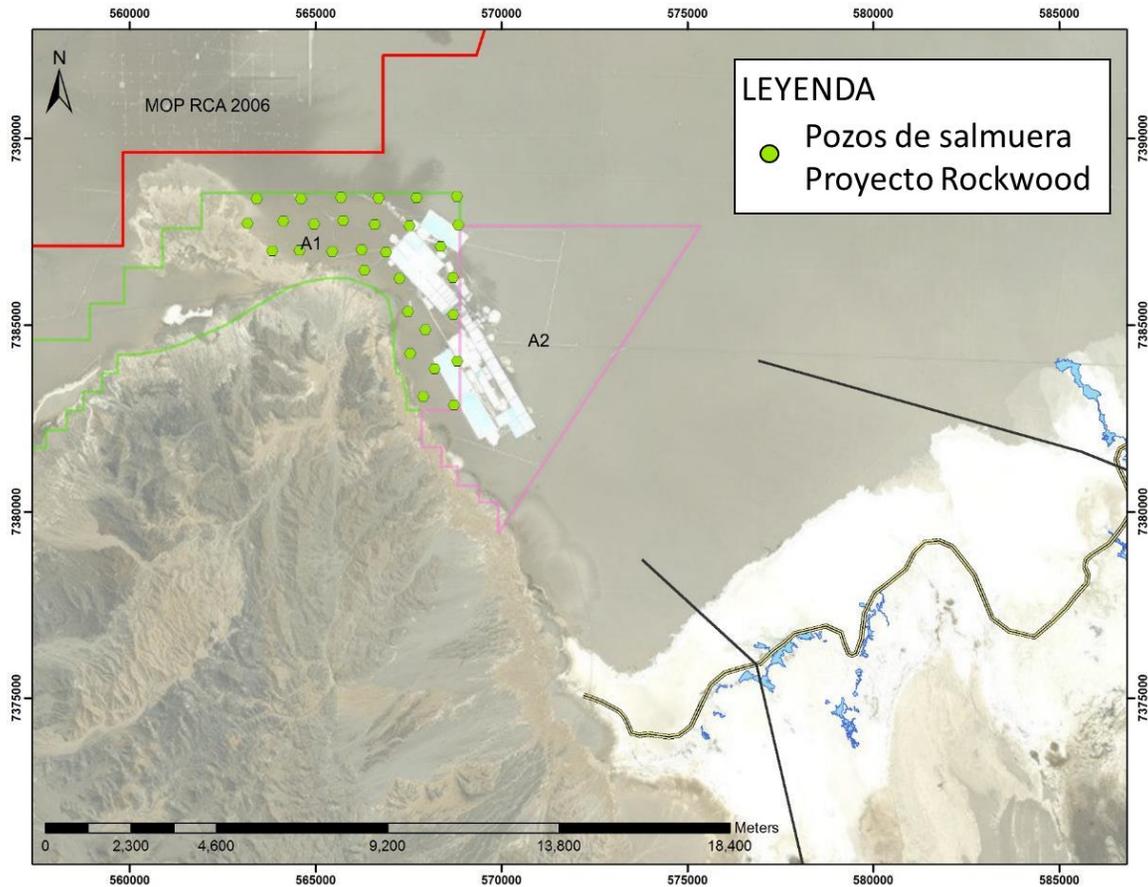
Aunque este escenario pudiera considerarse como ambientalmente desfavorable en cuanto a la ubicación de las extracciones de Rockwood, éste corresponde a una situación no realista, conforme al supuesto de una explotación que permita una gestión operativa, y la no generación de descensos más allá de los previstos.

Los resultados de los niveles simulados en los modelos MODFLOW y SEAWAT para el escenario de movilidad al Este de los pozos Rockwood se presentan en el Apéndice K1 para todo el período de simulación.

#### *11.6.2.1 Descripción del Escenario de Movilidad al Este de los Pozos Rockwood*

En este escenario se han ubicado los nuevos pozos de Rockwood al Este de la Península Chépica, de tal manera que reflejen una distribución aproximadamente uniforme y compatible con las infraestructuras actualmente presentes (otros pozos de extracción, pozas de evaporación, caminos, etc.). En la Figura 11-44, se presenta la ubicación simulada para este escenario.

**Figura 11-44 Ubicación de pozos del proyecto de Rockwood al Este del área A-1 (Esc4-CP)**



Fuente: Elaboración propia

En este escenario, donde se busca evaluar el comportamiento del sistema para una configuración de explotación de los pozos de producción de Rockwood al interior del sector A-1, solo se ha simulado el caso con proyecto (Esc4-CP), por cuanto el caso base corresponde al presentado en el Escenario de Evaluación del Proyecto (Esc1-CB), y son estos los que se presentan como punto de comparación.

Al comparar el caso con proyecto de este escenario (Esc4-CP) con el caso base del Esc1-CB, se logra visualizar la incidencia que tiene en la Zona Marginal, una modificación en la distribución espacial de los pozos de Rockwood al interior de la zona A-1.

Cabe señalar que las variables hídricas y de caudal bombeado de este escenario son las mismas que las del Escenario de Evaluación del Proyecto.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

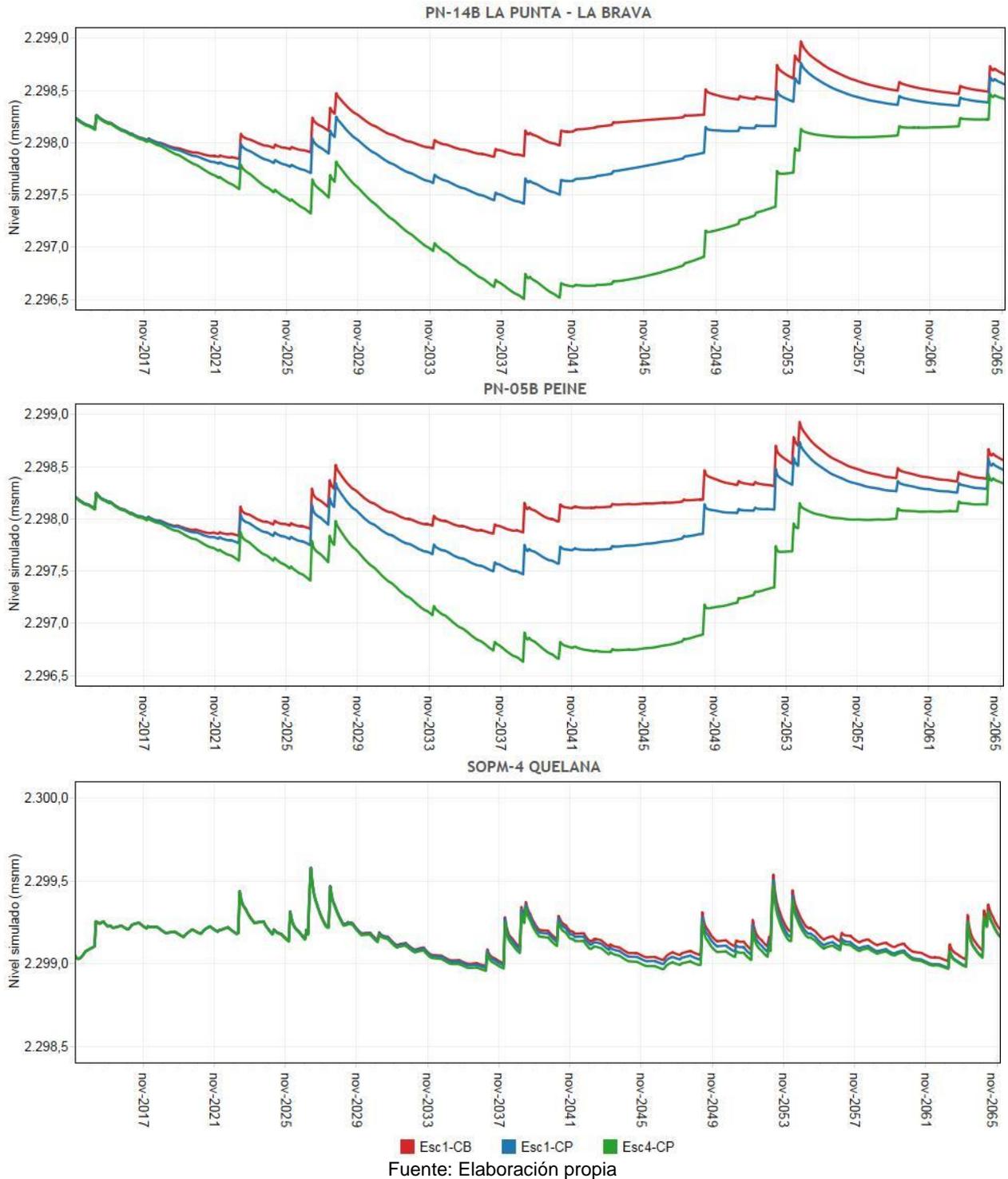
### 11.6.2.2 Resultados del Escenario de Movilidad al Este de los Pozos Rockwood

#### 11.6.2.2.1 Resultados MODFLOW

##### 11.6.2.2.1.1 Niveles

En la Figura 11-45 se muestran los gráficos de niveles simulados por MODFLOW para el escenario de Movilidad al Este de Pozos Rockwood para el caso Con Proyecto (Esc4-CP), que son comparados con los Caso base (Esc1-CB) y Con proyecto (Esc1-CP) del Escenario de Evaluación del Proyecto. En estos gráficos se observa que las fechas de máximo descenso se mantienen en relación al escenario de evaluación del proyecto, sin embargo el descenso con respecto al nivel de diciembre 2013 aumenta considerablemente, salvo en el SOPM-4, donde es muy similar.

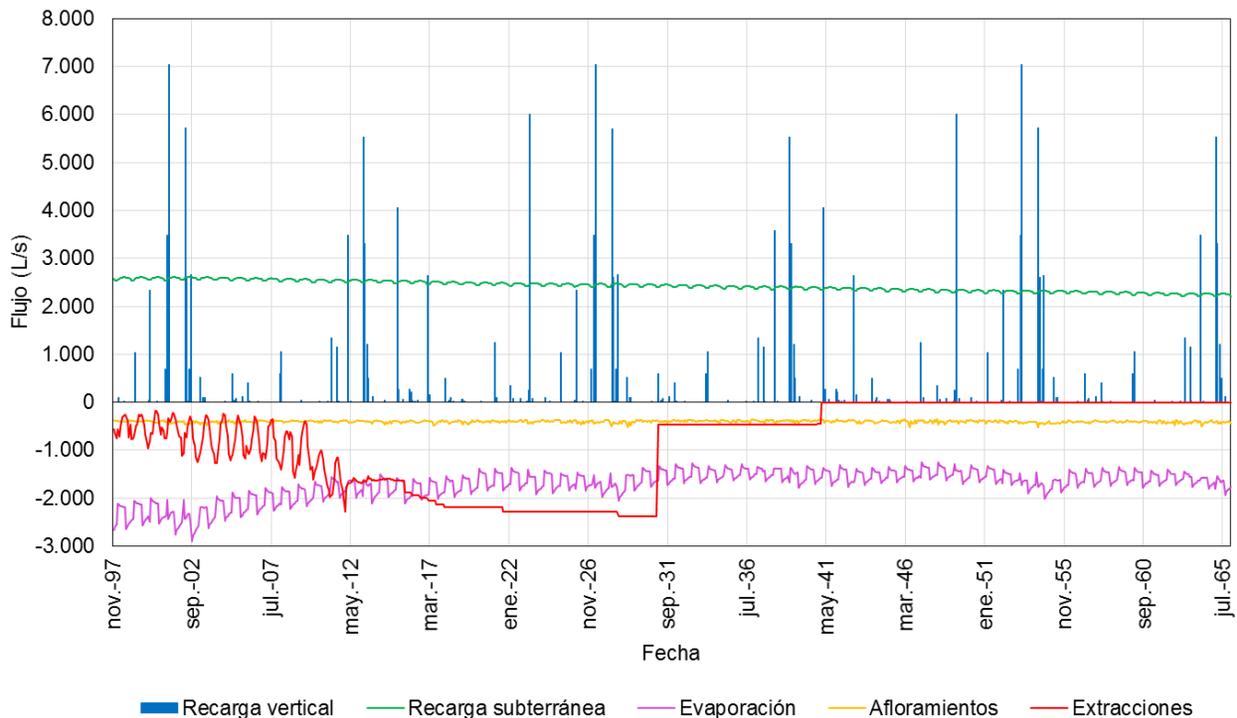
**Figura 11-45 Evolución de niveles simulados en puntos de control SEAWAT Esc1 y Esc4**



### 11.6.2.2.1.2 Flujos

Al igual que para los escenarios presentados en los puntos anteriores, en la Figura 11-46 se muestran los flujos de entrada y salida simulados por el modelo para verificar la consistencia de éstos.

**Figura 11-46 Flujos de entrada y salida Esc4-CP**



Al comparar la figura anterior con la Figura 11-16 (Esc1-CB), se observa que la recarga vertical y la subterránea no cambian. Con respecto a las salidas del sistema, las extracciones son iguales, ya que sólo se cambió la ubicación de los pozos. Para evaluar los cambios en la evaporación y en los afloramientos simulados, se calculó el promedio de estos flujos en el período 01/01/2014 – 31/12/2065 y se comparó con los promedios calculados para el Escenario de Evaluación del Proyecto, presentado en el punto 11.4.2.1.2, lo que se muestra en la Tabla 11-18.

**Tabla 11-18 Flujos de salida en escenarios Esc1 y Esc4**

Caso de simulación	Escenario de evaluación del Proyecto (Esc1)		Escenario Movilidad al Este de Pozos Rockwood (Esc4)	
	Evaporación (L/s)	Afloramientos (L/s)	Evaporación (L/s)	Afloramientos (L/s)
Caso Base	1.775,0	410,5	1.775,0	410,5
Con Proyecto	1.748,4	409,2	1.718,2	403,8
Diferencia entre casos	-26,6	-1,3	-56,8	-6,8

Fuente: Elaboración propia

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

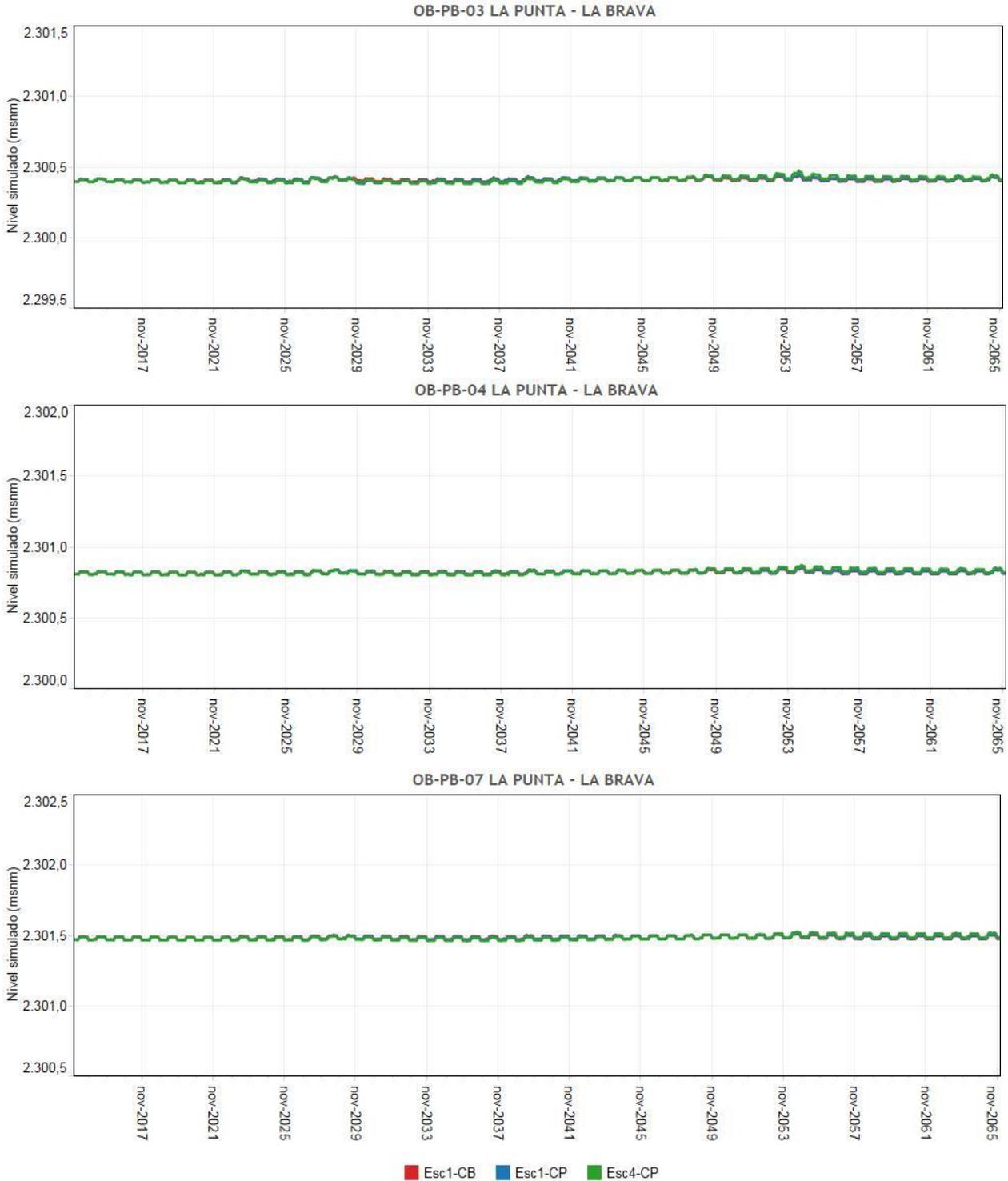
Se observa que al mover la extracción de los 300 L/s del proyecto al Este de la Península de Chépica los cambios en las salidas de evaporación y afloramientos son pequeños.

#### 11.6.2.2.2 Resultados SEAWAT

- **Evaluación de resultados – Variación de niveles**

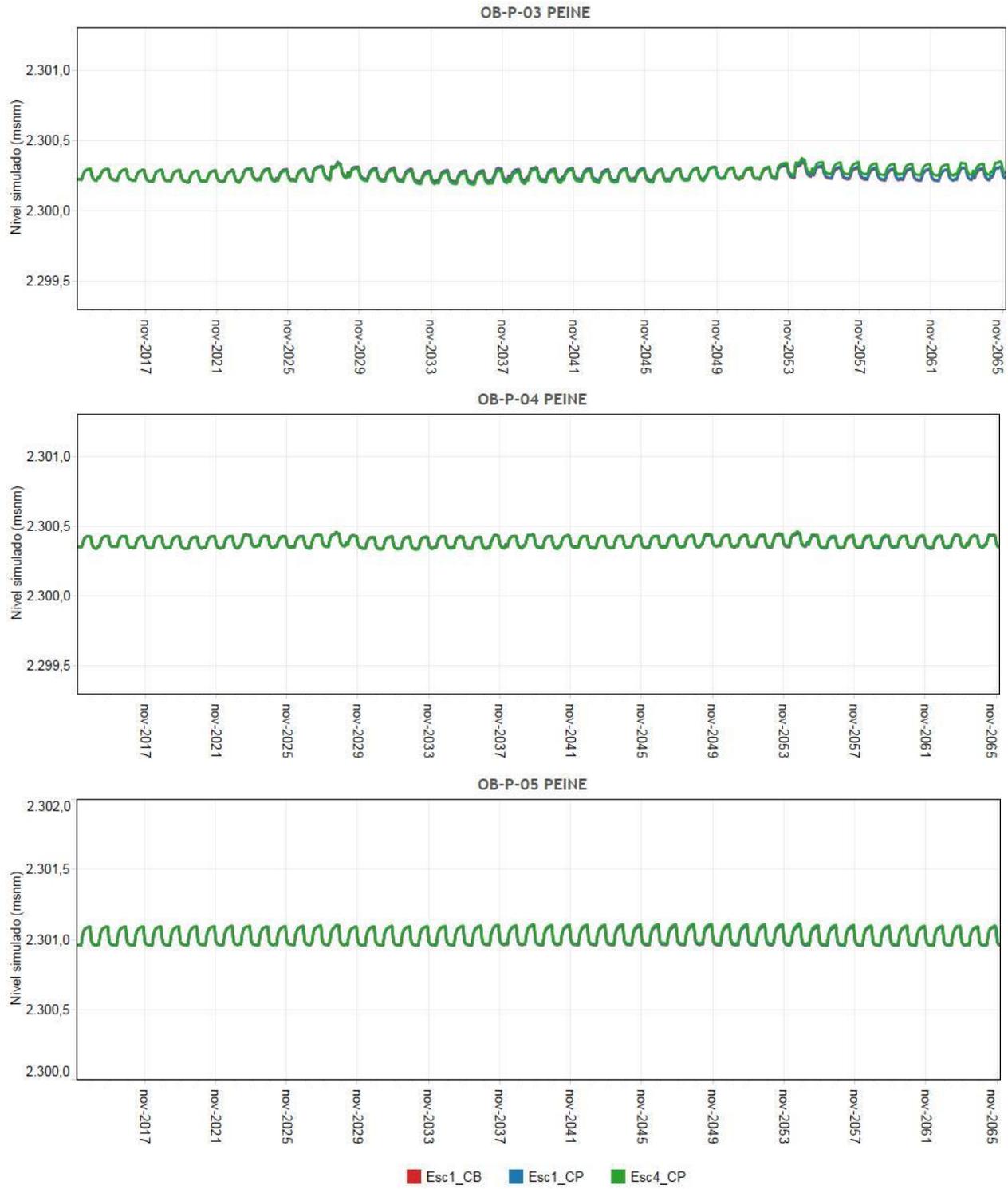
En la Figura 11-47, Figura 11-48 y Figura 11-49 se muestran los niveles simulados en los siguientes puntos considerados prioritarios. Cabe señalar que algunas de las series de nivel representadas en los gráficos siguientes son coincidentes, por lo que sólo se aprecia aquella que representa al escenario analizado Con Proyecto, ya que el resto de series se encuentran bajo ésta y no se visualizan en el gráfico.

**Figura 11-47 Nivel simulado en puntos de observación prioritarios del perfil La Punta – La Brava Esc1 y Esc4**



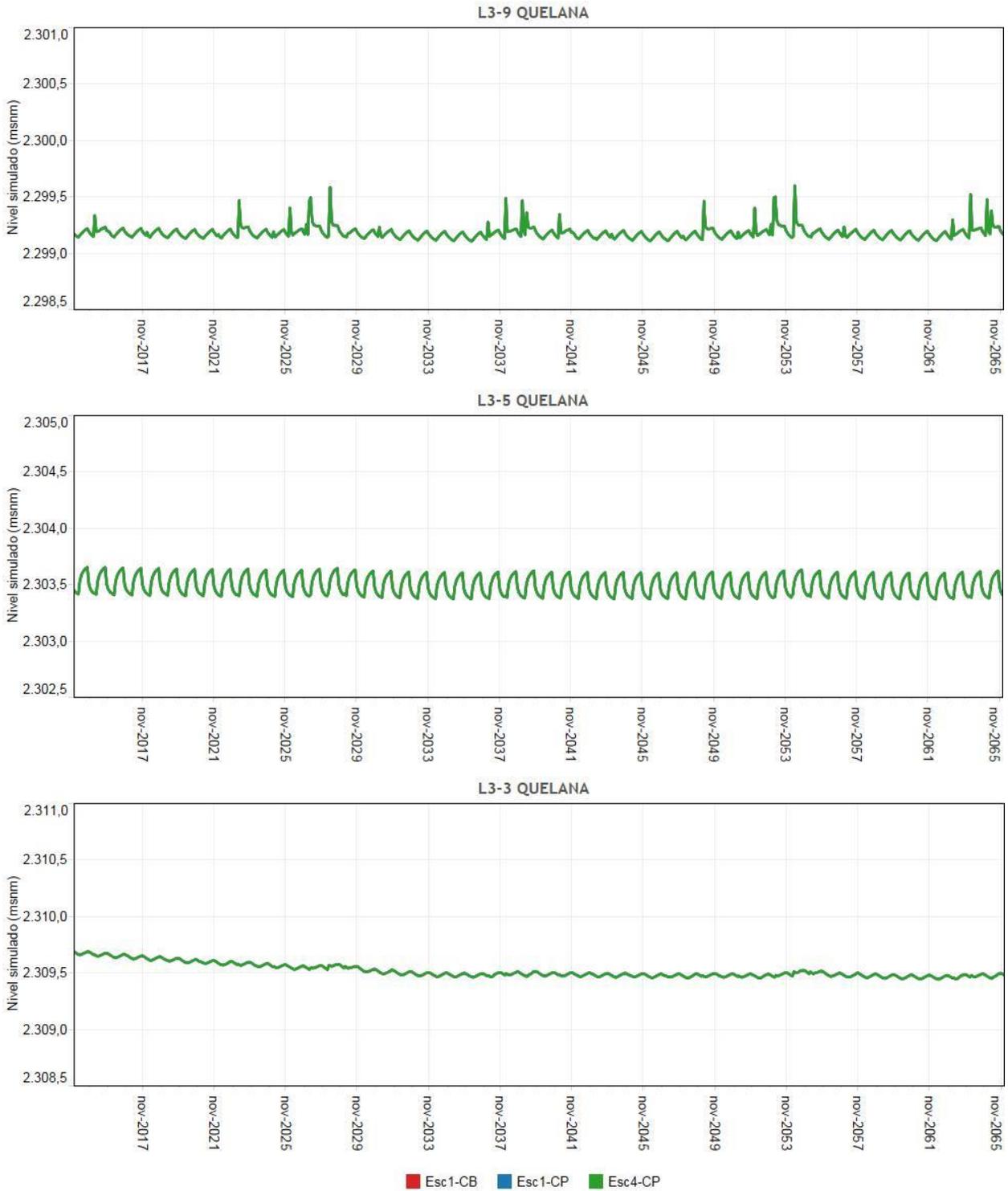
Fuente: Elaboración propia

**Figura 11-48 Nivel simulado en puntos de observación prioritarios del perfil Peine Esc1 y Esc4**



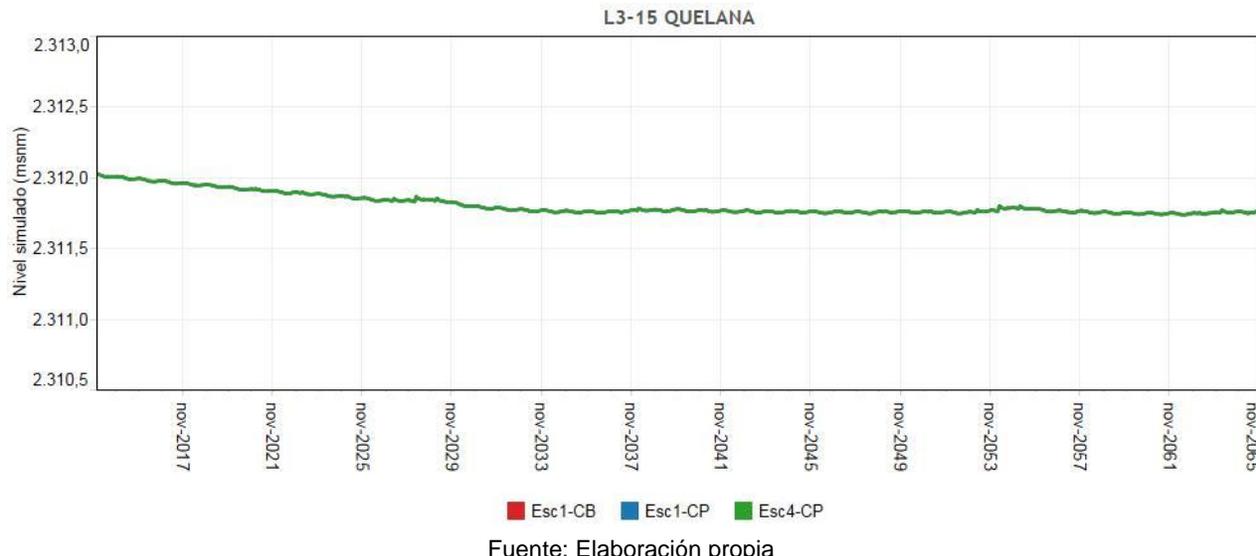
Fuente: Elaboración propia

**Figura 11-49 Nivel simulado en puntos de observación prioritarios del perfil Quelana Esc1 y Esc4**



Fuente: Elaboración propia

**Figura 11-49 Nivel simulado en puntos de observación prioritarios del perfil Quelana Esc1 y Esc4 (cont)**



Como se observa en los gráficos anteriores, no se aprecian diferencias significativas entre los escenarios Esc1-CB y Esc4-CP del nivel simulado por SEAWAT en los puntos prioritarios de cada perfil.

En la Tabla 11-19, Tabla 11-20 y Tabla 11-21 se muestran los descensos calculados en la fecha de máximo descenso para los escenarios Esc1-CB, Esc1-CP y Esc4-CP en los puntos de observación de los perfiles SEAWAT La Punta – La Brava, Peine y Quelana.

**Tabla 11-19 Descenso máximo en puntos de observación del perfil La Punta – La Brava Esc4**

Descenso máximo (m), referido a nivel fecha 31 de diciembre de 2013 (Sistema La Punta – La Brava)								
Simulación	OB-PB-06	PN-16B	OB-PB-01	OB-PB-02	OB-PB-03	OB-PB-04	OB-PB-07	OB-PB-05
Esc1-CB	0,26	0,14	0,23	0,00	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	0,03
Esc1-CP	0,66	0,5	0,44	0,02	<b>0,01</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	0,05
Esc4-CP	1,49	1,33	0,6	0,06	<b>0,02</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	0,07
Descenso adicional (m), diferencia de nivel entre escenarios Esc4-CP y Esc1-CB								
Descenso adicional	1,23	1,19	0,37	0,05	<b>0,02</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	0,04

Fuente: Elaboración propia

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA		
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA		

**Tabla 11-20 Descenso máximo en puntos de observación del perfil Peine Esc4**

Descenso máximo (m), referido a nivel fecha 31 de diciembre de 2013 (Sistema Peine)								
Simulación	PN-08A	OB-P-01	OB-P-02	OB-P-07	OB-P-03	OB-P-04	OB-P-05	OB-P-06
Esc1-CB	0,32	0,04	0,01	-0,01	<b>0,02</b>	<b>0,01</b>	<b>0,00</b>	0,00
Esc1-CP	0,65	0,13	0,04	0,02	<b>0,03</b>	<b>0,01</b>	<b>0,00</b>	0,00
Esc4-CP	1,33	0,33	0,12	0,07	<b>0,04</b>	<b>0,02</b>	<b>0,01</b>	0,00
Descenso adicional (m), diferencia de nivel entre escenarios Esc4-CP y Esc1-CB								
Descenso adicional	1,00	0,29	0,11	0,09	<b>0,02</b>	<b>0,01</b>	<b>0,00</b>	0,00

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 11-21 Descenso máximo en puntos de observación del perfil Quelana Esc4**

Descenso máximo (m), referido a nivel fecha 31 de diciembre de 2013 (Sistema Aguas de Quelana)							
Simulación	OB-Q-01	L3-9	OB-Q-02	L3-5	L3-3	L3-15	OB-Q-03
Esc1-CB	0,12	<b>0,07</b>	0,07	<b>0,08</b>	<b>0,25</b>	<b>0,29</b>	0,4
Esc1-CP	0,13	<b>0,07</b>	0,07	<b>0,08</b>	<b>0,25</b>	<b>0,29</b>	0,4
Esc4-CP	0,13	<b>0,07</b>	0,07	<b>0,08</b>	<b>0,25</b>	<b>0,29</b>	0,4
Descenso adicional (m), diferencia de nivel entre escenarios Esc4-CP y Esc1-CB							
Descenso adicional	0,01	<b>0,00</b>	0,00	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	0,00

Fuente: Elaboración propia

Tal como se indica en la Tabla 11-19 y en la Tabla 11-20, correspondientes a los perfiles de La Punta – La Brava y de Peine respectivamente, se obtienen descensos adicionales de hasta 1,23 m en la zona del perfil situada en el Núcleo (OB-PB-06).

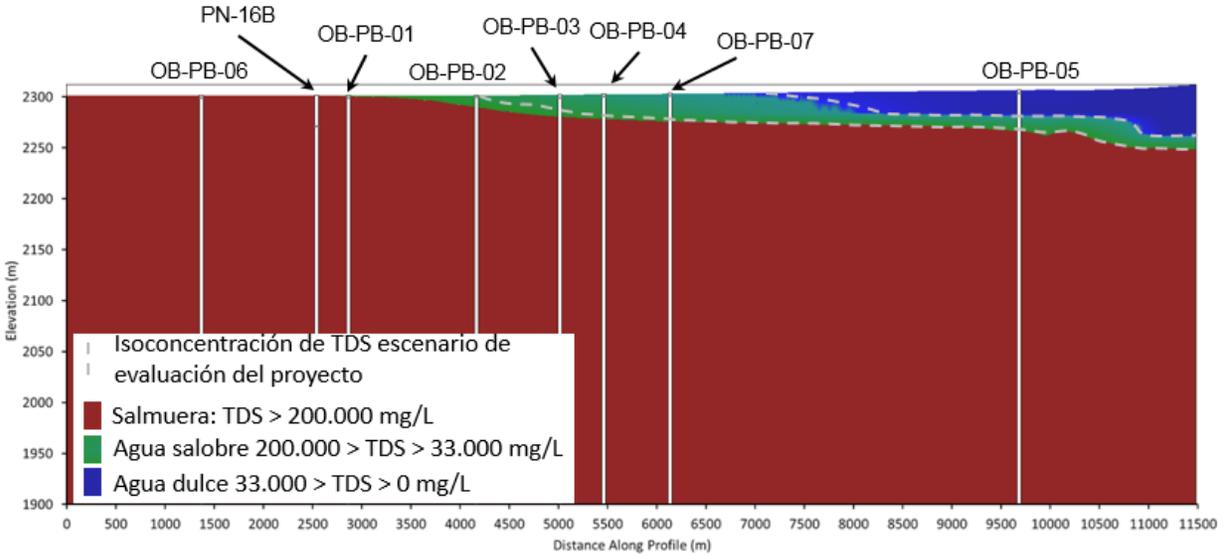
En cuanto a los puntos prioritarios, el descenso máximo con respecto a diciembre 2013 es de 4 cm (OB-P-03), mientras que el descenso adicional en dicho punto es de sólo 2 cm. En los resultados correspondientes al perfil de Quelana (Tabla 11-21), no se observan diferencias en relación a la simulación Esc1-CP.

- **Evaluación de distribución de TDS y de la posición de la Interfase**

Se han comparado las distribuciones de TDS en los casos Esc1-CP y Esc4-CP con el fin de evaluar si, en caso de que los pozos que extraen los 300 L/s adicionales se ubicaran al Este de la Península de Chépica, se producirían variaciones en la distribución de la concentración de TDS y en la posición de la Interfase salina.

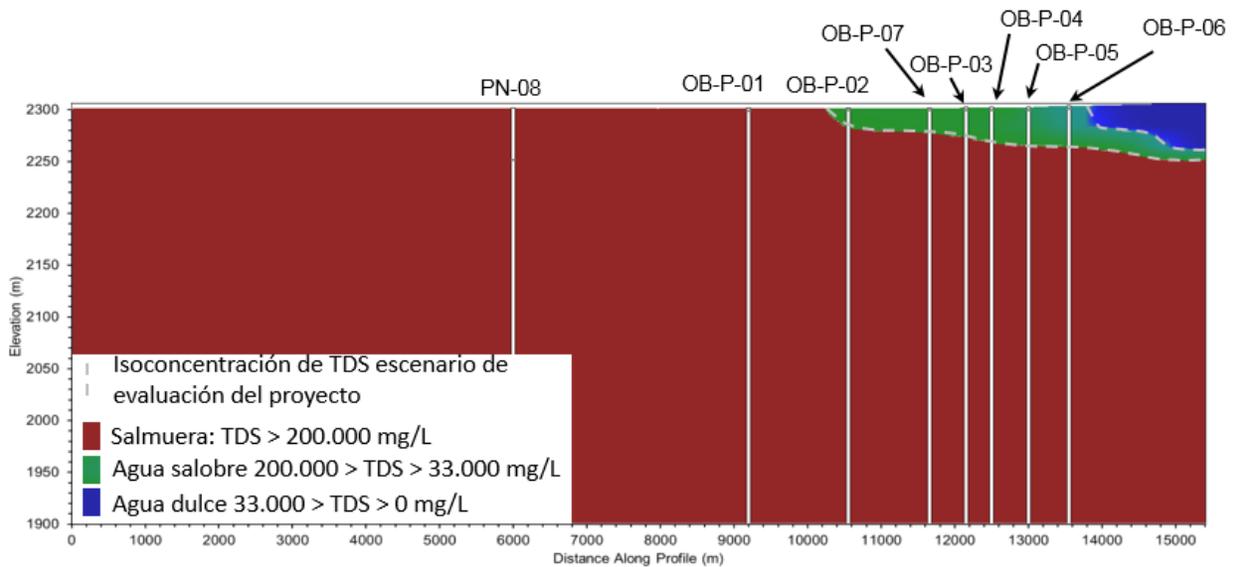
En la Figura 11-50, Figura 11-51 y Figura 11-52 se muestra la distribución de TDS para diciembre 2040, fecha que corresponde al fin del Proyecto, en el Esc4-CP y con una línea segmentada se identifica el límite entre Salmuera, agua salobre y agua dulce simulado para la misma fecha en el Esc1-CP.

**Figura 11-50 Concentración de TDS en perfil La Punta – La Brava (Esc1-CP vs. Esc4-CP)**



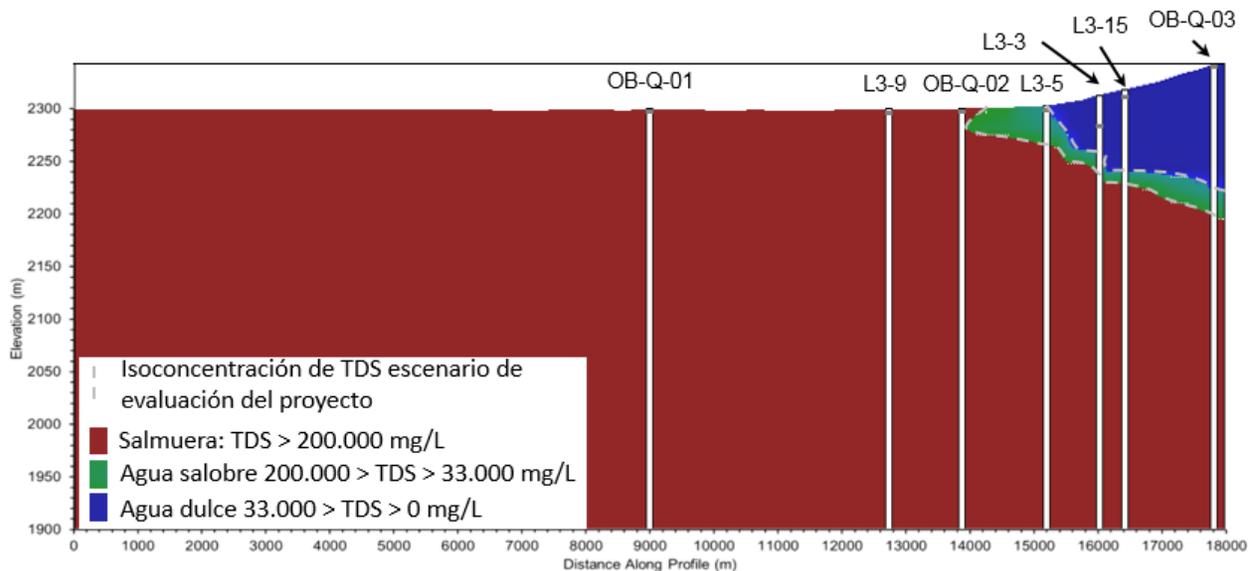
Fuente: Elaboración propia

**Figura 11-51 Concentración de TDS en perfil Peine (Esc1-CP vs. Esc4-CP)**



Fuente: Elaboración propia

**Figura 11-52 Concentración de TDS en perfil Quelana (Esc1-CP vs. Esc4-CP)**



Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a lo observado en las figuras anteriores, al ubicar toda la extracción al Este de la Península de Chépica se producen cambios locales en la distribución de TDS en el perfil La Punta – La Brava, donde el límite entre la salmuera y el agua salobre avanza hacia el centro del Núcleo.

Estos resultados demuestran que efectivamente la extracción adicional de este proyecto no debe concentrarse al Este del área A-1, situación no realista, pues el proyecto contempla la explotación de salmuera del proyecto abarcando toda el área A-1, permitiendo la gestión operativa de esta explotación, la que además asegura no generar descensos más allá de los previstos según los resultados del Escenario de Evaluación del Proyecto.

### 11.6.3 Escenario de Disminución de Extracción de Salmuera por parte de Rockwood (Esc5)

El objetivo de este escenario es realizar un ejercicio ficticio para evaluar la respuesta del sistema ante una eventual disminución de la extracción de salmuera, asociada a este proyecto, lo cual se vincula a las medidas propuestas en el Plan de Alerta Temprana, que se desarrolla en el Anexo 3 de esta Adenda.

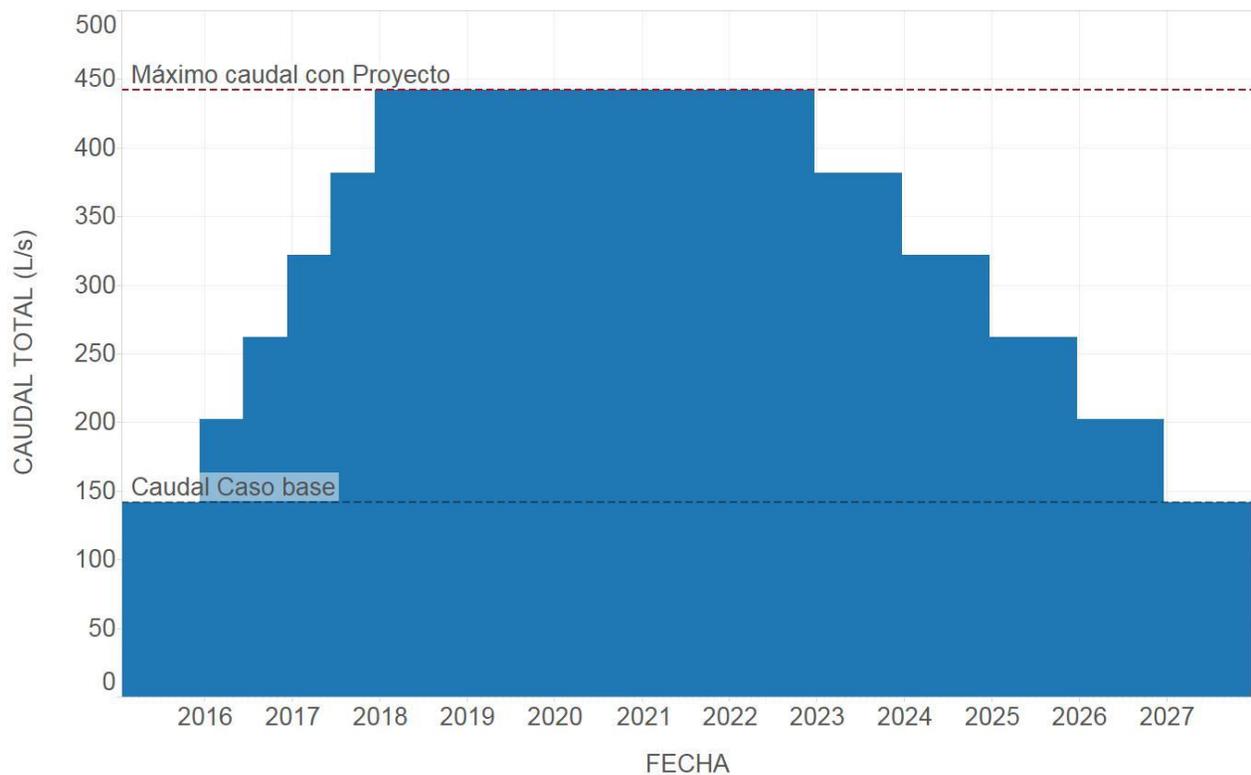
El resultado de los niveles simulados en los modelos MODFLOW y SEAWAT para el escenario de disminución de la extracción de salmuera por Rockwood se presentan en el Apéndice K1 para todo el período de simulación.

### 11.6.3.1 Descripción del Escenario de Disminución de Extracción de Salmuera por parte de Rockwood

Este escenario contempla una reducción del caudal de extracción de salmuera de un escalón por año, de 60 L/s, hasta el total del caudal del proyecto. Esta reducción se simuló a partir del séptimo año de operación que, considerando su inicio el 1 de enero 2016, correspondería al primero de enero de 2023, hasta la reducción total del caudal asociado al proyecto al primero de enero de 2027, tal como se representa en la Figura 11-53.

Bajo este escenario no se simula el caso Base, por cuanto éste corresponde al del Esc1-CB, por lo que al comparar los resultados del Esc5 con los de dicho escenario se obtiene la respuesta del sistema a una disminución escalonada de la extracción de salmuera por parte de Rockwood.

**Figura 11-53 Reducción de extracción de salmuera por Rockwood Esc5-CP**



Fuente: Elaboración propia

La evaluación de este escenario contempla mantener los mismos valores de bombeo de salmuera de terceros y agua dulce-salobre y de recarga que se describen en el Escenario de Evaluación del proyecto

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

(Esc1), así como la misma ubicación de los pozos de extracción contemplados en dicho escenario. El análisis de los resultados se ha realizado comparando con el Esc1-CB.

### 11.6.3.2 Resultados Escenario de Disminución de Extracción de Salmuera por parte Rockwood

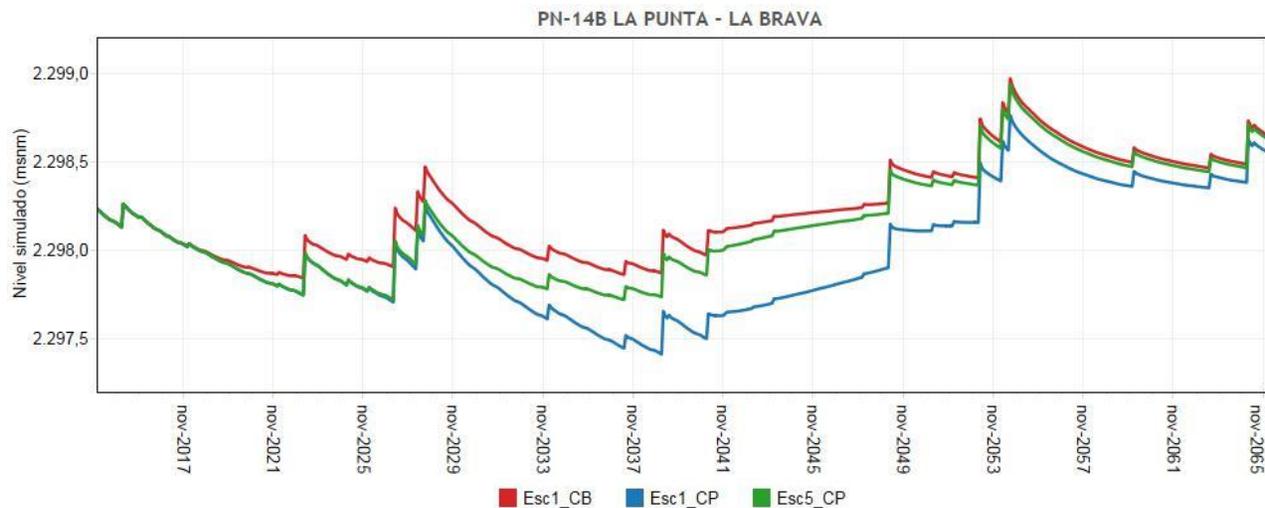
#### 11.6.3.2.1 Resultados MODFLOW

##### 11.6.3.2.2 Niveles

En la Figura 11-54 se muestran los niveles simulados en los puntos PN-14B, PN-05B y SOPM-4 que corresponden a la condición de borde utilizada por SEAWAT para la modelación de los perfiles La Punta – La Brava, Peine y Quelana respectivamente, para el escenario en el cual Rockwood disminuye la extracción.

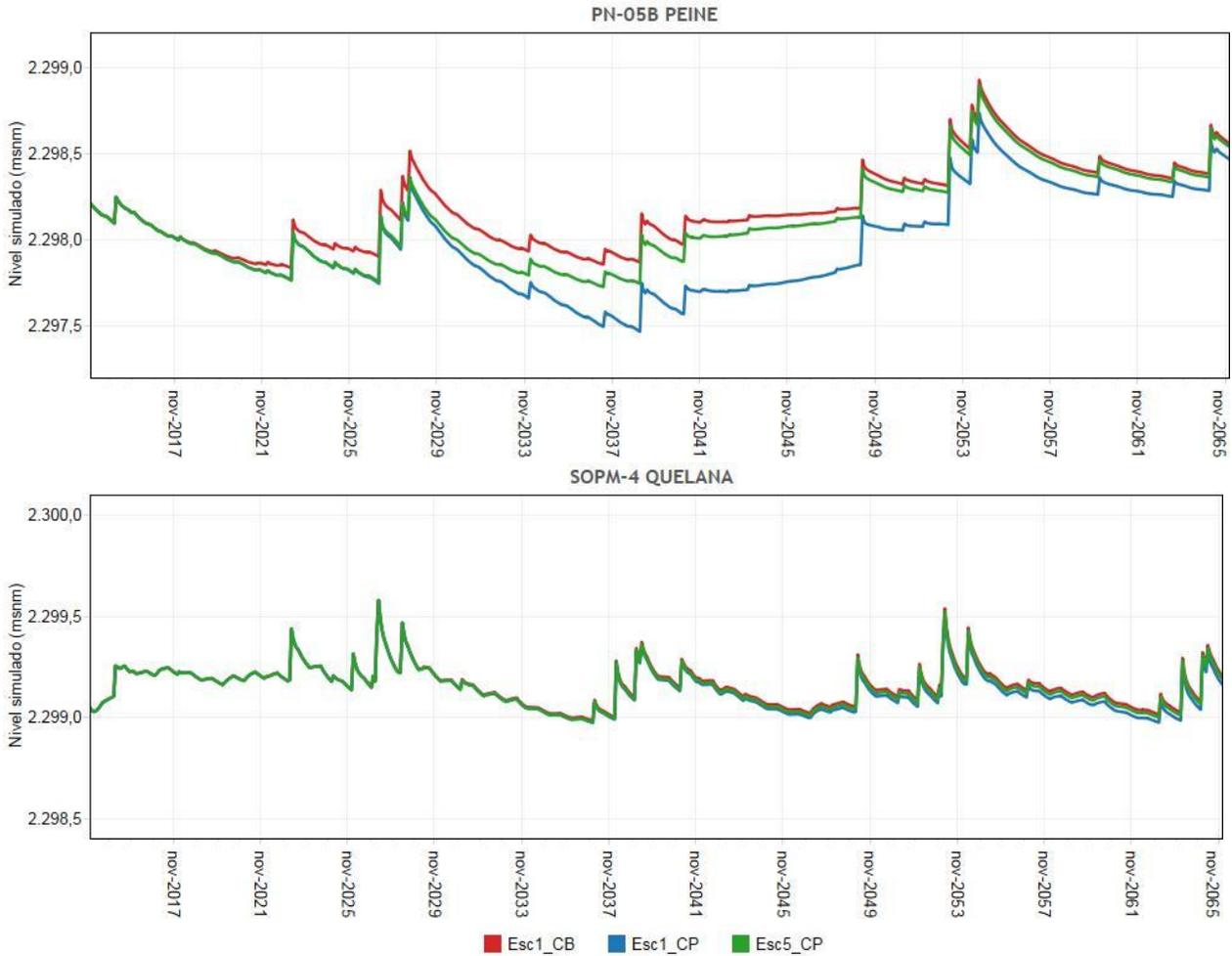
La disminución de la extracción iniciada a principios del año 2023, en los perfiles de La Punta – La Brava y de Peine genera una diferencia perceptible de niveles en la Figura 11-54 entorno al año 2028, después de un evento de precipitación, lo que aprecia entre las líneas de evolución de niveles verde (Esc5-CP) y azul (Esc1-CP). En el perfil de Quelana esto se percibe sutilmente, para esta figura, en una fecha posterior a la finalización del bombeo de Rockwood.

**Figura 11-54 Evolución de niveles simulados en puntos de control SEAWAT, Esc1 y Esc5**



Fuente: Elaboración propia

**Figura 11-54 Evolución de niveles simulados en puntos de control SEAWAT, Esc1 y Esc5 (cont)**

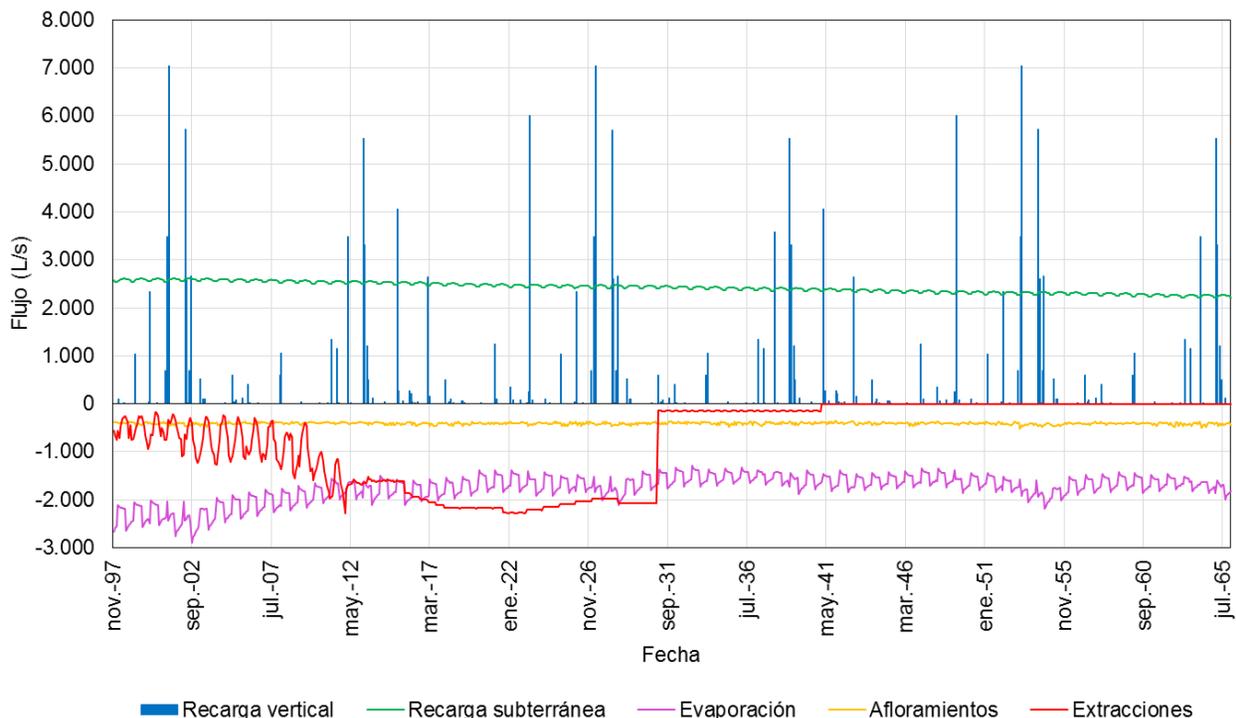


Fuente: Elaboración propia

#### 11.6.3.2.2.1 Flujos

Al igual que para los escenarios presentados anteriormente, se verificó la consistencia de los flujos de entrada y salida simulados por el modelo, los que se muestran en la Figura 11-55.

**Figura 11-55 Flujos de entrada y salida Esc5-CP**



Fuente: Elaboración propia

Al comparar la figura anterior con la Figura 11-16 (Esc1-CB) se observa que la recarga vertical, que representa la precipitación, y la recarga subterránea no cambian.

Con respecto a las salidas del sistema, referente a las extracciones, se observa que éstas disminuyen en forma escalonada y luego de que SQM detiene su bombeo, en diciembre del año 2030, Rockwood extrae los 142 L/s autorizados actualmente. Para evaluar los cambios en la evaporación y en los afloramientos simulados, se calculó el promedio de estos flujos en el período 01/01/2014 – 31/12/2065 y se comparó con los promedios calculados para los escenarios de evaluación del Proyecto (Esc1-CB y Esc1-CP) presentados en el punto 11.4.2.1.2, lo que se presenta en la Tabla 11-22.

**Tabla 11-22 Flujos de salida en escenarios Esc1 y Esc5**

Caso de simulación	Escenario de evaluación del Proyecto (Esc1)		Escenario de disminución de la extracción de salmuera por Rockwood (Esc 5)	
	Evaporación (L/s)	Afloramientos (L/s)	Evaporación (L/s)	Afloramientos (L/s)
Caso Base	1.775,0	410,5	1.775,0	410,5
Con Proyecto	1.748,4	409,2	1.764,0	410,0
Diferencia entre casos	-26,6	-1,3	-11,0	-0,5

Fuente: Elaboración propia

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

Se muestra con esta tabla que al bombear un menor volumen de salmuera en el Esc5-CP que en el escenario Esc1-CP, las salidas por evaporación y afloramientos tienen un valor intermedio entre los flujos de salida de los escenarios Esc1-CB y Esc1-CP.

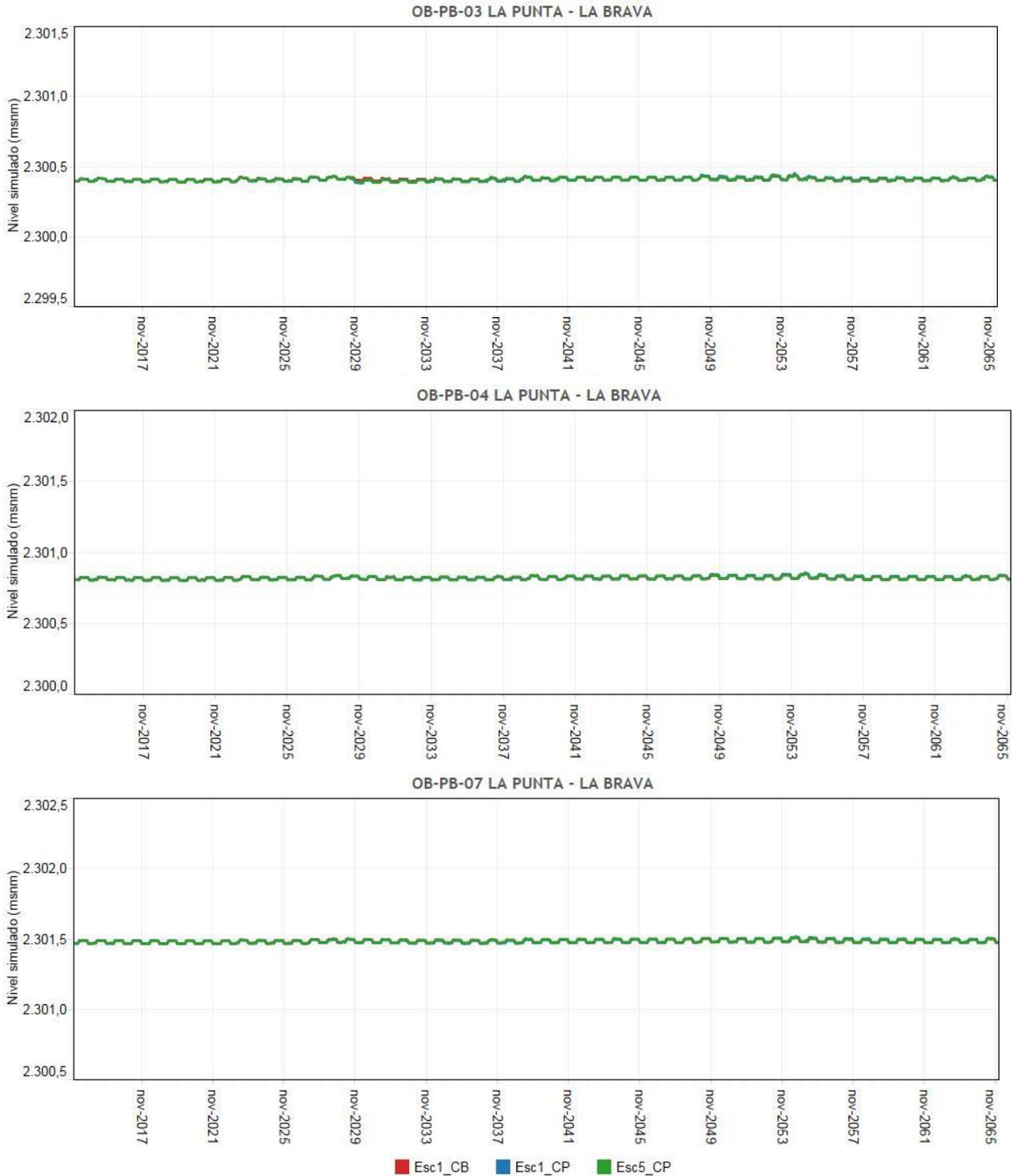
#### 11.6.3.2.3 Resultados SEAWAT

Utilizando los niveles simulados por MODFLOW para el Escenario de Disminución de las Extracciones de Salmuera por Rockwood en los puntos PN-14B, PN-05B y SOPM-4, que corresponden a la condición de borde de los perfiles SEAWAT La Punta – La Brava, Peine y Quelana respectivamente, se realizó la simulación de estos últimos para el período 01/01/2014 a 31/12/2065.

Los niveles simulados por SEAWAT en los puntos prioritarios de cada perfil se muestran en la Figura 11-56, Figura 11-57 y Figura 11-58.

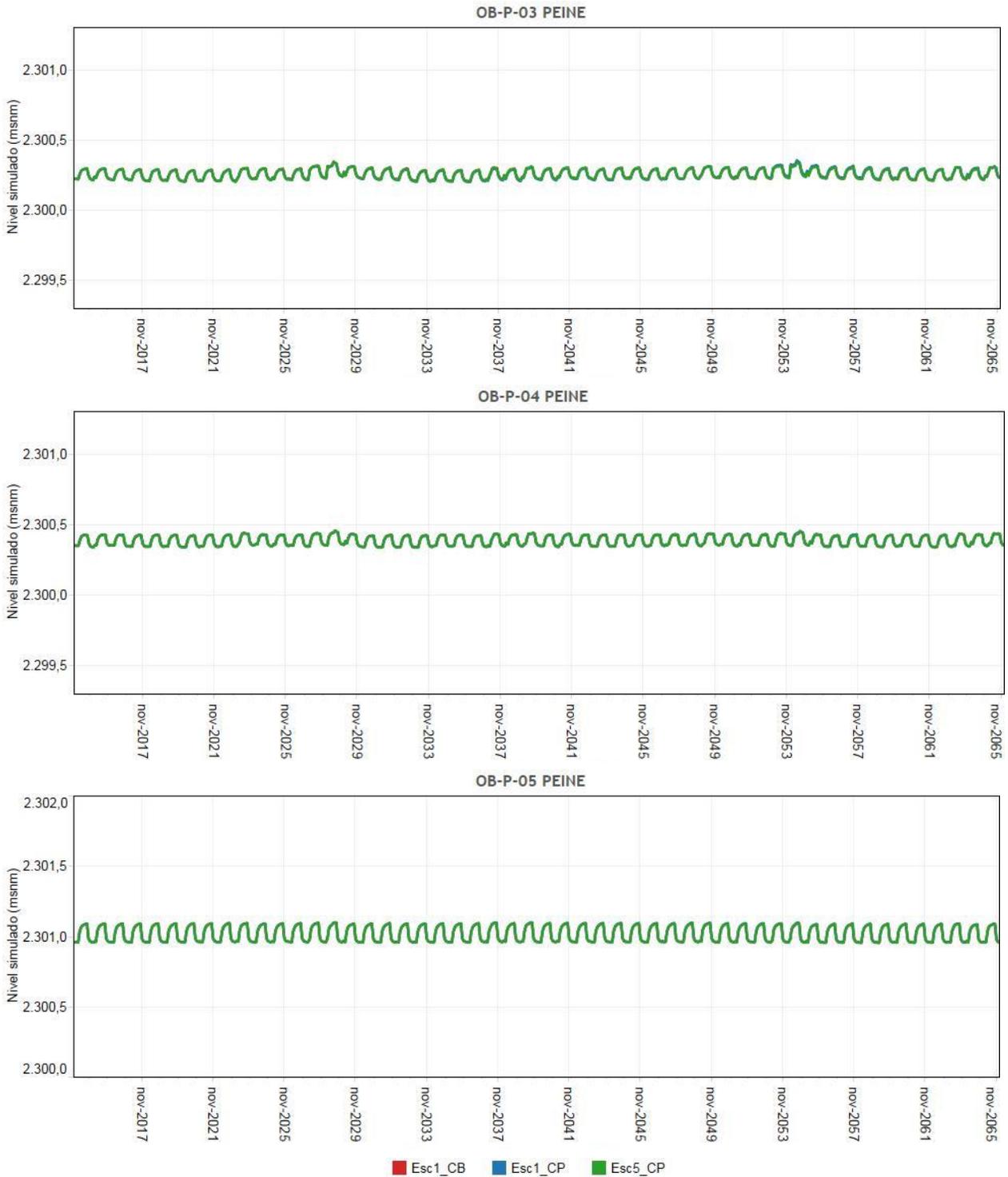
Cabe señalar que algunas de las series de nivel representadas en los gráficos siguientes son coincidentes, por lo que sólo se aprecia aquella que representa al escenario analizado Con Proyecto, ya que el resto de series se encuentran bajo ésta y no se visualizan en el gráfico.

**Figura 11-56 Nivel simulado en puntos de observación y verificación del perfil La Punta – La Brava Esc1 y Esc5**



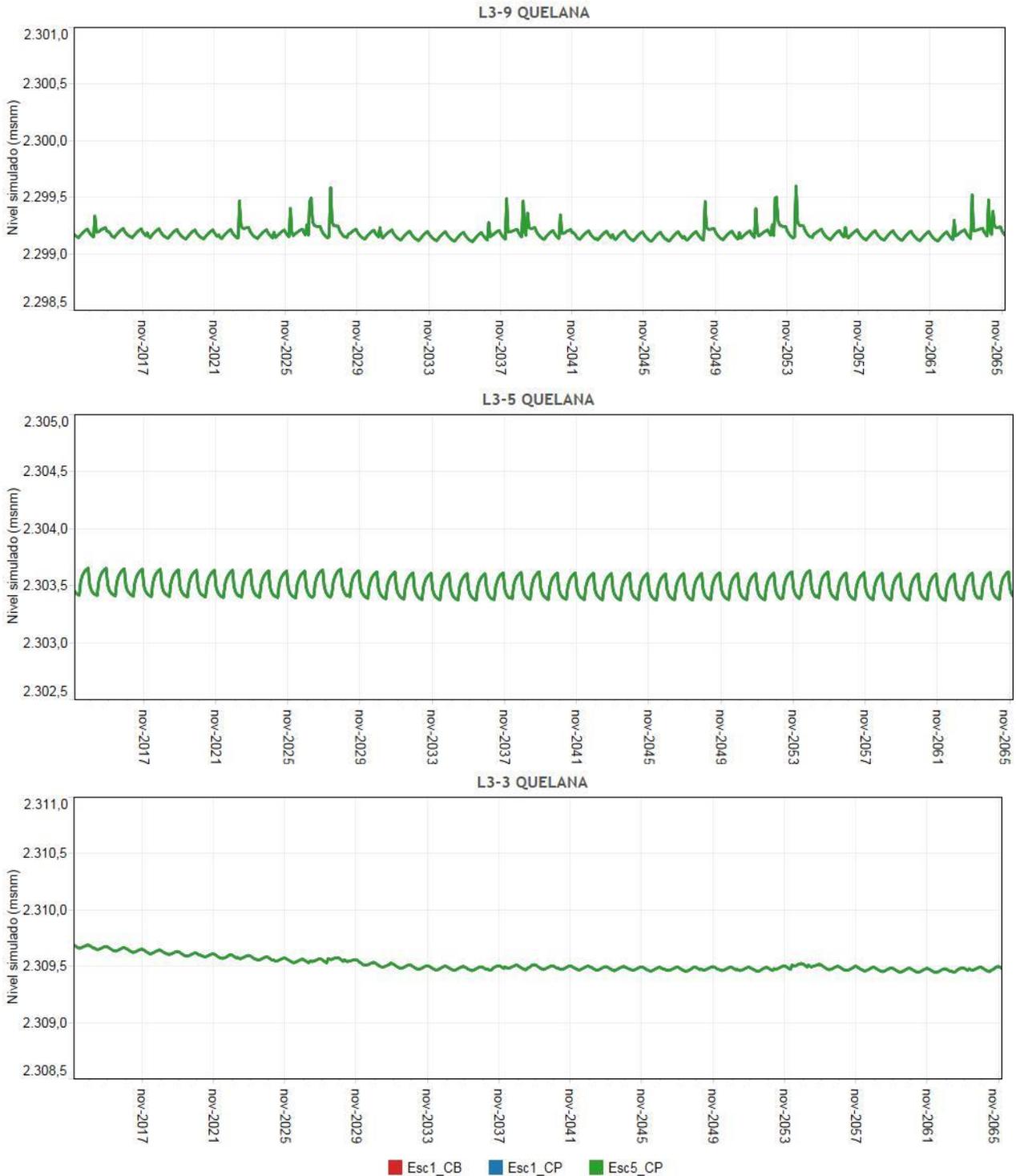
Fuente: Elaboración propia

**Figura 11-57 Nivel simulado en puntos de observación y verificación del perfil Peine Esc1 y Esc5**



Fuente: Elaboración propia

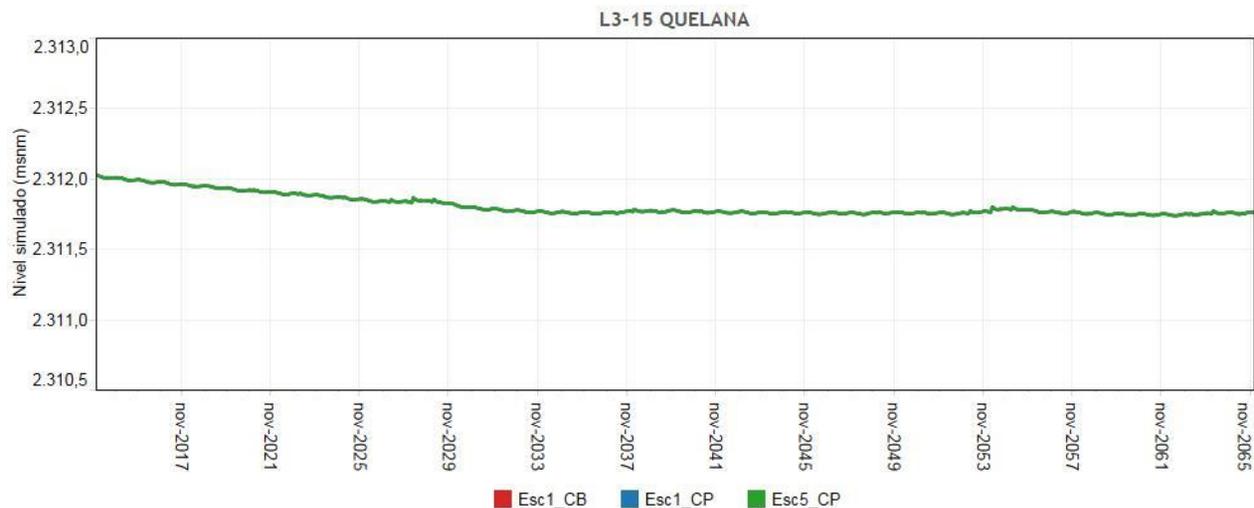
**Figura 11-58 Nivel simulado en puntos de observación y verificación del perfil Quelana Esc1 y Esc5**



Fuente: Elaboración propia

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

**Figura 11-58 Nivel simulado en puntos de observación y verificación del perfil Quelana Esc1 y Esc5 (cont)**



Fuente: Elaboración propia

Como se observa en los gráficos anteriores, no se presentan diferencias significativas del nivel simulado por SEAWAT en los puntos de observación prioritarios entre los escenarios Esc1-CB, Esc1-CP y Esc5-CP.

En la Tabla 11-23, Tabla 11-24 y Tabla 11-25 se presentan los descensos calculados en todos los puntos de observación ubicados en los perfiles SEAWAT para el escenario de disminución de la extracción de salmuera por Rockwood. Se aclara que las diferencias entre casos y escenarios y el valor entregado como descenso adicional pueden presentar una variación de  $\pm 1$  cm debido a los decimales que no se incluyen en las tablas.

**Tabla 11-23 Descenso máximo en puntos de observación del perfil La Punta – La Brava Esc5**

Descenso máximo (m), referido a nivel fecha 31 de diciembre de 2013 (Sistema La Punta – La Brava)								
Simulación	OB-PB-06	PN-16B	OB-PB-01	OB-PB-02	OB-PB-03	OB-PB-04	OB-PB-07	OB-PB-05
Esc1-CB	0,34	0,31	0,26	0,01	0,00	0,00	0,00	0,04
Esc1-CP	0,72	0,63	0,37	0,02	0,01	0,00	0,00	0,04
Esc5-CP	0,45	0,41	0,36	0,02	0,01	0,00	0,00	0,04
Descenso adicional (m), diferencia de nivel entre escenarios Esc5-CP y Esc1-CB								
Descenso adicional	0,12	0,11	0,11	0,01	0,02	0,00	0,00	0,00

Fuente: Elaboración propia

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA		
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGÍCO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA		

**Tabla 11-24 Descenso máximo en puntos de observación del perfil Peine Esc5**

Descenso máximo (m), referido a nivel fecha 31 de diciembre de 2013 (Sistema Peine)								
Simulación	PN-08A	OB-P-01	OB-P-02	OB-P-07	OB-P-03	OB-P-04	OB-P-05	OB-P-06
Esc1-CB	0,34	0,11	0,04	0,03	0,02	0,01	0,01	0,00
Esc1-CP	0,63	0,12	0,05	0,03	0,02	0,01	0,00	0,00
Esc5-CP	0,45	0,12	0,05	0,03	0,02	0,01	0,01	0,00
Descenso adicional (m), diferencia de nivel entre escenarios Esc5-CP y Esc1-CB								
Descenso adicional	0,11	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 11-25 Descenso máximo en puntos de observación del perfil Quelana, Esc5**

Descenso máximo (m), referido a nivel fecha 31 de diciembre de 2013 (Sistema Quelana)							
Simulación	OB-Q-01	L3-9	OB-Q-02	L3-5	L3-3	L3-15	OB-Q-03
Esc1-CB	0,12	0,07	0,07	0,08	0,25	0,29	0,40
Esc1-CP	0,13	0,07	0,07	0,08	0,25	0,29	0,40
Esc5-CP	0,12	0,07	0,07	0,08	0,25	0,29	0,40
Descenso adicional (m), diferencia de nivel entre escenarios Esc5-CP y Esc1-CB							
Descenso adicional	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Fuente: Elaboración propia

Se observa una disminución del descenso adicional con respecto al escenario de evaluación Con Proyecto, lo que es coherente ya que la tasa de bombeo es menor y la extracción de los 300 L/s adicionales se detiene a fines del 2026 en vez de a fines del 2040. El descenso máximo se observa en los puntos OB-PB-06 y PN-08A donde el descenso del nivel con respecto a diciembre 2013 es de 0,45 m. En el perfil Quelana los descensos máximos son iguales a los del Caso Base (Esc1-CB).

Los resultados de este escenario se utilizan y analizan en mayor profundidad en el punto 4.6 del Anexo 3 de esta Adenda, donde se presentan con el objeto de evaluar la efectividad de la medida de reducción de la extracción de salmuera y determinar los tiempos en que éstas se aprecian en los puntos de activación del PAT.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

## 11.7 Conclusiones de los resultados de simulación

Se ha utilizado el modelo SEAWAT para identificar las respuestas del sistema, considerando los siguientes criterios de evaluación:

- 1) Cambios en los niveles de agua en las zonas de alimentación a las lagunas
- 2) Cambios en la distribución de TDS y posición de la interfase salina

Ambos criterios representan cambios del componente hídrico en el entorno de las lagunas evaluando los niveles en una serie de puntos prioritarios ubicados en sitios donde se producen los afloramientos de agua subterránea que alimentan las lagunas. En el caso de la evaluación de la distribución de TDS, ésta se realiza a partir de la configuración que resulta en los propios perfiles luego del período simulado.

La factibilidad del proyecto se evaluó a partir del Escenario de Evaluación del Proyecto (Esc1) que mantiene las condiciones actuales de bombeo de salmuera y agua dulce-salobre de todos los usuarios de la Cuenca (Caso Base o Esc1-CB), agregando la extracción 300 L/s de salmuera y 6 L/s de agua dulce-salobre por Rockwood (Con Proyecto o Esc1-CP). Se simularon los 25 años de proyecto más 25 años adicionales para visualizar la recuperación del sistema.

Los resultados de la modelación indican que los descensos máximos previstos, respecto a la fecha de referencia del 31 de diciembre de 2013, en los escenarios Caso Base y Con Proyecto, son mayores en la salmuera, amortiguándose hacia aguas arriba de la interfase, donde se predicen iguales o inferiores a 3 cm en todos los puntos prioritarios. Considerando el efecto sinérgico de los diferentes proyectos y explotaciones en la cuenca, también se han determinado que los descensos adicionales vinculados al proyecto en estos puntos, son iguales o inferiores a 2 cm. Con esto, se considera que estos descensos no generan ni impactos ni efectos significativos sobre los sistemas lagunares, en atención además a que los niveles en el acuífero alrededor de las áreas que las alimentan presentan oscilaciones estacionales de niveles entre tres y cuatro veces superiores a los descensos máximos previstos.

También se revisó la concentración de TDS para distintos tiempos en los perfiles SEAWAT verificando que no se producen cambios en la distribución de ésta, y por lo tanto que la ubicación de la interfase salina no se ve afectada por la extracción de salmuera y agua del Proyecto. Por todo lo indicado, el proyecto es viable desde un punto de vista ambiental.

Adicionalmente, se han analizado dos escenarios ambientalmente desfavorables, y por lo tanto conservadores, uno de recarga reducida en cuanto a la precipitación en la cuenca y otro, que considera una mayor explotación de los derechos de aprovechamiento de agua de los acuíferos del borde del Salar. Ambos escenarios demuestran igualmente la no afeción sobre los niveles del acuífero en el área de alimentación de las lagunas y sobre la posición de la interfase salina, manteniendo la conclusión de viabilidad ambiental del proyecto.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

Se destaca que el escenario de recarga reducida ha sido el considerado para la definición de los umbrales del PAT (ver Anexo 3) con el objetivo de no eludir razones meteorológicas en el caso de activación de este Plan.

También se simuló un escenario ficticio que ubica todos los pozos de extracción del proyecto concentrados al Este al interior del área A1, el cual concluye que estos pozos no pueden estar concentrados en dicha posición en atención a que generan un cambio en la distribución de TDS en el perfil de La Punta-La Brava. Esto ya está contemplado en la operación del proyecto por parte del titular.

Por último, se ha simulado un escenario, como ejercicio referencial, que contempla la disminución escalonada de extracción de salmuera por parte de Rockwood, al séptimo año del proyecto, para evaluar la efectividad de las medidas de reducción de salmuera del proyecto definidas en el Plan de Alerta Temprana y cuyos resultados se utilizan en el Anexo 3 para evaluar los tiempos de respuesta de las mismas.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

## 12 CONCLUSIONES

Los trabajos que se han realizado en el marco del estudio, han permitido profundizar en el conocimiento de la dinámica de los sistemas hídricos e hidrogeológicos que están ubicados en el Sur y Este del Salar de Atacama, lo que se ha traducido en una modelación numérica actualizada que permite evaluar el efecto del aumento de explotación por parte de Rockwood, tanto de salmuera (+300L/s) como de agua (+6 L/s), en los sectores de interés ambiental en el Salar.

Estos trabajos han consistido en lo siguiente:

- Recopilación bibliográfica y revisión de antecedentes disponibles
- Geofísica: nuevos perfiles TEM e integración de la información existente
- Geología: nuevas perforaciones en el Núcleo y en la Zona Marginal
- Pruebas de bombeo:
- Seguimiento de niveles en la red monitoreo del titular
- Análisis químicos e isotópicos en los pozos de la red
- Mediciones de evaporación
- Mediciones de caudal (aforos) en vertientes y canales que alimentan las lagunas
- Actualización de registros meteorológicos
- Topografía en el área del modelo y en los puntos de monitoreo
- Análisis de extracciones en la cuenca
- Integración y comparación de datos publicados de terceros
- Actualización modelos numéricos MODFLOW Y SEAWAT

A partir del análisis de esta información geológica e hidrogeológica levantada con motivo de esta Adenda 5, complementaria a todos los antecedentes que se tienen del proceso de evaluación de este proyecto y de la integración con la información previa, tanto propia como de terceros, ha sido posible definir con mayor detalle el modelo conceptual del sistema hídrico del Salar, así como el funcionamiento hidrogeológico de los sistemas lagunares que son objeto de protección, situados en la Zona Marginal. Estos sistemas se forman principalmente debido a la presencia de una interfase salina que obstaculiza el flujo de agua dulce procedente de las subcuencas aportantes desde el Este y Sureste del Salar, obligándolo, ya convertido en agua salobre, a ascender a niveles superficiales donde se evapora directamente desde el terreno, o bien forma surgencias que alimentan los cuatro sistemas lagunares que se estudian en este proyecto (ver más detalles en el Apéndice I).

Se ha establecido un balance hídrico promedio para una condición de equilibrio, utilizando datos y estimaciones para el año 1997, y cuyos resultados (recargas laterales, precipitación y evaporación) han sido incorporados como condiciones de borde en la calibración del modelo en régimen permanente.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

También se han calculado los valores mensuales de la recarga lateral por subcuenca, precipitación y bombeos de salmuera para el período de calibración (1997-2013) del modelo numérico en régimen transiente, así como una estimación de dichos valores para el período de predicción (2013-2065). En el caso de la evaporación, la cual es una variable que depende de la profundidad del nivel freático, se realizó un levantamiento de datos en terreno que permitió establecer nuevas tasas de evaporación en el Salar, estableciéndose flujos por zonas, que han sido incorporados al balance hídrico y finalmente simulados por el modelo numérico.

Una vez recopilada e integrada la información hidrogeológica disponible, se ha realizado una modelación numérica que consistió en el uso acoplado de los modelos MODFLOW y SEAWAT. Ambos modelos se han construido de acuerdo a las indicaciones de la Guía de modelos de aguas subterráneas del SEIA (SEA,2012) cumpliendo dos requisitos principales: por un lado conseguir una representación lo más precisa posible de los flujos determinados en el cálculo del balance hídrico, manteniendo la coherencia con el modelo conceptual, y por el otro, obtener una buena calibración de niveles que permita predecir los descensos de los niveles de salmuera en el Núcleo debidos al aumento de explotación solicitado por el proyecto Rockwood, bajo distintos escenarios de explotación.

Los sistemas lagunares del Sur y Este del Salar de interés han sido modelados con SEAWAT en 2D, mediante tres perfiles paralelos a la dirección de flujo hacia las zonas de extracción, y situados sobre los sistemas lagunares de La Punta-La Brava, Peine y Aguas de Quelana. Estos perfiles han sido configurados, en su geometría y parámetros hidráulicos, de manera coherente con el modelo MODFLOW, y utilizan sus niveles simulados como condición de borde de niveles en el Núcleo.

El nivel de calibración alcanzado en la modelación numérica, tanto en el modelo MODFLOW, como en SEAWAT, es tal que se cumplen los estándares establecidos por la Guía de modelos para aguas subterráneas, citada anteriormente, por lo que los modelos desarrollados han sido utilizados como herramienta de predicción. Por un lado MODFLOW ha sido utilizado para determinar el comportamiento del núcleo del Salar y por otro lado los perfiles SEAWAT han sido utilizados para identificar las respuestas del sistema en las zonas sensibles.

Los resultados obtenidos de los perfiles SEAWAT, han sido utilizados para evaluar:

- 1) Cambios en los niveles de agua en las zonas de alimentación a las lagunas
- 2) Cambios en la distribución de la salinidad -TDS -(posición de la interfase salina)

Con el fin de evaluar la factibilidad del Proyecto desde un punto de vista ambiental, se ha simulado los siguientes escenarios:

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

- **Escenario de Evaluación del Proyecto**

Define dos situaciones de simulación, una sin proyecto (Caso base), en la que se mantiene la explotación actual de salmuera en el Salar de SQM y de Rockwood (142 L/s), y otra con proyecto, manteniendo la explotación actual de salmuera en el Salar de SQM y considerando el aumento de extracción de 300 L/s solicitado por el titular hasta 442 L/s, y de agua salobre de 6 L/s.

- **Escenario de Recarga Reducida**

Considera que existe menor cantidad de agua en el sistema. Esto a través de asumir que la recarga dada por el periodo histórico de menor precipitación, correspondiente a 11 años se repite durante todo el periodo modelado. Las extracciones de salmuera de SQM se mantienen y las de Rockwood aumentan en 300 L/s. Los resultados de este escenario se han utilizado además para establecer los umbrales del Plan de Alerta Temprana.

- **Escenario de Incremento del Uso de Agua Dulce-salobre**

Considera que la explotación de agua desde el acuífero sea mayor a la estimada como más probable, según los factores de uso utilizados.

- **Escenario de Movilidad al Este de los pozos de Rockwood**

Se consideró que la extracción adicional de 300 L/s se ubica en un 100% al Este de la península de Chépica, que corresponde a una condición extrema, ya que en el escenario previsto para el Proyecto ésta se encuentra distribuida en forma homogénea en el área A1 (más al oeste).

- **Escenario de Disminución de Extracción de Salmuera por parte de Rockwood**

Al séptimo año del proyecto, se comenzaría una reducción escalonada de 60 L/s por año hasta alcanzar la extracción previa al proyecto, esto con el fin de evaluar la efectividad de las medidas de reducción de salmuera del proyecto definidas en el Plan de Alerta Temprana y cuyos resultados se utilizan en el Anexo 3 para evaluar los tiempos de respuesta de las mismas.

Sobre la base de los resultados de las simulaciones realizadas, y que son presentadas en el capítulo 11 de este Anexo es posible concluir que:

- La operación del proyecto en condiciones medias, en términos hidrológicos, no provoca cambios en la distribución de la concentración de TDS, ni tampoco descensos de niveles en las zonas de alimentación de las lagunas, que pudieran significar una afección sobre el funcionamiento hidrogeológico de los sectores lagunares estudiados, confirmando que la extracción adicional de 300 L/s de salmuera y 6 L/s de agua dulce-salobre es viable.
- La operación del proyecto no genera descensos adicionales en los niveles de salmuera en las zonas próximas a los sistemas lagunares de Aguas de Quelana y de Soncor, siendo en cualquier caso inferiores a 2 cm en estas zonas.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

- Aún en condiciones de sequía prolongada o de aumento de uso de los derechos de aprovechamiento otorgados, el proyecto, tal cual ha sido definido no genera efectos en los sistemas lagunares.
- Los nuevos pozos de extracción de salmuera que contempla el Proyecto no pueden estar concentrados al Este del área A-1, lo cual ya está contemplado en la operación del proyecto por parte del titular.

Por lo anterior, en base a los resultados obtenidos en la modelación, se puede indicar que el proyecto de extracción es ambientalmente sustentable sin generar ningún tipo de afeción sobre el funcionamiento hidrogeológico en los sistemas lagunares estudiados en el Sur y Este del Salar de Atacama.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

### 13 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS FINAL

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.

Allison, G.B. and Hughes, M.W., 1978. The use of environmental chloride and tritium to estimate total recharge to an unconfined aquifer. Aust. J. Soil Res., 16: 181--95.

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

Aravena, R. (1995). Isotope hydrology and geochemistry of northern Chile groundwaters. Bull. Inst. Fr. Etudes andines (24): 495- 503.

Bazuhair, A.S. y Wood, W.W., 1996. Chloride mass-balance method for estimating ground water recharge in arid areas: examples from western Saudi Arabia.

Bevacqua, P. (1994). Descripción geológica y evolución del delta del Rio San Pedro, Salar de Atacama, Chile. (235-239 pp). En: 7º Congreso Geológico Chileno, Actas I. (17 al 21 de octubre de 1994, Universidad de Concepción, Chile.).

Cervetto Sepúlveda, M.M., 2012, Caracterización hidrogeológica e hidrogeoquímica de las cuencas: Salar de Aguas Calientes 2, Puntas negras, Laguna Tuyajto, Pampa Colorada, Pampa Las Tecas y Salar el Llaco, II Región de Chile, Tesis. Universidad de Chile, Santiago. Chile.

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).

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.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

Descripción radar SRTM, NASA “EROS”: Earth Resources Observation and Sciences. En: sitio web <http://eros.usgs.gov/>.

Dettinger, M.D. 1989. Reconnaissance estimates of natural recharge to desert basins in Nevada, USA, by using chloride-balance calculations. J. Hydrol. 106:55-78

DGA (1987). Balance Hídrico de Chile. De <http://sad.dga.cl/ipac20/ipac.jsp?session=XJ4767K860843.1292250&source=~!biblioteca&profile=cirh&page=4&group=0&term=balance+hidrico+de+Chile&index=.GW&uindex=&aspect=subtab39&menu=search&ri=5&ts=1447680075437&deduping=>

DGA (1996a). Determinación de la disponibilidad de recursos hídricos para constituir nuevos derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas en el sector del acuífero de la Pampa del Tamarugal. Minuta Técnica. S.D.T. N° 68. Departamento de Administración de Recursos Hídricos, Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile.

DGA (1996b). Determinación de la disponibilidad de recursos hídricos para constituir nuevos derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas en el sector del Valle de Azapa. Minuta Técnica. S.D.T. N° 109. Departamento de Administración de Recursos Hídricos, Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile.

DGA (1998). Evaluación de la disponibilidad del recurso hídrico subterráneo en el acuífero de la parte baja del Rio Lluta, Arica, I Región. Informe Técnico N° 297. S.D.T. N° 104 Departamento de Administración de Recursos Hídricos, Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile.

DGA (2005). Hidrogeología de la II Región y Asesoría para la Revisión de Informes de Estudios de Evaluación de Recursos Hídricos. Informe Final. DICTUC (División Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Área Aguas Subterráneas) para Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas.

DGA (2007). Estimaciones de Demanda de Agua y Proyecciones Futuras. Zona I Norte. Regiones I a IV”. SIT N°122, Enero 2007. Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile.

DGA (2010). Actualización de la evaluación de la disponibilidad de recursos hídricos para constituir derechos de aprovechamiento en las subcuencas afluentes al Salar de Atacama. II Región, Chile. Informe Final S.I.T. N° 210. GCF Ingenieros Consultores para DGA, Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile.

DGA (2012b). Evaluación de los recursos Hídricos Subterráneos del Acuífero del Salar de Atacama. Informe Técnico S.D.T. N° 324. Departamento de Administración de Recursos Hídricos, Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

DGA (2013). Análisis de la oferta hídrica del Salar de Atacama. Informe Técnico. S.D.T N° 339. División de Estudios y Planificación, Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile.

DGA (2014). Derechos de aprovechamiento de aguas registrados en DGA. [on line]. Dirección General de Aguas. Accesible en: <[http://www.dga.cl/productosyservicios/derechos\\_historicos/Paginas/default.aspx](http://www.dga.cl/productosyservicios/derechos_historicos/Paginas/default.aspx)> [Extraído en: 30 de diciembre de 2014].

DGA, estadística de estaciones meteorológicas y fluviométricas, de <http://snia.dga.cl/BNAConsultas/reportes>.

DICTUC (1999a). Ampliación de radios de protección de pozos de producción al Este del Salar de Atacama.

DICTUC (1999b). Informe de prueba de bombeo. Pozo Flamenco.

DICTUC (2001a). Informe ejecutivo Pozo producción S-5: Habilitación, Ejecución y análisis de Pruebas de Bombeo.

DICTUC (2001b). Informe ejecutivo Pozo producción S-6: Habilitación, Ejecución y análisis de Pruebas de Bombeo.

DICTUC (2002a). Informe ejecutivo Pozo producción SP-1: Habilitación, Ejecución y análisis de Pruebas de Bombeo.

DICTUC (2002b). Informe ejecutivo Pozo producción SP-4: Habilitación, Ejecución y análisis de Pruebas de Bombeo.

DICTUC (2003). Exploración en Profundidad del Salar de Atacama: Análisis de Pruebas de Bombeo

DICTUC (2004a). Funcionamiento Hidráulico de las Lagunas marginales del Núcleo del Salar de Atacama. Informe Ambiental DICTUC para SQM, Sociedad Química y Minera de Chile.

DICTUC (2004b). Modelo Hidrogeológico del Acuífero de Salmuera del Núcleo del Salar de Atacama. Descripción del Modelo y Simulaciones. II Región. Informe Técnico DICTUC para SQM, Sociedad Química y Minera de Chile. Anexo VII del EIA del proyecto “Cambios y Mejoras de la Operación Minera en el Salar de Atacama”.

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

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

Subterránea. Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea (FCIHS). Primera Edición. Barcelona (España).

Farías, M.; Contreras, M.; Rasuk, M.; Kurth, D.; Flores, M.; Poiré, D.; et al. (2014). Visscher Characterization of bacterial diversity associated with microbial mats, gypsum evaporites and carbonate microbialites in thalassic wetlands: Tebenquiche and La Brava, Salar de Atacama, Chile. *Extremophiles: Microbial Life Under Extreme Conditions*. Volume 18, Number 2. ISSN 1431-0651. 311-329 pp.

Fetter, C. (2001). *Applied Hydrogeology*. 4th. Ed. New Jersey: Prentice Hall.

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.

Geodatos (2013a) Estudio geofísico NanoTEM y TEM: Proyecto sector Sur Salar de Atacama. Región de Antofagasta, Chile. (Marzo, 2013). Informe Geodatos para SCL (Sociedad Chilena del Litio).

Geodatos (2013b). Estudio geofísico TEM y NanoTEM. Proyecto sector Sureste Salar de Atacama, Región de Antofagasta, Chile. (Abril, 2013). Informe Geodatos para SCL (Sociedad Chilena del Litio).

Geohidrología (2013a). Segunda actualización del modelo de flujo de agua subterránea en el Salar de Atacama según RCA 226/2006: Proyecto Cambios y Mejoras de la Operación minera en el Salar de Atacama. Informe Final Geohidrología Consultores para SQM, Sociedad Química y Minera de Chile.

Geohidrología (2013c). Plan de Seguimiento Ambiental Hidrogeológico: Proyecto Cambios y mejoras de la operación minera en el Salar de Atacama. Informe N° 13 de Monitoreo Semestral actualizado a Junio de 2013, Geohidrología Consultores para SQM, Sociedad Química y Minera de Chile.

Geohidrología (2014a). Plan de Seguimiento Ambiental Hidrogeológico: Proyecto Cambios y mejoras de la operación minera en el Salar de Atacama. Informe N° 14 de Monitoreo Semestral actualizado a Diciembre de 2013, Geohidrología Consultores para SQM, Sociedad Química y Minera de Chile.

Geohidrología (2014b). Plan de Seguimiento Ambiental Hidrogeológico: Proyecto Cambios y mejoras de la operación minera en el Salar de Atacama. Informe N° 15 de Monitoreo Semestral actualizado a Junio de 2014, Geohidrología Consultores para SQM, Sociedad Química y Minera de Chile.

Graham, R.; Walter, C.; Miller, A. and Peacock, J. (2012). Salar de Atacama brine aquifer study: Geophysics. IESE (Institute of Earth science and Engineering University of Auckland) Report 21-2012.03.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

Guo, W. y Langevin, C. (2002), Guía del usuario de SEAWAT: Un programa informático para la simulación de flujo del agua subterránea de densidad variable tridimensional: Técnicas de sondeos Geológicos de Investigaciones de Agua-Recursos de EE.UU., libro 6.

Gutiérrez, M. (2001). Geomorfología climática. Ediciones Omega, Barcelona ISBN 84-282-1209-0.

Harbaugh, A.; Banta, E; Hill, M. y McDonald, M. (2000). MODFLOW-2000, The U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model—User Guide to Modularization Concepts and the Ground-Water Flow Process. U.S. Department of the Interior. and U.S. Geological Survey.

Houston, J. (2007). Recharge to groundwater in the Turi Basin, northern Chile: An evaluation based on tritium and chloride mass balance techniques. In: Journal of Hydrology (2007) 334, 534– 544 pp.

Hydrotechnica (1987). Gravity and Refraction Seismic interpretation, Extract From: Evaluation of brine reserves in the Salar de Atacama.

IGSA (2005). Estudio de Impacto Ambiental Proyecto cambios y mejoras de la operación minera en el Salar de Atacama. IGSA Consultores para SQM, Sociedad Química y Minera de Chile.

Johnson A. (1967). Specific Yield: Compilation of specific yields for various materials: Hydrologic Properties of Earth Materials. Geological Survey Water Supply Paper 1662-D.

Jordan, T.; Muñoz, N.; Hein, M.; Lowenstein, T.; Godfrey, L. and Yu, J. (2002). Active faulting and folding without topographic expression in an evaporite basin, Chile. Geological Society of America Bulletin. GSA Bulletin; Vol. 114, N°11. 1406 - 1421 pp.

Jordan, T.; Mpodozis, C.; Muñoz, N.; Blanco, N.; Pananont, P. y Gardeweg, M. (2007). Cenozoic subsurface stratigraphy and structure of the Salar de Atacama Basin, northern Chile. In: Journal of South American Earth Sciences 23 (2007) 122–146. [www.elsevier.com/locate/jsames](http://www.elsevier.com/locate/jsames).

Langevin, C.; Thorne, D., Jr.; Dausman, A.; Sukop, M. y Guo, W. (2008). SEAWAT Versión 4: Un programa informático para la simulación de múltiples especies de soluto y Transporte de Calor: Métodos y técnicas libro 6. U.S. Geological Survey.

Lowenstein, T.; Hein, M.; Bobst, A.; Jordan, T.; Teh-Lung Ku and Luo, S. (2003). An assessment of stratigraphic completeness in climate-sensitive closed-basin lake. Journal of Sedimentary Research, Vol. 73, N° 1, 91–104 pp. Copyright q 2003, SEPM (Society for Sedimentary Geology).

Mardones, L. (1986). Características geológicas e hidrogeológicas del Salar de Atacama. En: El litio, un nuevo recurso para Chile. Editado por Lagos G., Santiago. Editorial Universidad de Chile. 181-216 pp.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

Mardones, L. (1997). Flux et évolution des solutions salines dans les systèmes hydrologiques des Salar d'Ascotan et d'Atacama, Thèse de Doctorat en Science de la Terre, Universidad de Paris.

McCartney, J. (2001). Hydraulic and Hydrochemical interactions in the Tilopozo groundwater zone Salar de Atacama Region II, Chile. Thesis for Master of Science in hydrogeology and groundwater management, National Centre for Groundwater Management, University of Technology. Sidney, Australia.

MEL (1996). Estudio de Impacto Ambiental del proyecto de lixiviación de óxidos de cobre y aumento de la capacidad de tratamiento de mineral sulfurado. Informe RESCAN para Minera Escondida.

MEL (2011b). Plan de Alerta Temprana para el acuífero Monturaqui- Negrillar- Tilopozo: Revisión de los datos de monitoreo Informe N° 10: Revisión hasta fines de 2010. Informe SWS, Schlumberger Water Services Chile para Minera Escondida.

MEL (2012). Plan de Alerta Temprana para el acuífero Monturaqui- Negrillar- Tilopozo: Revisión de los datos de monitoreo Informe N° 11: Revisión hasta fines de 2011. Informe SWS, Schlumberger Water Services Chile para Minera Escondida.

MEL (2014). Plan de Alerta Temprana para el acuífero Monturaqui- Negrillar- Tilopozo: Revisión de los datos de monitoreo Informe N° 13: Revisión hasta fines de 2013. Informe SWS, Schlumberger Water Services Chile para Minera Escondida.

MEL (2015). Plan de Alerta Temprana para el acuífero Monturaqui- Negrillar- Tilopozo: Revisión de los datos de monitoreo Informe N° 14: Revisión hasta fines de 2014. Informe SWS, Schlumberger Water Services Chile para Minera Escondida.

Mook, W.G. (2000). Environmental Isotopes in the Hydrological Cycle. Principles and applications. Technical Documents in Hydrology No. 39, Vol. I. UNESCO, Paris.

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.

Munk, L. and Hynek, S. (2012). Progress Report for Rockwood lithium: Salar de Atacama Project: δ 18O and Δd and CFC results from January 2012 sampling.

Muñoz, N.; Charrier, R. and 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, 55-80 pp. <http://dx.doi.org/10.4067/S0716-02082002000100004>.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

Ortiz, C.; Aravena, R.; Briones, E.; Suárez, F.; Tore, C. and Muñoz, J. (2014). Sources of surface water for the Soncor ecosystem, Salar de Atacama basin, northern Chile, *Hydrological Sciences Journal*, 59:2, 336-350 pp., DOI:10.1080/02626667.2013.829231.

Parámetros de Transformación de Datum, Instituto Geográfico Militar. En: sitio web [www.igm.cl](http://www.igm.cl).

Pramar Ambiental (2005). Adenda I: 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.

Ramírez, C. y Gardeweg, M. (1982). Hoja de Toconao Región de Antofagasta: Carta Geológica de Chile, Escala 1:250.000, N° 54, Servicio Nacional de Geología y Minería, Chile.

RCA N° 0226 del 19 de octubre de 2006. Califica favorablemente el proyecto "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.

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

Rissmann, C.; Leybourne, M.; Bennet, C. and Christenson, B. (2015). The origin of solutes within the groundwaters of a high Andean aquifer. *Chemical Geology*. 164–181 pp. [www.elsevier.com/locate/chemgeo](http://www.elsevier.com/locate/chemgeo).

Salas, J.; Aravena, R.; Guzmán, E.; Cornellà, O.; Guimerà, J.; Tore, C.; et al. (2009). Modelo de Evolución Hidroquímica e Isotópica de la Recarga del Salar de Atacama: Soncor y Aguas de Quelana. En: XII Congreso Geológico Chileno. (22 al 26 Noviembre de 2009, Santiago)

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. y Aguirre, E. (1999). Análisis de Requerimientos Hídricos de Vegas y Bofedales en el Norte de Chile.

Scanlon, B.R., Keese, K.E., Flint, A.L., Flint, L.E., Gaye, C.B., Edmunds, W.M., and Simmers, I., 2006, Global synthesis of groundwater in semiarid and arid regions, *Hydrogeological Processes*, vol. 20, p 3335-3370.

SEA (2012). Guía para el uso de Modelos de aguas subterráneas en el SEIA. Servicio de Evaluación Ambiental, Ministerio del Medio Ambiente, Gobierno de Chile. ISBN: 978-956-9076-12-1.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

SERNAGEOMIN (2003). Mapa de Geológico de Chile: Versión Digital: Publicación Geológica digital, N° 4. CD-ROM, Versión 1.0, 2003. Base Geológica escala 1:1.000.000. Servicio Nacional de Geología y Minería. Gobierno de Chile.

SGA (2014). Adenda 4: Estudio de Impacto Ambiental Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama Región de Antofagasta, Chile, para Rockwood Lithium (antes SCL, Sociedad Chilena del Lito).

SLM NX Uno de Peine (2008). Declaración de Impacto Ambiental Producción de Sales de Potasio. Sociedad Legal Minera NX Uno de Peine.

SLM NX Uno de Peine (2010). Adenda N° 1: Estudio de Impacto Ambiental Planta de Producción de Sales de Potasio. Sociedad Legal Minera NX Uno de Peine.

SLM NX Uno de Peine (2011). Adenda N° 2: Estudio de Impacto Ambiental Planta de Producción de Sales de Potasio. Sociedad Legal Minera NX Uno de Peine.

Stoertz, G. and Ericksen, G. (1974). Geology of Salars in northern Chile. Geological survey professional paper 811. United States Government Printing Office, Washington.

University of Massachusetts-Amherst (2015). Using the chloride mass balance method to estimate recharge. Inédito.

USGS (2003). MODFLOW-2000, Estudio geológico modelo modular de agua subterránea de EE.UU. — Documentación de la versión SEAWAT-2000 con el Proceso de Flujo de Densidad Variable (VDF, por su sigla en inglés) y el Proceso de Transporte MT3DMS Integrado (IMT).

Vargas, G.; Ortlieb, L. y Rutllant, J. (2000). Aluviones históricos en Antofagasta y su relación con eventos El Niño/Oscilación del Sur. Revista geológica de Chile, Vol. 27, N° 2, Versión Impresa: ISSN 0716-0208 Recuperado el 07 de julio de 2015, de [http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0716-02082000000200002&lng=es&tlng=en](http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0716-02082000000200002&lng=es&tlng=en). 10.4067/S0716-02082000000200002.

Zheng, C. (2006). MT3DMS v5.2 Supplemental User's Guide, Report to the US Army Engineer Research and Development Center, Department of Geological Sciences, University of Alabama.

Zheng, C. and Wang, P. (1999). MT3DMS: A Modular Three-Dimensional Multispecies Transport Model for Simulation of Advection, Dispersion and Chemical Reactions of Contaminants in Groundwater Systems; Documentation and User's Guide, Contract Report SERDP-99-1, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS.

	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO MODIFICACIONES Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE POZAS DE EVAPORACION SOLAR EN EL SALAR DE ATACAMA	
	ANEXO 1 – ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO Y MODELO NUMÉRICO SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA	

Kipp, K (Jr). (1997). Guide to the Revised Heat and Solute Transport Simulator: HST3D – Version 2. US. Geological Survey. Water-Resources Investigations Report 97-4157.

Sanford, W. and Konikow, L. (1985). A TWO-Constituent Solute-Transport Model for Ground Water Having Variable Density. US. Geological Survey. Water-Resources Investigations Report 85-4279.

Voss, C. (1984). A Infinite Element simulation model for saturated-Unsaturated. Fluid-Density-Dependent Ground-Water flow with energy transport or chemically-Reactive Single-Species Solute Transport. US. Geological Survey. Water-Resources Investigations Report 84-4369. Prepared in Cooperation with U.S. Air Force Engineering and Services Center.